

## **EFFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA CINÉTICA DE SECADO DE SEMILLAS DE PAPAYA SIN MUCÍLAGO**

**IVÁN GÓMEZ-BOLAÑOS, DANIEL MURILLO-JIMÉMEZ, REBECA VARGAS-  
FERNÁNDEZ, GUILLERMO VARGAS-ELÍAS**

<sup>1</sup>Ingeniero Agrícola. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Escuela de Ingeniería de Biosistemas. (506+) 2511-6643. [ivangb05@hotmail.com](mailto:ivangb05@hotmail.com)

<sup>2</sup>Ingeniero Agrícola. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Escuela de Ingeniería de Biosistemas. (506+) 2511-6643. [danielmurillo444@gmail.com](mailto:danielmurillo444@gmail.com)

<sup>3</sup>Ingeniero Agrícola. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Escuela de Ingeniería de Biosistemas. (506+) 2511-6643. [rebecavf92@gmail.com](mailto:rebecavf92@gmail.com)

<sup>4</sup>Ingeniero Agrícola. D.Sc. Profesor. UCR, San José, Costa Rica. Centro para Investigaciones en Granos y Semillas. (506+) 2511- 8820. [gvargase@gmail.com](mailto:gvargase@gmail.com) / [https://www.researchgate.net/profile/Guillermo\\_Vargas-Elias](https://www.researchgate.net/profile/Guillermo_Vargas-Elias)

### **RESUMEN**

Las semillas de papaya tienen gran importancia en estudios genéticos para el mejoramiento de variedades, sin embargo, la composición de esta se caracteriza por un contenido promedio de aceite de 33% y un 29% de proteína, presentando bajos porcentajes de ácidos grasos, lo cual la coloca en una posición viable como un sustituto de harinas, así como para la industria de extracción de aceites para aplicaciones alimentarias, cosméticas y farmacéuticas. Se realizaron ensayos de secado de capa delgada de semillas de papaya 3 diferentes temperaturas: 45°C, 50°C y 55°C, con el fin obtener las curvas de secado de semilla de papaya. Para el estudio se desarrolló un prototipo de monitoreo de humedad relativa y temperatura del aire en tres puntos específicos de una secadora de convección forzada: en la entrada de aire del ventilador, después de la resistencia y después de pasar por la capa de semillas de papaya, por medio de un microcontrolador Arduino Uno, en conjunto con sensores de temperatura y humedad relativa (DHT22). Se determinó el efecto de la temperatura en el tiempo de secado. Previamente se seleccionó el modelo que mejor describe la cinética de secado de la semilla correspondiente al modelo de Page, por lo que a partir de las constantes de velocidad de secado

(k) se usó la ecuación de Arrhenius para obtener la energía de activación para secado por convección forzada para semilla de papaya sin mucílago, obteniéndose un valor de  $40 \text{ KJ mol}^{-1}$  con ajuste de 99,34%.

**PALABRAS CLAVE:** modelo de Page, modelo de Arrhenius, convección forzada, cinética de secado

### ABSTRACT

Papaya seeds have great importance in genetic studies for the improvement of varieties, however, the composition of this is characterized by an average content of oil of 33% and 29% of protein, presenting low percentages of fatty acid, which it places it in a viable position as a substitute for flours, as well as the oil extraction industry for food, cosmetic and pharmaceutical applications. There were performed thin layer drying tests of papaya seeds at different temperatures:  $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , in order to obtain the drying curves of papaya seed. For this study, a prototype of relative humidity and air temperature monitoring was developed in three specific points of a forced convection dryer: in the air inlet of the fan, after the resistance and after passing through the layer of papaya seeds, by an Arduino Uno microcontroller, with the aid of temperature and relative humidity sensors (DHT22). The effect of the temperature on the drying time was determined. Previously, the model that best describes the kinetics of the drying of the seed corresponding to the Page model was selected, the constants of drying rate (k) was used for the Arrhenius equation to obtain the activation energy for forced convection drying for papaya seed without mucilage, obtaining a value of  $40 \text{ KJ mol}^{-1}$  with an adjustment of 99.34%.

