

Cinéticas y Modelado Del Secado De Grillo Mexicano (*Acheta Domesticus*) en una Planta Híbrida Solar-LP

Jesús Aguila-Leon¹, Beatriz Castillo-Téllez^{1*}, Francisco Martínez-Sarabia², Gerardo A. Mejía Pérez¹, Carlos J. Vega Gómez³, Alfredo Domínguez Niño⁵ y Margarita Castillo Téllez⁴

¹ Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, Tonalá, Jalisco, México

² Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente ITESO, Zapopan, Jalisco, México

³ Centro Universitario Tlajomulco, Universidad de Guadalajara, Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México

⁴ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, Campeche.

⁵ Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México.

* Autor de correspondencia: Beatriz Castillo Téllez: beatriz.castillo@academicos.udg.mx

Desarrollo Sustentable (Desarrollo de procesos sustentables). **Ponencia Virtual.**

Recibido: 24 de agosto de 2023

Aceptado: 16 de octubre de 2023

Publicado: 23 de noviembre de 2023

Resumen. La industria de la ganadería es, actualmente, unas de las fuentes principales de proteína para el consumo humano, a través de los productos cárnicos, la leche y sus derivados. Sin embargo, el medio ambiente está siendo drásticamente afectado por esta industria, siendo responsable de un 14.5% de las emisiones globales de gases de invernadero, trayendo consigo graves consecuencias. Bajo este contexto, se han considerado alternativas al consumo de carne. Este trabajo presenta la cinética de deshidratación de 380 kg grillo común mexicano (*Acheta Domesticus*) en una planta híbrida Solar-gas LP localizada en Zacatecas, México, el cual consiste en 48 colectores solares planos para calentamiento de aire, un sistema de almacenamiento de energía térmica de 6,000 L, y un quemador de gas LP como respaldo para horas sin sol. Los datos experimentales obtenidos se ajustaron a nueve modelos matemáticos preexistentes. Adicionalmente se calculó la difusividad efectiva de humedad, así como la energía de activación. Se concluyó que el modelo Wang and Sing con un R^2 de 0.9992 es el que se ajusta mejor a las cinéticas del secado de grillo. Los coeficientes de difusión se encuentran entre 2.73 y $5.14 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y la energía de activación fue de 55.43 kJ/gmol. Se obtuvieron 78 kg de grillo deshidratado en un tiempo de aproximadamente 500 minutos con una velocidad máxima de secado de 0.0080 g H₂O g ss min con contenido final de humedad de 1.5 g H₂O g ss. Los resultados muestran que es factible utilizar procesos híbridos basados en energía solar y gas LP para la obtención de deshidratado de insectos. Además, las curvas de la cinética de deshidratado, así como el modelado realizado servirán para futuros estudios sobre el comportamiento del deshidratado de insectos para la obtención de productos alimenticios como alternativa a la carne de res, leche y sus derivados como fuentes de proteína. Se demostró la factibilidad de producir un producto rico en proteínas en una planta de deshidratado solar, lo cual ayuda a reducir las emisiones de metano al ambiente.

Palabras clave: Secado solar, modelado matemático, proteína alternativa, cinéticas de secado, energía solar

Kinetics and Modeling of the Drying Mexican Cricket (*Acheta Domesticus*) in a Solar-LP Hybrid Plant

Abstract. The livestock industry is currently one of the primary protein sources for human consumption through meat products, milk, and its derivatives. However, this industry drastically affects the environment, responsible for 14.5% of global greenhouse gas emissions, bringing severe consequences. In this context, alternative protein sources consumption has been considered. This work presents the dehydration kinetics of 380 kg Mexican common cricket (*Acheta Domesticus*). The process was carried out in a hybrid Solar-LP gas plant located in Zacatecas, Mexico, which consists of 48 flat solar collectors for air heating, a 6,000 L thermal energy storage system, and an LP gas burner. as a backup for hours without sun. The experimental data obtained were fitted to nine pre-existing mathematical models. Additionally, the effective moisture diffusivity was calculated, as well as the activation energy. It was concluded that the Wang and Sing model with an R^2 of 0.9992 is the one that best fits the kinetics of cricket drying. The diffusion coefficients are between 2.73 and $5.14 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, and the activation energy was 55.43 kJ/gmol. 78 kg of dehydrated cricket were obtained in approximately 500 minutes with a maximum drying speed of 0.0080 g H₂O g ss min with a final moisture content of 1.5 g H₂O g ss. The results show that it is feasible to use hybrid processes based on solar energy and LP gas to obtain dehydrated insects. Furthermore, the dehydration kinetic curves obtained will be used for future studies on the behavior of insect dehydration to obtain food products as an alternative to beef, milk, and their derivatives as sources of protein.

