

# MODELADO MATEMÁTICO DEL PROCESO DE SECADO DE SOYA CON TECNOLOGÍAS SOLARES EN CLIMAS CÁLIDOS-HÚMEDOS

Israel del Jesús Acosta Pech<sup>1\*</sup>, Margarita Castillo Téllez<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Internacional Iberoamericana, 24560, Campeche.

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, 24085 Campeche.

Fecha de recepción: 19 de marzo de 2022 - Fecha de aceptación: 12 de mayo de 2022

## Resumen

Recientemente la investigación en secadores solares se enfoca en determinar la cinética de secado y su descripción a partir de modelos matemáticos. Este trabajo presenta, mediante la instrumentación de secadores solares directos tipo gabinete, el modelado matemático para evaluar los procesos de transferencia de calor y masa del secado de soya en climas cálidos - húmedos. Se comparó el desempeño térmico de secadores solares con convección natural y forzada con un horno eléctrico a temperaturas controladas (55 °C y 65 °C). Se obtuvieron datos de cinética de secado y contenido de humedad para evaluar los modelos matemáticos propuestos. Se analizó el comportamiento de la irradiancia, temperatura ambiente y humedad relativa y su relación con la pérdida de peso. Se realizó el análisis de colorimetría para estudiar el efecto de secado sobre las características visuales del producto.

**Palabras claves:** Secado solar de soya, Modelado matemático, Tecnologías de secado solar.

## MATHEMATICAL MODELING OF THE SOYBEAN DRYING PROCESS WITH SOLAR TECHNOLOGIES IN HOT-HUMID CLIMATES.

### Abstract

Recently, solar dryers research has focused on determining the drying kinetics and its description from mathematical models. Through the instrumentation of cabinet-type direct solar dryers, this work presents the mathematical modeling to evaluate the heat and mass transfer process of soybean in hot-humid climates. The thermal performance of solar dryers with natural and forced convection was compared with an electric oven at a

---

[israel.acosta@doctorado.unini.edu.mx](mailto:israel.acosta@doctorado.unini.edu.mx)

Nota: Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 26, No. 2, 2022, ISSN: 2448-8364

controlled temperature (55 °C and 65 °C). Drying kinetics and moisture content data were obtained to evaluate the proposed mathematical models. The behavior of irradiance, ambient temperature, and relative humidity and their relationship with weight loss were analyzed. A colorimetry analysis was performed to study the effect of drying on the visual characteristics of the product.

**Keywords:** Solar drying of soybean, Mathematical modeling, Solar drying technologies.

## 1 Introducción

México es un importante importador y consumidor de soya a nivel mundial (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019a). Este alimento es importante por sus propiedades nutrimentales, y la alta producción liderada por Campeche a nivel nacional, con variedades mejoradas liberadas por la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (INIFAP, 2017). En 2021, la producción de soya en Campeche fue de 118 mil toneladas, aportando el 47.5 % de la producción nacional (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2021).

La conservación de los alimentos de origen agrícola se considera un procedimiento esencial para garantizar la disponibilidad de los productos para su uso posterior y también para reducir las pérdidas posteriores a la cosecha. Se estima que en la actualidad en la pequeña agricultura se merma la producción entre 10 % y 40 % por mal manejo postcosecha e inadecuadas prácticas de secado y limpieza de grano (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019b).

El secado es un proceso básico para reducir la humedad de un producto cualquiera, de modo que al final este presenta unas características muy diferentes respecto al inicial en lo referente al color y textura. Tradicionalmente, una manera que se utilizaba para el secado de productos en general es la técnica de secado natural, que logra el secado mediante el uso de la

irradiación solar, temperatura ambiente, humedad relativa del ambiente y viento natural. Obviamente, la velocidad del secado es muy lenta, por lo que los cultivos permanecen al aire libre generalmente de 10 a 30 días, dependiendo del producto y las condiciones climáticas del lugar. Las limitaciones más obvias son que los cultivos sufren los efectos del polvo, contaminación atmosférica, ataques de insectos y roedores. Debido a estas limitaciones, la calidad del producto puede degradarse más allá de la comestibilidad aceptable. Todas estas desventajas se pueden eliminar mediante el uso de un secador solar debido a que sirve de protección contra la contaminación y ataque de roedores (Kalagirou, 2014). El secado solar ha sido una técnica utilizada para la preservación de los productos alimenticios, principalmente granos, cárnicos, pescados, plantas y algunos frutos (Cortez, 2014).

Una de las operaciones más intensiva en energía en los procesos industriales es el secado. En la mayoría de los países industrializados, entre el 7 % y el 15 % de la energía industrial nacional se utiliza para el secado (Bennamoun, 2012). La energía se suministra de diversas fuentes como los combustibles fósiles, el gas natural y la energía solar. Debido al mayor costo de los combustibles fósiles, la incertidumbre con respecto a la disponibilidad futura y su efecto sobre el medio ambiente, se ha tenido en cuenta el desarrollo de energías renovables (Lingayat et al., 2019).

El diseño de secadores solares y su

desarrollo, es una prioridad de la industria de alimentos, porque la energía solar es considerada como una de las de mayor proyección, debido a los conocidos problemas de agotamiento de los combustibles fósiles, y su correspondencia con la emisión de gases de efecto invernadero (Bergues & Díaz, 2015).