**KEYWORDS:** Page model, Arrhenius model, forced convection, drying kinetic

### INTRODUCCIÓN

La demanda por frutas tropicales ha venido creciendo de manera sostenida durante las últimas dos décadas en el 2010 alcanzó los 73,02 millones de toneladas. Actualmente la papaya es la tercera fruta tropical más producida con 11,22 millones de toneladas,

equivalente al 15.36% del total de producción de frutas tropicales. Aun cuando el crecimiento en la oferta de papaya se debe en buena medida al incremento de la producción en la India, esta fruta se ha convertido en fuente de ingreso para miles de hogares y en fuente de divisas para países de Asia y de América Latina, aunque más de la mitad de las exportaciones mundiales de papaya, tienen como destino los Estados Unidos. (Evans, 2015).

La papaya (*Carica papaya* L.) es un cultivo de ampliamente apreciado por ser uno de los pocos frutales que proporciona producción continua durante todo el año después de iniciada su floración por poseer frutos con un alto valor nutritivo y por alcanzar altos rendimientos, tanto de fruta como de semillas. Se ha cuantificado que en frutos femeninos de 1000 a 1400 semillas estas se caracterizan por ser de color negro midiendo de 3,7 a 4,5 mm de largo por 2 a 2,8 mm de ancho y 2 a 2,5 mm de grueso, esféricas, cubiertas por una capa mucilaginosa (sarcotesta); de característica negruzca y arrugada (Sánchez, 2009).

El objetivo del presente documento es generar curvas y evaluar el efecto de la temperatura de secado en semillas de papaya, utilizando el prototipo automatizado de secadora presente en el Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS) de la Universidad de Costa Rica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del presente estudio se obtuvieron 50 papayas de la empresa Soluciones Agroindustriales del Este S.A la cual se ubica en el cantón de Guácimo en la provincia de Limón; estas son de la variedad híbrida-Pococí, cuentan con un tamaño mediano y un grado de madurez intermedio donde la fruta se encontraba con colores verde-amarillento. Se almacenaron a una temperatura 11°C en el laboratorio de tecnología poscosecha del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica, hasta el momento de la extracción de las semillas.

Las semillas fueron extraídas de las papayas y se almacenaron en el laboratorio de semillas del Centro de Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS) de la Universidad de Costa Rica, se

realizó la remoción del mucílago colocando las semillas en un procesador de alimentos doméstico. Este procedimiento se realizó por medio de lavados con agua limpia durante un minuto a velocidad baja y posteriormente las semillas fueron remojadas en agua para una mejor extracción del mucílago; este proceso de remoción se realizó dos veces para la totalidad de semillas extraídas.

Para el proceso de secado, se estableció un sistema de monitoreo en tres puntos del prototipo de secadora disponible en el CIGRAS (Figura 1), para el cual se utilizaron 3 sensores de humedad y temperatura DHT-22 modelo AM2303, este trabaja en rangos de humedad de 0-100%(±2%) y a temperaturas que van desde los -40-125°C (±0,2°C%). Los sensores se colocaron de manera que inicialmente uno de ellos permitiera monitorear las condiciones del aire de entrada del ventilador (condiciones del ambiente), otro inmediatamente después de la resistencia utilizada para calentamiento de aire y el último al final del túnel donde sale el aire, con el fin de observar el comportamiento de este a la hora de interactuar con la semilla.



Figura 1. Prototipo de secadora.

Para el secado de las semillas de papaya se trabajó con una capa delgada de material, donde se utilizaron aproximadamente 120 g de semillas de papaya por medición. Las semillas se colocaron sobre un tamiz N° 45, la cual permitió el paso del aire a tres temperaturas diferentes de 45, 50 y 55

°C por la capa de semilla con una velocidad promedio de 0.7 m/s y que además con esta se evitó la pérdida de material por gravedad.

La masa de las semillas se midió por medio de una balanza analítica marca BOECO modelo BPS 51 plus ( $\pm 0.5$ ), estos datos se tomaron en intervalos de 5 minutos, hasta llegar a una diferencia de

peso menor o igual a 0,5%. Los ensayos de las cuatro temperaturas de estudio se realizaron por duplicado para garantizar que no existiera variabilidad entre las pruebas del experimento.