Keywords: Solar drying, mathematical modeling, alternative protein, drying kinetics, solar energy

Introducción

Se estima que para el año 2050 la población mundial alcanzará los 9.8 millones de personas (Stone et al., 2019) lo cual plantea un grave problema de alimentación, pues ha de asegurarse el suministro de alimentos en cantidad y calidad. La industria alimenticia actual requiere de grandes cantidades de agua y energía (Compton et al., 2018) una de las alternativas a esta problemática es la incorporación de insectos a la dieta, es decir, la entomofagia (Barton et al., 2020). Los insectos son una excelente fuente de nutrientes y proteínas, siendo los grillos y chapulines de las especies con mejor contenido proteínico, 61.32 g/100 g de proteína por cantidad de materia deshidratada (Melgar-Lalanne et al., 2019). La elaboración de harinas a partir de insectos es una alternativa para su consumo (Hartmann & Siegrist, 2018). Para la producción de harinas la materia prima primero ha de deshidratarse, para ello existen diversas técnicas, como el secado en horno (Fombong et al., 2017), el liofilizado y el deshidratado por microondas (Vandeweyer et al., 2017), sin embargo, el empleo de energías renovables (Ortiz-Rodríguez et al., 2020) es una alternativa para mitigar posibles efectos adversos al medio ambiente. El secado solar has sido empleado para la conservación de alimentos desde tiempos muy remotos, sin embargo hace algunas decenas de años se han desarrollado y mejorado equipos solares que eficientizan y conservan de mejor las propiedades de los alimentos (Chan-González et al., 2021). Sin embargo, estos equipos son generalmente de poca capacidad y no han podido remplazar los grandes consumos de gas y otros combustibles fósiles que utilizan las grandes plantas deshidratadoras.

Parte importante del estudio del proceso de deshidratado es la determinación de la cinética de secado, para la creación y ajuste a modelos matemáticos que permitan estimar la cantidad de energía requerida para el proceso (Castro et al., 2018). En (Tzempelikos et al., 2015) se ha conducido un estudio evaluar los modelos de capa delgada de deshidratado en el membrillo rebanadas, mientras que en (Lakshmi et al., 2018) se han hecho sobre las cinéticas de deshidratado en secadores de convección forzada para la cúrcuma negra y en (Domínguez-Niño et al., 2020) sobre el deshidratado de pechuga de pollo. Pese a existir un amplio repertorio de estudios sobre las propiedades nutritivas de las harinas de grillos y otros insectos (Montowska et al., 2019) poca investigación se ha llevado a cabo sobre deshidratado para insectos, especialmente para el grillo común *Acheta Domesticus*, el cual debido a su alto contenido de proteína es de gran interés para la industria alimenticia (Osimani et al., 2018).

En este trabajo se presenta el deshidratado de *Acheta Domesticus* en una planta de deshidratado híbrido Solar- gas LP en el estado de Zacatecas con capacidad de hasta 4 toneladas de producto proporcionando información sobre las cinética de secado y el contenido de humedad del producto obtenidas como resultado y su ajuste a modelos matemáticos que proporcionan información sobre diseños futuros de secadores de acuerdo con necesidades de volumen. Se propone la deshidratación de grillo mexicano como fuente de proteína, sustituyendo el consumo excesivo de carne en una planta deshidratadora híbrida con consumo principal de energía solar. Este proceso puede alentar a industriales a proporcionar soluciones sustentables.