El método de secado solar es ventajoso, ya que ayuda a superar los principales problemas que enfrentan los países en desarrollo, como el rápido aumento de los precios de los combustibles y la amenaza de la contaminación ambiental.

El conocimiento de la cinética de secado es de importancia indiscutible para el desarrollo de modelos que describan los procesos de secado y para comprender los mecanismos de eliminación de humedad para el establecimiento de condiciones de operación apropiadas (Guiné, 2005a, 2005b). Realizar el modelado matemático del secador solar de soya permite relacionar la cinética de secado exacta de los productos agrícolas con el comportamiento del aire de secado, así como la materia a secar (Karim & Hawlader, 2005). Las ecuaciones de secado requieren el análisis de la variación del contenido de humedad respecto al tiempo. Por lo tanto, los datos de contenido de humedad y tiempo se analizan con modelos seleccionados para determinar los valores de las constantes de los diferentes modelos (Sitesh et al., 2015). Todos los modelos matemáticos se validan y verifican comparando los datos de medición obtenidos de la experimentación con valores pronosticados como el contenido de humedad y la temperatura.

Una de las prioridades del desarrollo económico y social es impulsar las actividades productivas en apoyo al desarrollo de las zonas rurales, especialmente las productoras de alimentos,

que cuentan con incipientes medios y una carente infraestructura energética para mejorar la calidad e higiene de sus productos (Castillo et al., 2016). En el Estado de Campeche el sector agroindustrial tiene necesidades de secado de productos, para darles mayor tiempo de conservación y valor agregado, en vistas de ingresar al mercado internacional; por lo que se requiere un método eficaz para un clima cálido-húmedo con humedad relativa 50 % y temperatura promedio 27 °C (CONAGUA, 2020), que procure la calidad e higiene de los productos a secar.

(Darvishi et al., 2014), investigaron la influencia de la temperatura y la velocidad del aire en la cinética de secado durante el secado de soya en lecho fluidizado a 80 °C, 100 °C, 120 °C y 140°C y tasas de flujo de aire de 1.8 m/s, 3.1 m/s y 4.5 m/s. Se investigaron seis modelos matemáticos para describir el comportamiento del secado. Aunque el modelo de Midilli mostró el mejor ajuste, se seleccionó el modelo de Page, ya que tenía un rendimiento casi similar, pero el modelo es más simple con dos parámetros en lugar de cuatro.

(Darvishi, 2017), investigó diferentes aspectos del secado de soya, como el análisis energético y exergético, la calidad, parámetros de transferencia de masa y el modelado de la cinética de secado en un secador de microondas. Los resultados mostraron que la eficiencia energética (33.7 %-66 %) fue mayor que la eficiencia exergética (23.38 %-48.30 %). El consumo específico y la pérdida de energía variaron de 4.93 MJ/kg a 9.11 MJ/kg de agua y de 5.04 MJ/kg a 8.89 MJ/kg de agua, respectivamente. Aproximadamente de 8.94 % a 20.07 % del aporte total de energía se utilizó para incrementar la temperatura del producto. Los valores del potencial de mejora cambiaron entre 1.31 MJ/kg-5.35 MJ/kg de agua (Figura 60). Entre los

modelos, se encontró que el modelo de Page es el que describe mejor el comportamiento de secado de la soya.

(Castillo et al., 2020), reportó el secado de soya en un secador solar mixto y un secador solar tipo gabinete. Los resultados mostraron que el contenido de humedad se estabilizó de manera más rápida en el secador solar mixto, con un tiempo de 6 horas, la velocidad de secado máxima alcanzada fue de 0.0109 kg agua/kg materia seca min con un contenido de humedad final de 0.6369 g de agua/g de materia seca. El cambio de color fue mejor en el secador mixto con un valor de 11.29 Delta E. El modelo que mejor se ajustó en ambos secadores fue el de Weibull.

Este trabajo presenta, mediante la instrumentación de secadores solares directos tipo gabinete, el modelado matemático para evaluar los procesos de transferencia de calor y masa del secado de soya en climas cálidos - húmedos. Además, se realizó el análisis de colorimetría para estudiar el efecto de secado sobre las características visuales del producto.

## 2 Materiales y métodos

### Materia prima

Se seleccionó la especie de soya, cultivada en el Estado de Campeche, en función de sus propiedades nutrimentales, producción, costo, importancia económica y presentación del producto deshidratado.

Del grupo seleccionado se cortaron las ramas y hojas, se separaron y seleccionaron para obtener un grupo homogéneo de granos, basado en la madurez, color, frescura y tamaño.

Las muestras se lavaron y pesaron, se realizaron mediciones de ancho, longitud y grosor con un calibrador electrónico (vernier). No hubo diferencias significativas en cuanto al tamaño y el peso de los diferentes granos seleccionados

para la prueba. Se utilizó una muestra de 20 g de soya para cada una de las tres pruebas realizadas.

La Figura 1 muestra los secadores solares directos que se utilizaron en este estudio.

En ambos casos, los secadores solares, se probaron en condiciones ambientales similares.



**Figura 1** Secadores solares de gabinete con convección natural y forzada.

## Métodos experimentales

### Secado Solar Directo

Se utilizó un secador solar directo tipo gabinete con material plástico transparente y una superficie de tratamiento de 0.5 m<sup>2</sup>. La cámara de secado contiene una superficie que absorbe la radiación solar, en la que se coloca el producto a secar. Las partes laterales, inferiores y posteriores están perforadas para permitir la circulación y extracción de aire caliente y húmedo. Puede ser operado con circulación de aire natural o convección forzada utilizando un ventilador con una velocidad de aire máxima de 2.9

m/s.