La determinación de la masa seca se realizó con la ayuda de una balanza analítica marca AND modelo MF-50 ( $\pm 0.01$ ), en la cual por medio de radiación se secaron muestras de 50 g hasta alcanzar un contenido de humedad de 0.05%. Se alcanzó una masa seca de 36,25 g lo cual permite identificar que el contenido de humedad en base seca inicial de las semillas es de 233% aplicando la ecuación 1.

$$CH\ bs\ (\%) = 100 * \frac{m(t) - m(f)}{m(f)} \quad (1)$$

Donde

CH bs: contenido de humedad en base seca [%]

m(t): masa de la muestra en cualquier instante [g]

m(f): masa seca [g]

Posteriormente se obtuvo la razón de humedad experimental para cada uno de los resultados, esto se calculó como el contenido de humedad en cualquier tiempo, menos la humedad de equilibrio, entre el contenido de humedad inicial menos la humedad de equilibrio, como se muestra en la ecuación:

$$RH = \frac{CH(t) - CH(e)}{CH(i) - CH(e)} \quad (2)$$

Donde

RH: razón de humedad de la muestra en un tiempo determinado [adm]

CH(t): contenido de humedad de la muestra en cualquier momento [%]

CH(i): contenido de humedad inicial [%]

CH(e): contenido de humedad de equilibrio [%]

### Elaboración de curvas de secado, efecto de la temperatura y energía de activación

Se elaboraron las curvas de secado a partir del contenido de humedad en base seca de la semilla con respecto al tiempo y la razón de humedad con respecto al tiempo. Se determinó el efecto que

la temperatura tiene en la velocidad y tiempo de secado y se aplicó a partir de los resultados obtenidos, el modelo de Page representado ecuación 3.

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (3)$$

Tomando como referencia los resultados obtenidos anteriormente del modelo de Page, se procedió a determinar la energía de activación para la cual se realizó un gráfico que tiene los valores de  $1/T$  (siendo  $T$  la temperatura absoluta en Kelvin) como variable independiente y el logaritmo natural de la constante de velocidad de secado “ $K$ ” como variable dependiente, según se establece en la teoría el comportamiento de la curva debe ser lineal lo que también se conoce como modelo de Arrhenius.

$$y = m * x + b \quad (4)$$

$$\ln(k) = -\frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln A \quad (5)$$

Donde

$\ln(k)$ : constante cinética del sistema [adm]

$A$ : factor preexponencial o factor de frecuencia [adm]

$Ea$ : energía de activación [J/mol]

R: constante universal de los gases [J/K/mol]

T: temperatura absoluta [K]

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos previamente en la búsqueda del modelo matemático que mejor se ajuste a la curva de razón de humedad obtenida a partir de las mediciones de masa de semilla se obtuvo que el mejor ajuste corresponde al de Page, en general todos los ensayos a las 3 temperaturas presentaron ajustes superiores al 99%. En el Cuadro 1, se puede observar que existe un efecto asociado a la temperatura de secado con respecto a la velocidad de secado de la semilla, tal y como se esperaba al aumentar la temperatura de secado la constante tiende a aumentar también, presentando un valor de  $0.170 \text{ min}^{-1}$  para una temperatura de  $55^\circ\text{C}$ . Esto se puede ejemplificar de mejor manera en la Figura 2 donde se presentan las curvas de secado para las 3 temperaturas.