Materiales y Métodos

En la Figura 1 se presenta un diagrama de flujo de la metodología realizada:

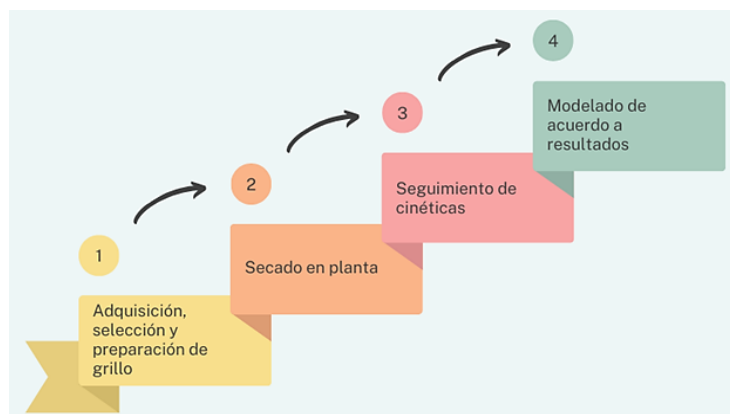


Figura 1 Diagrama de Flujo de la Metodología.

Materia prima. La materia prima disponible consiste en 380 kg de *Acheta Domesticus*, provistos desde Guadalajara, previamente congelados para su conservación y transporte, distribuidos en un total de 20 bolsas para su traslado hacia las instalaciones de la planta de deshidratado, ubicado en la ciudad de Zacatecas, México.

Proceso de deshidratado. La planta cuenta con un sistema de secado solar híbrido de convección forzada que consiste en una cámara de secado, dos sistemas de captación solar para el calentamiento directo e indirecto del aire, y un sistema convencional de secado a base de gas LP. El proceso de secado se realizó operando inicialmente el sistema de calentamiento de directo que cuenta con 48 calentadores solares de aire. Una vez que el recurso solar no estuvo disponible se encendió el respaldo de energía convencional. La cámara de secado y su interior se muestran en la Figura 2.

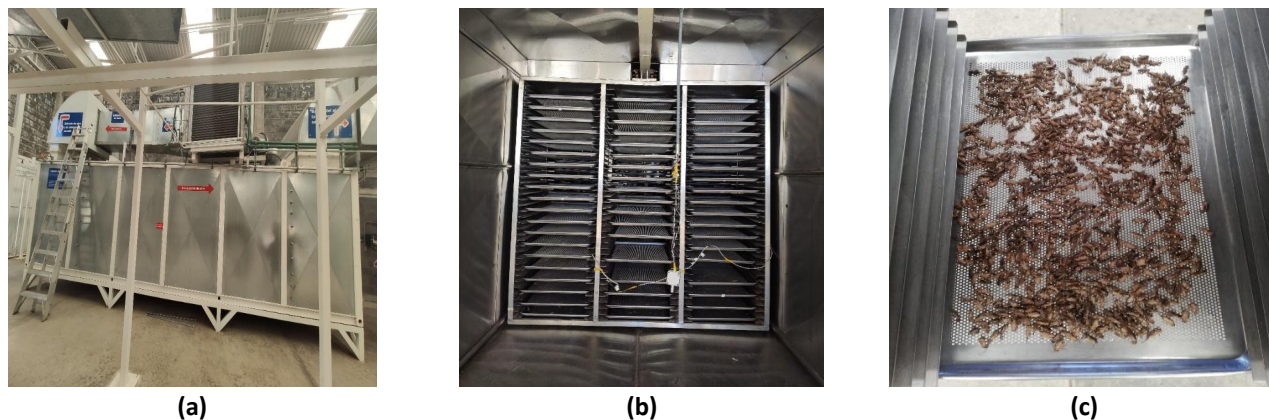


Figura 2 Vista de la planta de deshidratado. (a) Sistema de deshidratado de alimentos con gas LP, (b) interior de la cámara de deshidratado y (c) *Acheta Domesticus* colocados en una charola para su deshidratación.