Durante el período de experimentación, los parámetros climáticos que incluyen temperatura, humedad, velocidad del aire e irradiación solar global se registrarán mediante una estación meteorológica instalada sólo en el área experimental.

### Horno eléctrico.

Se empleó un horno eléctrico digital Riossa®, con una sensibilidad de ± 2 °C, el cual cuenta con un aislante térmico de alta temperatura (**Figura 2**).



**Figura 2 Horno eléctrico digital Riossa®**

### Modelado de las cinéticas de secado.

Para llevar a cabo el análisis de datos se tomó en cuenta el contenido de humedad en base seca para ajustarlo a los modelos del comportamiento de la cinética de secado, empleando la regresión no lineal a través del método de los mínimos cuadrados aplicando el software Matlab® y hojas de cálculo de Microsoft Excel®.

Se utilizó la razón de humedad, MR, definida como el cociente entre la humedad inicial y final de las muestras (Akpinar, 2006; Vijayan et al., 2016):

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (1)$$

Donde:

MR: Relación de humedad.

Mt: Contenido de humedad

instantáneo en un tiempo  $t$ .

Mi: Contenido de humedad inicial.

Los modelos comúnmente empleados para el ajuste de datos y describir el comportamiento de la cinética de secado de soya, utilizados en estudios

anteriores en climas similares y también empleados en el municipio de interés se muestran en la Tabla 1 (Castillo Téllez et al., 2018; Darvishi, 2017; Darvishi et al., 2014; Park et al., 2018):

**Tabla 1 Modelos matemáticos aplicados al proceso de secado de soya**

Modelo	Ecuación	Referencia
Newton	$MR = \exp(-kt)$	(Lewis, 1921)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	(Page, 1949)
Page modificado	$MR = \exp(-(kt)^n)$	(Yaldyz & Ertekyn, 2001)
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	(Cihan et al., 2007)
Logarítmico	$MR = a \exp(-kt) + c$	(Chandra & Singh, 1984)
Wang and Singh	$MR = 1 + ab + bt^2$	(Abano et al., 2013)
Weibull	$MR = a - b \exp(-kt^n)$	(Babalís et al., 2006)

**Análisis estadístico.**

(E. Akpınar et al., 2003; Midilli et al., 2002; Toğrul & Pehlivan, 2004; Yaldyz & Ertekyn, 2001), afirman que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y chi cuadrado ( $\chi^2$ ), son parámetros cruciales para validar los modelos de la cinética de secado solar, comparar las ventajas de ajuste de los datos experimentales a los calculados y encontrar el que mejor se ajusta. El mejor modelo es el que muestra el valor máximo de  $R^2$  y los valores mínimos de RMSE y  $\chi^2$ .

Los parámetros mencionados anteriormente se calculan de la siguiente manera:

$$R^2 = 1 - \left\{ \frac{[\sum_{i=1}^N MR_{P,i} - MR_{E,i}]^2}{[\sum_{i=1}^N MR_P - MR_E]^2} \right\} \quad (2)$$

$$RMSE = \left[ \sqrt{\frac{\sum_i^N (MR_{P,i} - MR_{E,i})^2}{N}} \right] \quad (3)$$

$$\chi^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{E,i} - MR_{P,i})^2}{N - n} \right] \quad (4)$$

Donde:

$MR_{P,i}$  es el  $i$ -ésimo valor predicho por el modelo estudiado MR

$MR_{E,i}$  es el  $i$ -ésimo valor experimental observado de MR

$MR_P$  es el valor medio de MR

**3 Resultados y discusión**

Las pruebas de secado se realizaron los días 3 de mayo, 10, 11, 17, 18 y 19 de noviembre del 2021 en horarios comprendidos entre 9:00 h y 16:00 h.

La **Figura 3** muestra la variación de los parámetros ambientales durante los tres días de pruebas con los secadores solares (10, 11 y 17 de noviembre). Como se puede observar, la máxima radiación solar fue de 736.5 W/m<sup>2</sup>, alcanzada al medio día del segundo día de pruebas; el valor promedio fue de 459 W/m<sup>2</sup>. La temperatura ambiente promedio fue 29.8 °C, variando entre 26.6 °C y 31.2 °C. Por otro lado, la humedad relativa osciló entre 41 % y 84 %, siendo el promedio 59 %.

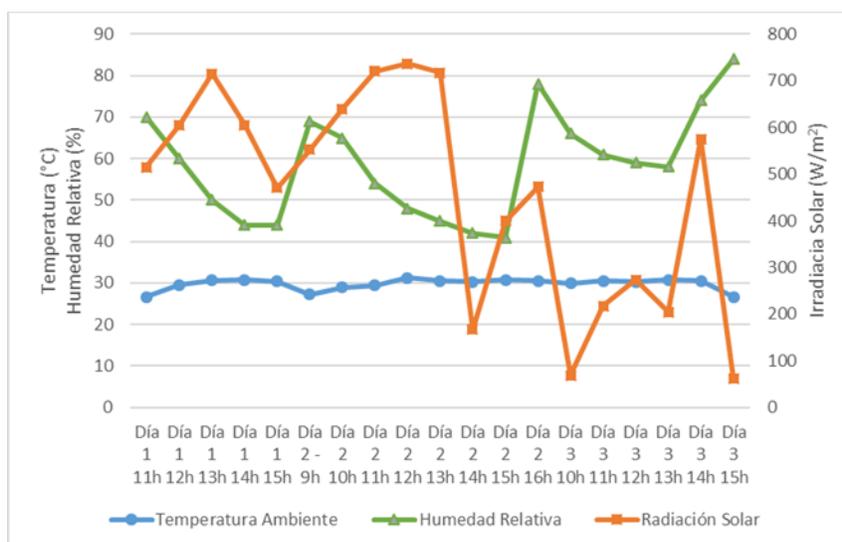


Figura 3 Condiciones ambientales durante el periodo de pruebas.