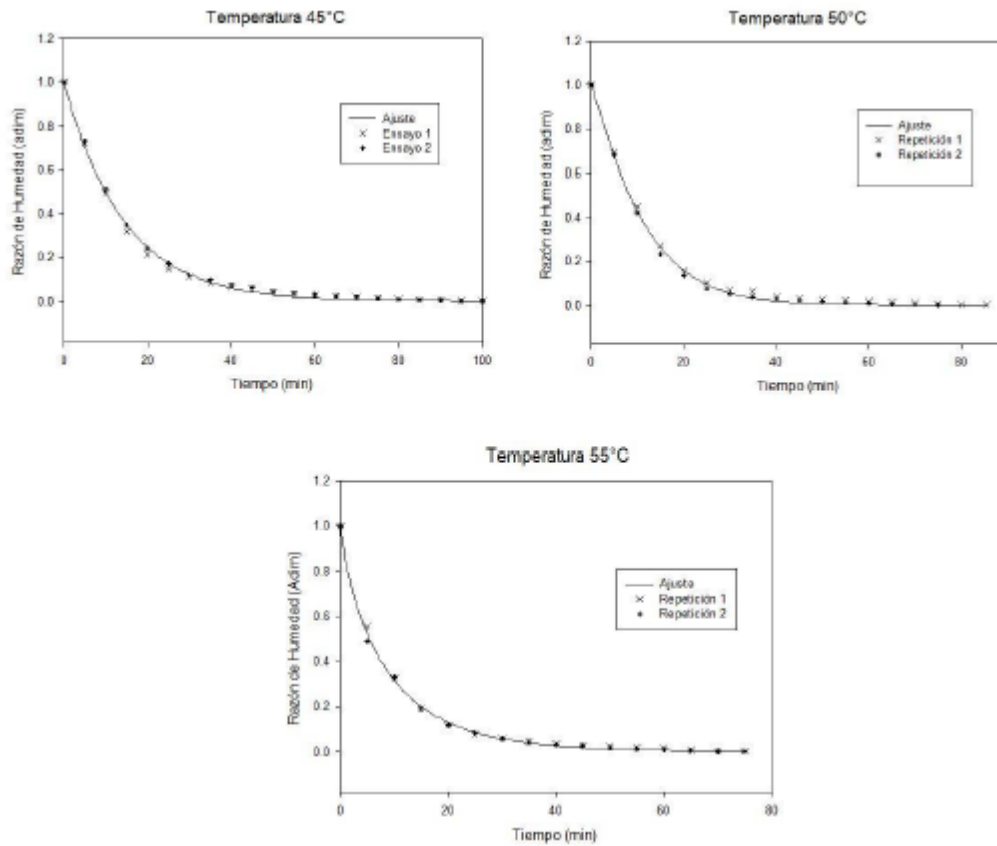


Figura 2. Razón de humedad respecto al tiempo observado y ajustes del modelo de Page para las tres temperaturas del experimento

Los datos de las dos repeticiones pueden ser tratados como un solo set de información, ya que al determinar las curvas de mejor ajuste con el modelo de Page se observa que el comportamiento de la constante de secado ( $k$ ) se promedia al ser tratados los datos como un todo; es decir, para el primer ensayo a 50°C el valor de  $k$  corresponde a  $0,065 \text{ h}^{-1}$ . Para el segundo ensayo se obtuvo un valor de  $0,069 \text{ h}^{-1}$ , al calcular este parámetro utilizando un ajuste entre las dos mediciones se obtuvo un  $k$  de  $0,0677 \text{ h}^{-1}$ , por lo cual se decidió trabajar con los datos totales y no separarlos por mediciones.

Cuadro 1. Temperaturas de secado y constantes determinadas del modelo de Page.

T. de secado		Coef.	Const. de secado	Coef.	Coef.	Const. de secado	Coef.	Coef.
Ts (°C)	Ts (K)	$T_s^{-1}(10^{-3} \text{ K}^{-n} \text{ (dec.)})$	k (min <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	n (dec.)	k (min <sup>-1</sup> )	Ln(k)	R <sup>2</sup>
		1)						
45	318.15	0.0031	1.001	0.069	0.997	0.972	0.075	-2.58 0.996
50	323.15	0.0030	1.088	0.068	0.996	0.972	0.092	-2.38 0.995
55	328.15	0.0030	0.830	0.170	0.998	0.972	0.119	-2.12 0.995

A partir de los resultados obtenidos anteriormente se demuestra en la Figura 3 que las curvas obtenidas 45°C, 50°C y 55°C presentan comportamientos similares a los esperados puesto que a mayor temperatura la curva de decaimiento de masa y por ende de razón de humedad presenta una pendiente mayor.

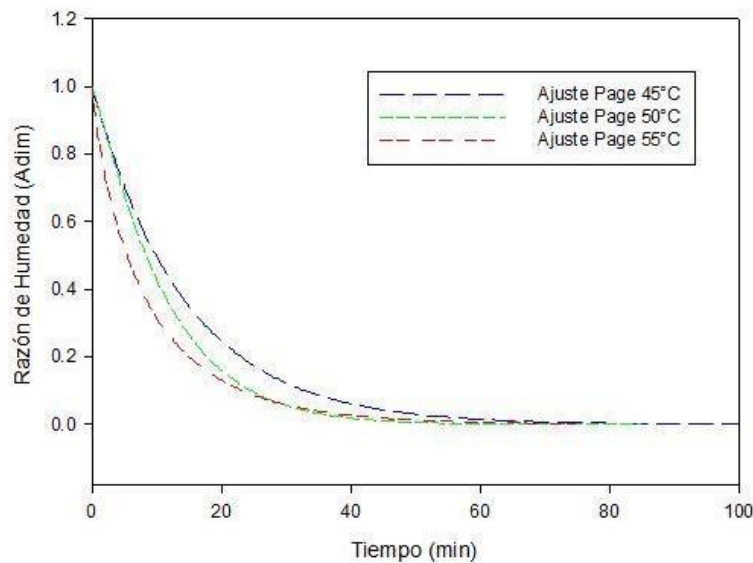


Figura 3. Razón de humedad respecto al tiempo de secado de semilla de papaya a diferentes temperaturas.