Los grillos se distribuyen en 80 charolas de 45 x 65 cm en ocho rieles, cada uno con diez charolas intercaladas. Se tuvo cuidado de colocar las charolas de modo que el aire caliente fluyera adecuadamente en el interior de la cámara de secado para asegurar la efectividad del proceso. El calefactor a gas LP se utilizó solamente para lograr una temperatura base inicial de 53 °C para alcanzar el contenido de humedad seguro (alrededor del 20% b.h.) que evite la formación de hongos. Sin embargo, el contenido de humedad deseado es menor al 10% para la producción de la proteína en polvo. Por lo tanto, el segundo día de uso nuevamente el sistema de calentamiento dólar directo para llegar a la humedad deseada.

Obtención de datos. La medición de peso y humedad se realizó cada hora, tomando una muestra aleatoria de las charolas centrales de la cámara de secado. El equipo utilizado para la medición de estos parámetros se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 Instrumentos utilizados para medición de parámetros

| Parámetro medido | Marca | Precisión |
|------------------|-------------------|-------------|
| Humedad | Sartorius MA 45 | ± 0.01% mg. |
| Peso | Ohaus balance | ± 0.001 g |
| Temperatura | Termopares tipo K | ± 0.05 °C. |

Modelado. Se aplicaron nueve modelos matemáticos de secado semiempíricos conocidos que expresan la relación entre la relación de humedad (MR) y el tiempo de secado, t , como se presenta en la Tabla 2, a las curvas de secado obtenidas para las cinéticas de secado. El radio de humedad MR está en función del tiempo de secado y es calculado como en (Toğrul & Pehlivan, 2004):

$$MR = \frac{M_c - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

Donde M_c es el contenido de humedad, M_e es la humedad de equilibrio, y M_o es la humedad inicial. Para la difusión de la humedad durante el proceso de secado, se puede describir mediante la ecuación de difusión de Fick:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{eff} \left(\frac{\partial M}{\partial x} \right) \right) \quad (2)$$

donde D_{eff} ($m^2 s^{-1}$) es la difusividad efectiva y M es el contenido de humedad local (kg agua/kg materia seca). Suponiendo que: (i) la transferencia de masa ocurre en una losa infinita con condiciones de contorno simétricas; (ii) la transferencia de masa está controlada por mecanismos internos; (iii) la difusividad efectiva es constante durante el proceso; (iv) la transferencia de masa se produce en un medio homogéneo. La difusividad efectiva se puede expresar en forma logarítmica con la ecuación lineal (Crank, 1975):

$$\ln(MR) = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{-\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t \quad (3)$$

L es la mitad del mayor espesor del cuerpo del grillo (m), t es el tiempo de secado (s). La dependencia de la difusividad con la temperatura se evaluó mediante la relación de Arrhenius (Ozdemir & Devres, 2000). D_{eff} se puede determinar utilizando la pendiente obtenida de la gráfica experimental de $\ln(MR)$ versus el tiempo de secado y la pendiente de la ecuación (4) (Velić et al., 2004).

$$D = D_0 \exp(-E_a/RT) \quad (4)$$

Donde D_0 es el factor preexponencial de la ecuación de Arrhenius ($m^2 s^{-1}$), E_a es la energía de activación ($J mol^{-1}$), R es la constante de los gases ($8.314 J mol^{-1} K^{-1}$) y T es la Temperatura del aire de secado (K). La energía de activación se puede determinar a partir de la pendiente obtenida de la gráfica experimental de $\ln(D_{eff})$ y la inversa de la temperatura de secado, y la pendiente de la ecuación 6 (Sanjuán et al., 2003).

$$m = \frac{E_a}{R} \quad (5)$$

Tabla 2 Modelos de capa delgada basados en el radio de humedad aplicados a las cinéticas de secado.