Tabla 2 Humedad y actividad del agua obtenida por los diferentes métodos de secado (promedio).

Tipo de secado	Humedad (%)			Actividad del agua (aw)		
	Inicial	Final	Desviación Estándar	Inicial	Final	Desviación Estándar
Horno convencional 65°C	70	7.98	31.01	0.95	0.47	0.24
Horno convencional 55 °C	70	7.49	31.25	0.95	0.40	0.275
Secador solar con convección natural	70	7.36	31.32	0.95	0.35	0.30
Secador solar con convección forzada	70	7.48	31.26	0.95	0.38	0.28

### Cinética de secado solar

Los valores iniciales y finales de humedad y actividad de agua de las muestras se presentan en la **Tabla 2**.

La humedad final osciló entre un 7.36 % y 7.98 %. Los valores finales de la actividad del agua indican que no hay posibilidad de crecimiento microbiano en el producto deshidratado obtenido. Los secadores solares de gabinete con

convección natural y forzada fueron las tecnologías que proporcionaron los valores más bajos respecto al contenido de humedad y actividad del agua.

Se obtuvieron las cinéticas de secado en ambos secadores solares y en el horno a temperaturas controladas de 55 °C y 65 °C, se realizaron tres experimentos en cada caso. **En la Figura 4 y Figura 5**, se presentan el

contenido de humedad en función del tiempo y la velocidad de secado de las diferentes tecnologías; como se puede observar, el horno a 65 °C y la convección natural minimizan el tiempo para alcanzar la humedad de equilibrio en comparación con las otras dos tecnologías. Los tiempos de secado fueron 360 min y 420 min, respectivamente. Esto se debe a las mayores temperaturas y menor humedad dentro de la cámara de secado debido básicamente a causa de un menor intercambio térmico con el aire que tiene una velocidad baja en la cámara de secado.

Las velocidades de secado observadas en la **Figura 4** también muestran que la convección natural y el horno a 65 °C son muy similares, siendo ligeramente mayor este último. En el caso del horno a 55 °C, se puede observar una velocidad decreciente entre 4 g de agua/g de materia seca y 3 g de agua/g de materia seca, mientras

que en las demás tecnologías se observan períodos de velocidad constante.

**Modelado matemático.**

La **Tabla 3** presenta los coeficientes y parámetros de ajuste de los modelos matemáticos analizados para el secado de soya. Los modelos Page, Page Modificado y Weibull muestran los mejores ajustes con los resultados experimentales de las diferentes tecnologías de secado. Por lo tanto, el contenido de humedad en cualquier momento durante el proceso de secado se puede estimar de forma fiable con los modelos mencionados. Las **Figura 6**, **Figura 7**, **Figura 8** y **Figura 9** muestran que las cinéticas de secado se ajustan con gran precisión a los modelos analizados para la convección forzada, convección natural, horno a 55 °C y horno a 65 °C, respectivamente. Se ilustran los tres mejores modelos y para todos los casos  $R^2 > 0.99$ .

**Tabla 3 Coeficientes y parámetros de ajuste del modelado matemático.**

Modelo	Parámetro	Convección Forzada	Convección Natural	Horno 55 °C	Horno 65 °C
Page	k	0.03403	0.104	0.004356	0.2864
	n	0.7763	0.6311	1.125	0.3552
	R <sup>2</sup>	0.9994	0.9993	0.9983	0.9999
	RMSE	0.006698	0.00764	0.01098	0.002637
	χ <sup>2</sup>	0.000045	0.000058	0.000120	0.000006
Page Modificado	k	0.01285	0.0277	0.04875	0.02962
	n	0.7765	0.6314	0.1666	0.3552
	R <sup>2</sup>	0.9994	0.9993	0.9967	0.999
	RMSE	0.006698	0.00764	0.01539	0.002637
	χ <sup>2</sup>	0.000045	0.000058	0.0001250	0.000006

Weibull	a	0.006918	-0.006095	0.997	1
	b	-0.9937	-1.006	1.025	1.136
	k	0.03002	0.1177	362.4	2.468
	n	0.8072	0.5989	-1.399	-0.4022
	R <sup>2</sup>	0.9996	0.9994	0.9976	0.9999
	RMSE	0.005815	0.0075	0.01399	0.003408
	$\chi^2$	0.000033	0.000057	0.000078	0.000011