Se puede observar en el Cuadro 1 que existe variabilidad en los valores del coeficiente n para cada una de las temperaturas, esto implica que el ajuste del modelo se realiza producto de dos variables, restándole significancia a la variable más importante como lo es la constante de

velocidad de secado, por esta razón se obtuvo el promedio de la variable  $n$  y se fijó el valor en las condiciones iniciales con el fin de que el modelo se ajuste únicamente al valor de  $k$ , de esta manera se obtiene un ajuste más preciso del modelo de Arrhenius, pasando de un ajuste del 77% al 99%, la representación del ajuste se presenta en la Figura 4.

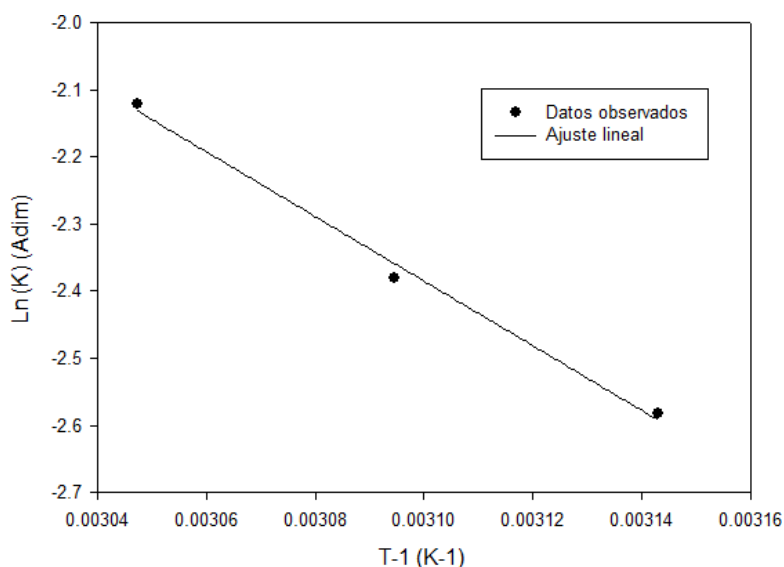


Figura 4. Ajuste lineal para la curva de energía de activación.

Utilizando un modelo lineal para curva presentada anteriormente, se obtiene la siguiente expresión con un ajuste del 99.3%.

$$\ln(k) = -4811.49 \left( \frac{1}{T} \right) + 12.53(6)$$

**Cuadro 2.** Parámetros obtenidos de regresión lineal en energía de activación.

Variable	
<b>R<sup>2</sup></b>	0.9934
<b>m (pendiente)</b>	-4811.50
<b>b (intercepto)</b>	12.53
<b>Constante de los gases (J K<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup>)</b>	8.31
<b>Energía de Activación (J mol<sup>-1</sup>)</b>	-40004.25

Por lo que se puede afirmar que la energía de activación para secado de semilla de papaya sin mucílago, por medio del método de convección forzada considerando una constante de los gases de  $8.31 \text{ J/K/mol}$  sin mucílago corresponde a  $40 \text{ KJ mol}^{-1}$ , esto concuerda con lo reportado por (Zogzas et al, 1996) quienes desarrollaron una estimación de la energía de activación de productos agrícolas los cuales establecen un intervalo entre  $12,7$  a  $110 \text{ KJ mol}^{-1}$ .

### CONCLUSIONES

El modelo de Page brinda los ajustes con menor porcentaje de error, por lo que evidencia la capacidad superior que tiene los modelos de carácter teórico para predecir el comportamiento del proceso de secado.

A partir del modelo de Arrhenius se puede establecer una predicción de la constante de secado de semillas de papaya sin mucílago en función a la temperatura de secado, sin necesidad de realizar pruebas adicionales, ya que se demostró que el modelo presenta un ajuste superior al 99%.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Evans, E. (2015). *Una mirada a la producción, el comercio y el consumo de papaya a nivel mundial*. IFAS Extension, Florida, pp. 1–7,.

Sanchez, L. (2009) *Efecto del secado en semillas de Papaya (Carica papaya L.) en la calidad a través del Tiempo*, Universidad Autónoma Agraria.

Zogzas, N. P., Marulis, Z. B., Mariinos-Kourisd. (1996). *Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs*. Drying Technology, 14 (10): 2225–2253