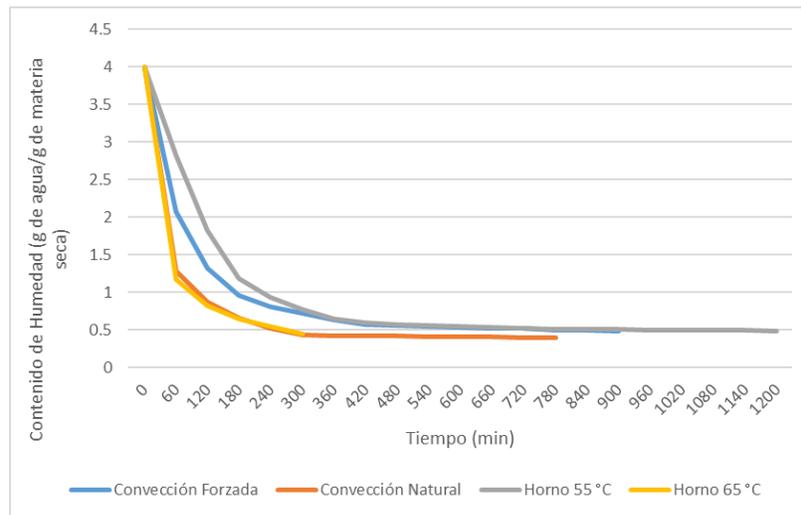


Figura 4 Contenido de humedad del proceso de secado de soya.

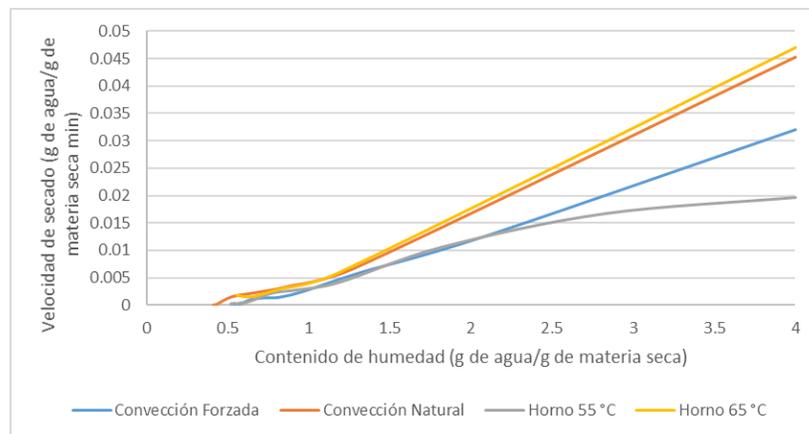


Figura 5 Velocidad de secado del proceso de secado de soya.

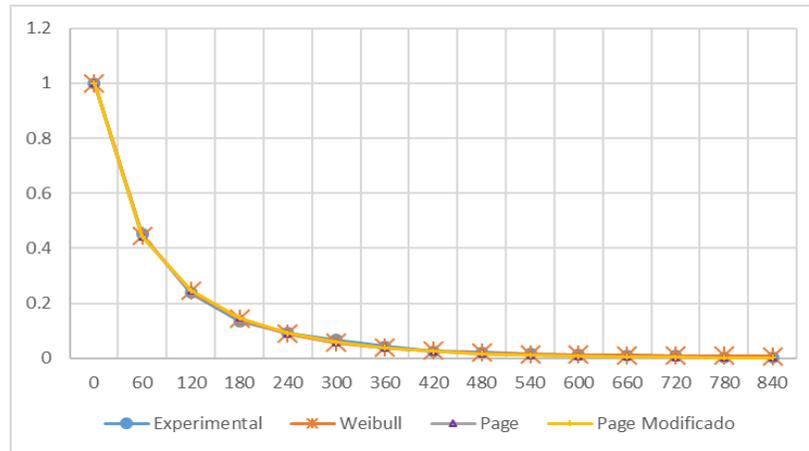


Figura 6 Resultados experimentales y modelado matemático (Convección Forzada).

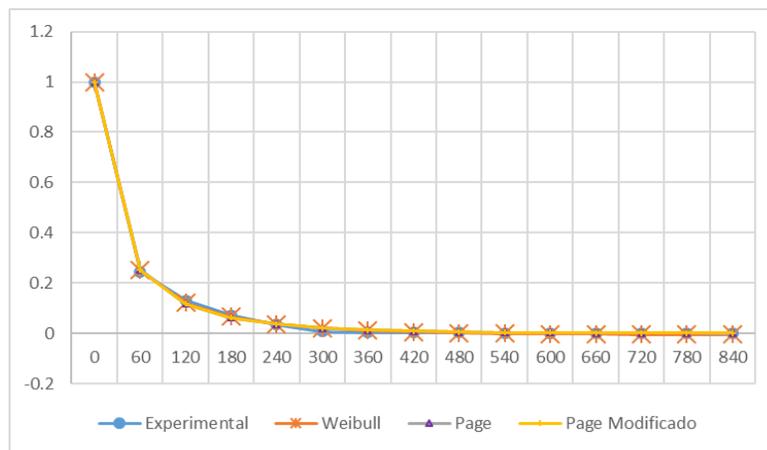


Figura 7 Resultados experimentales y modelado matemático (Convección Natural).

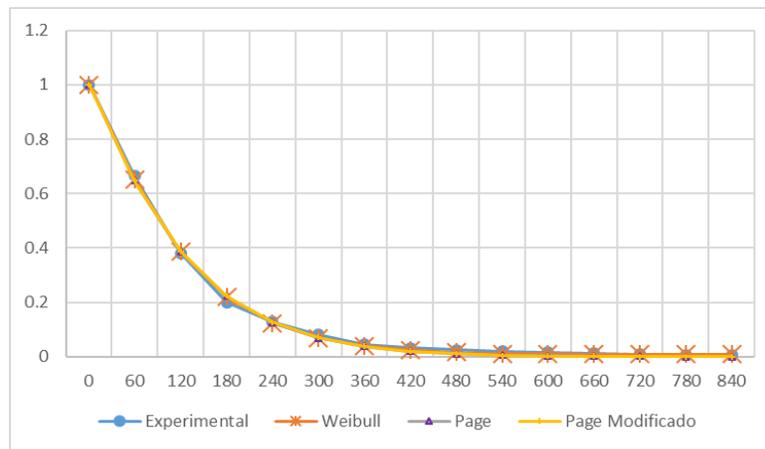
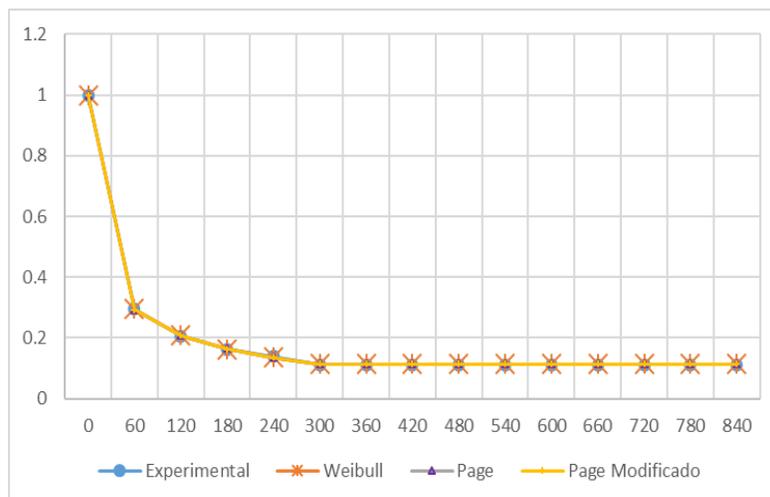


Figura 8 Resultados experimentales y modelado matemático (Horno a 55 °C).



**Figura 9 Resultados experimentales y modelado matemático (Horno a 65 °C).**

### Colorimetría

Los parámetros de color se determinaron por reflectancia y se expresaron en términos de los parámetros  $L^*$  (Blanco-Oscuro),  $a^*$  (rojo-verdoso),  $b^*$  (amarillado-azulado),  $H^*$  (ángulo de tono) propiedad del color y saturación o intensidad  $C^*$  (Croma). Además, se calculó el cambio total de color  $\Delta E$  y la matiz o tono HUE.

Los resultados del análisis de colorimetría realizados a las muestras de los secadores solares se muestran en la **Tabla 4**.

En la **Figura 10** se presentan los valores de  $\Delta E$ , Croma y HUE.  $\Delta E$  fue muy similar en ambos secadores, 13.67 para el natural y 15.04 para convección forzada, por lo que el primero conservó ligeramente mejor el color de la soya; ambos tienen valores

muy cercanos a los aceptados comercialmente acorde con (Castillo et al., 2020). El Croma, que representa la intensidad del color, se mantuvo similar en ambos secadores. Los valores de HUE fueron muy cercanos entre sí, sin embargo, la saturación fue mayor en la coincidentes con los presentados por (Chan et al., 2021).

La **Figura 11** muestra los resultados de luminosidad, en la cual la diferencia de claridad está indicada por  $\Delta L$ , la desviación del punto acromático rojo-verde es  $\Delta a$  y la desviación de amarillo-azul es  $\Delta b$ , valores obtenidos mediante el colorímetro al realizar las mediciones. Se observa que la variación de los tres parámetros fue mayor en el secador con convección forzada, mostrando tendencias a oscurecerse, hacia el verde y al amarillo, respectivamente.

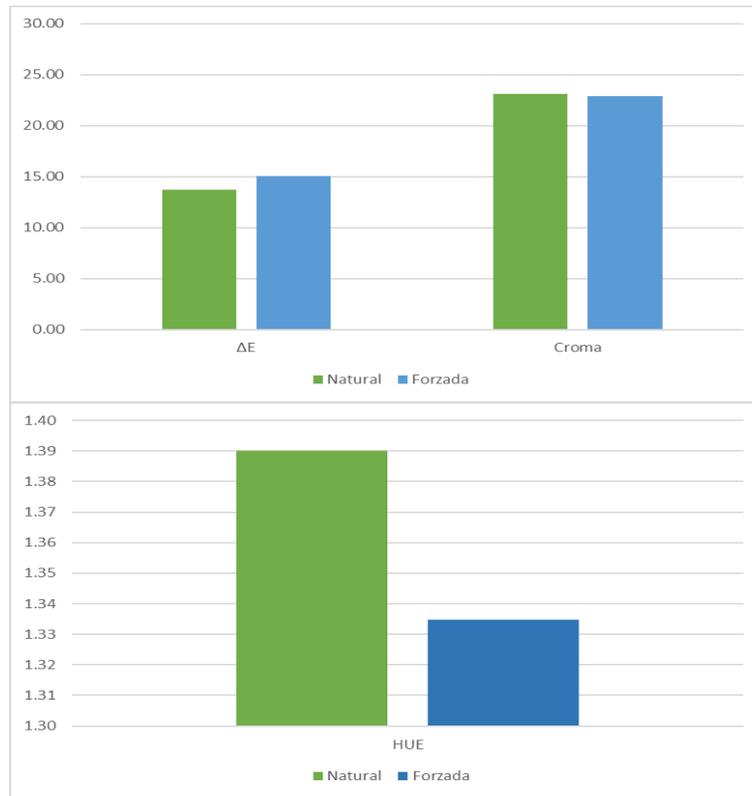


Figura 10 ΔE, Cromo y HUE resultantes del proceso de secado.

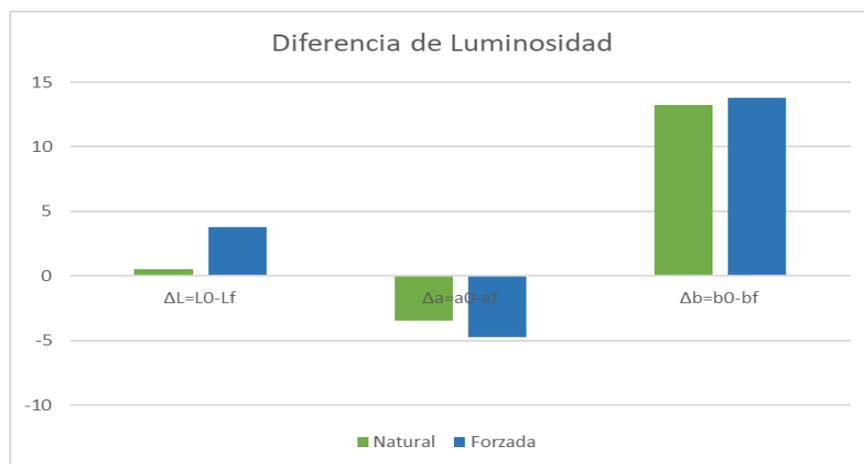


Figura 11 Diferencia de luminosidad del proceso de secado solar de soya.

## 4 Conclusiones

Se analizaron las condiciones ambientales, contenido de humedad, cinéticas de secado, modelos matemáticos y colorimetría durante el proceso de secado de soya y se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Los valores promedios de radiación solar, temperatura ambiente y humedad relativa fueron  $456 \text{ W/m}^2$ ,  $29.8 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $59 \%$ , respectivamente.
- El contenido de humedad se redujo de  $70 \%$  hasta un mínimo de  $7.36 \%$  en la convección natural. La actividad del agua se mantuvo dentro de los valores para evitar la posibilidad de crecimiento microbiano
- La cinética de secado fue más rápida en el horno de  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  y en la convección natural, el tiempo de secado fue  $360 \text{ min}$  y  $420 \text{ min}$ , respectivamente, para alcanzar un contenido de humedad de la materia seca de  $0.4478 \text{ g de agua/g de materia seca}$  y  $0.4189 \text{ g de agua/g de materia seca}$ , y una tasa de secado de  $0.0074 \text{ g de materia seca/g min}$  y  $0.00001 \text{ g de materia seca/g min}$ .
- Los tres modelos estudiados se ajustaron de manera adecuada a las

cinéticas de secado, sin embargo, el modelo de Weibull presentó el mejor ajuste por encima de los otros dos, por lo que este modelo puede utilizarse para el diseño y dimensionamiento de secadores solares para el secado de soya en climas cálidos-húmedos.

- El estudio de colorimetría mostró que el secador que mejor conservó el color fue el secador solar de gabinete con convección natural al presentar el valor más bajo de  $\Delta E$ , mayores temperaturas y reducción de humedad.

Los resultados de este trabajo muestran que en los secadores se obtuvo un producto deshidratado en el que se garantiza la nula proliferación de microorganismos patógenos además de una humedad final y actividad del agua apropiada para su comercialización, por lo tanto, es factible el secado solar, específicamente utilizando convección natural puesto que se obtuvieron mejores resultados en la cinética de secado y la colorimetría, contribuyendo de esta forma a un ahorro energético importante; esta tecnología permitiría a los productores agrícolas reducir costos mientras contribuyen a la mejora del medio ambiente.

## Referencias

- Abano, E. E., Haile, M. A., Owusu, J., & Engmann, F. N. (2013). Microwave-vacuum drying effect on drying kinetics, lycopene and ascorbic acid content of tomato slices. *Journal of Stored Products and Postharvest Research*, 4(1), 11–22. <https://doi.org/10.5897/jsppr12.030>
- Akpinar, E., Midilli, A., & Bicer, Y. (2003). Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. *Energy Conversion and Management*, 44(10), 1689–1705. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00171-1](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00171-1)
- Akpinar, Ek. (2006). Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun

- of some aromatic plants. *Journal Food Engineering*, 77(4), 864–870.
- Babalís, S. J., Papanicolaou, E., Kyriakis, N., & Belessiotis, V. G. (2006). Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). *Journal of Food Engineering*, 75(2), 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.008>
- Bennamoun, L. (2012). An Overview on Application of Exergy and Energy for Determination of Solar Drying Efficiency. *International Journal of Energy Engineering*, 2(5), 184–194. <https://doi.org/10.5923/j.ijee.20120205.01>
- Bergues-Ricardo, C. C., & Díaz-López, J. R. (2015). Diagramas de tendencia para la generalización sostenible de secadores solares directos de productos agropecuarios. *Tecnología-a Química*, 34(2), 143–151. <https://doi.org/10.1590/2224-6185.2014.2>
- Castillo, B. M. A., Castillo-téllez, B., Téllez, M. C., Domínguez-niño, A., Cesar, E., Vidaña, L., Profesional, U., Biotecnología, I. De, Nacional, I. P., Universitario, C., & Guadalajara, U. De. (2020). Efecto de la utilización de secado directo y mixto en las cinéticas y colorimetría del Edamame. *Congreso Nacional de Secado y Cocción Solar de Alimentos*.
- Castillo Téllez, M., Castillo Téllez, B., & Ovando Sierra, J. C. (2016). Estudio de la deshidratación de las hojas de stevia (*Rabaudiana Bertoni*) bajo condiciones controladas y con un secador solar de tipo gabinete. *Vi Congreso Iberoamericano de Las Ciencias y Técnicas Del Frío. Coimbra, Portugal*.
- Castillo Téllez, M., Castillo Téllez, B., Sarracino Martínez, O., Hernández Gálgez, G., & Ovando Sierra, J. C. (2018). *Estudio experimental y matemático de la deshidratación de maíz con tecnologías directas y horno a temperaturas controladas*. <https://doi.org/10.19136/jeeos.a2n1.2693>
- Chan González, J. de J., Castillo Téllez, M., Castillo Téllez, B., Lezama Zárraga, F., Mejía Pérez, G. A., & Vega Gómez, C. J. (2021). Improvements and evaluation on bitter orange leaves (*Citrus aurantium l.*) solar drying in humid climates. *Sustainability (Switzerland)*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/su13169393>
- Chandra, P. K., & Singh, R. P. (1984). *Thin-layer Drying of Parboiled. 1*.
- Cihan, A., Kahveci, K., & Hacıhafizoğlu, O. (2007). Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 293–298. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.057>
- CONAGUA. (2020, April 14). *Información Estadística Climatológica*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Cortez, C. (2014). *Estudio de un secador solar indirecto por convección natural para el deshidratado de frutas y vegetales en Nicaragua*. UNIVERSIDAD NACIONAL

AUTÓNOMA DE NICARAGUA, LEÓN.

- Darvishi, H. (2017). Quality, performance analysis, mass transfer parameters and modeling of drying kinetics of soybean. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 34(1), 143–158. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20170341s20150509>
- Darvishi, H., Khoshtaghaza, M. H., & Minaei, S. (2014). Fluidized bed drying characteristics of soybeans. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 16(5), 1017–1031.
- Guiné, R. P. F. (2005a). Drying kinetics of some varieties of pears produced in Portugal. *Food and Bioproducts Processing*, 83(4 C), 273–276. <https://doi.org/10.1205/fbp.04222>
- Guiné, R. P. F. (2005b). *Variation of density and porosity during drying of pears and pear halves. July.*
- INIFAP. (2017). *Agenda Técnica Agrícola CAMPECHE.*
- Kalagirou, S. (2014). Solar Energy Engineering. Processes and Systems. In *Handbook of Energy Systems in Green Buildings* (Second). Elsevier. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-49120-1\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-662-49120-1_32)
- Karim, M. A., & Hawlader, M. N. A. (2005). Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(23–24), 4914–4925. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.04.035>
- Lewis, W. K. (1921). The Rate of Drying of Solid Materials. *Industrial and Engineering Chemistry*, 13(5), 427–432. <https://doi.org/10.1021/ie50137a021>
- Lingayat, A., Chandramohan, V. P., & Raju, V. R. K. (2019). Energy and Exergy Analysis on Drying of Banana Using Indirect Type Natural Convection Solar Dryer. *Heat Transfer Engineering*, 41(6–7), 551–561. <https://doi.org/10.1080/01457632.2018.1546804>
- Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20(7), 1503–1513. <https://doi.org/10.1081/DRT-120005864>
- Page, G. E. (1949). *Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin Layers.* Purdue University.
- Park, H. W., Han, W. Y., & Yoon, W. B. (2018). Drying Characteristics of Soybean (Glycine Max) Using Continuous Drying and Intermittent Drying. *International Journal of Food Engineering*, 14(9–10). <https://doi.org/10.1515/ijfe-2018-0057>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019a). *¿Qué es la poscosecha y por qué es*

*importante?* <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/que-es-la-poscosecha-y-porque-es-importante>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019b). *Reporte del mercado de soya*. 1–6.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2021). *Producción mensual agrícola*. [https://Nube.Siap.Gob.Mx/Avance\\_agricola/](https://Nube.Siap.Gob.Mx/Avance_agricola/).  
[https://nube.siap.gob.mx/avance\\_agricola/](https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/)

Sitesh, K. P., Subodh, D., & Richa, S. (2015). Review of Mathematical Modelling of Thin Layer Drying Process. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CURRENT ENGINEERING AND SCIENTIFIC RESEARCH (IJCESR) O*, 2(11), 96–107.

Toğrul, I. T., & Pehlivan, D. (2004). Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, 65(3), 413–425.  
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.02.001>

Vijayan, S., Arjunan, T. V., & Kumar, A. (2016). Mathematical modeling and performance analysis of thin layer drying of bitter melon in sensible storage based indirect solar dryer. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 36, 59–67.  
<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.05.014>

Yaldyz, O., & Ertekyn, C. (2001). Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology*, 19(3–4), 583–597. <https://doi.org/10.1081/DRT-100103936>