| Nombre del Modelo | Modelo | Referencia |
|----------------------|---|------------------------------------|
| Newton | $MR = \exp(-kt)$ | (Liu & Bakker-Arkema, 1997) |
| Page | $MR = \exp(-kt^n)$ | (Page, 1949) |
| Modified Page | $MR = \exp(-(kt)^n)$ | (White et al., 1981) |
| Henderson and Pabis | $MR = a \exp(-kt)$ | (Henderson & Pabis, 1961) |
| Logarithmic | $MR = a \exp(-kt) + c$ | (Toğrul, 2005) |
| Two-term | $MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$ | (Henderson, 1974)[26] |
| Two-term exponential | $MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$ | (Y. I. Sharaf-Eldeen et al., 1980) |
| Wang and Singh | $MR = 1 + at + bt^2$ | (Wang & Singh, 1978) |
| Weibull | $MR = \exp\left(-\frac{t}{\beta}\right)^\alpha$ | (Akpınar & Bicer, 2007) |

Para modelar el secado de alimentos se requieren de métodos estadísticos de regresión y análisis de correlación. El análisis estadístico fue realizado mediante el software DataFit 9.1 de Oakdale Engineering. Se utilizó el coeficiente de determinación (R^2) como criterio primario para seleccionar el modelo de mejor ajuste a los datos experimentales. Adicionalmente, se calculó la chi-cuadrada reducida, χ^2 (cuadrado medio de las desviaciones) y el análisis del error cuadrático medio, RMSE (diferencia entre datos experimentales y proyectados). El mejor ajuste de los datos es aquel que tiene el mayor R^2 y el menor χ^2 y RMSE (Liu & Bakker-Arkema, 1997).

Resultados y Discusión

La irradiancia solar durante los días de experimentación tuvo un valor mínimo de 251.15 y máximo de 1033.4 W/m², con temperaturas máximas de 28 °C y humedad relativa entre 4.17 % y 8.35 %, siendo valores típicos para el mes de abril en la ubicación de la planta de secado. La temperatura dentro de la cámara de secado estuvo en los rangos de (43.11°C - 76.15°C). La Figura 3 muestra el comportamiento de la temperatura en la cámara de secado en comparación con la temperatura ambiente y la irradiación global medida a lo largo del proceso durante los días 14 y 15 de abril de 2023. De las 11:00 h a las 19:00 h el 14 de abril se utilizó solamente energía solar térmica. Entre las 20:45 h del 14 de abril y las 03:45 h del 15 de abril se empleó gas LP, y finalmente de las 10:00 h a las 15:00 h se utilizó solamente energía solar térmica. El grillo empleado para las pruebas se encontraba inicialmente congelado, con una humedad inicial del 58%.

Determinación de las cinéticas de secado. La Figura 4 representa el contenido de humedad en función del tiempo de secado. El contenido de humedad disminuye con el tiempo de secado debido al efecto de la temperatura y el cambio de fase de agua dentro de la matriz alimenticia. Puede observarse que la temperatura de equilibrio se alcanza alrededor de los 480 minutos reduciendo su humedad desde 1.4 g H₂O/ g ss hasta 0.32 g H₂O/ g ss, lo cual puede asegurar que las condiciones de inocuidad se conservarán, eliminando la posibilidad de reproducción de microorganismos.

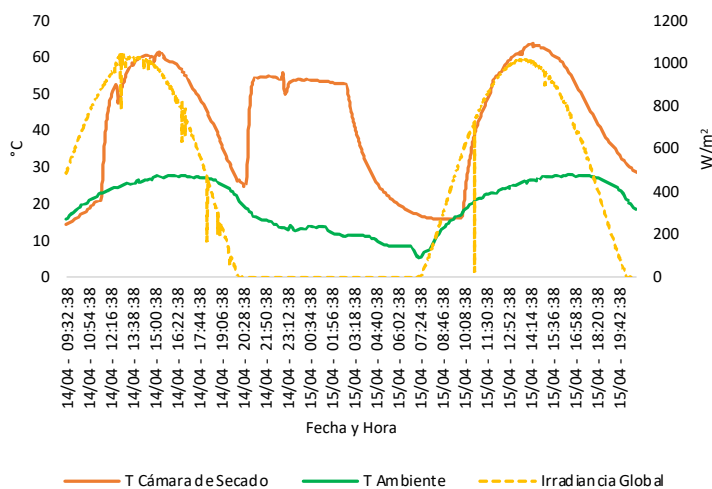


Figura 3 Curva de temperatura en el interior de la cámara de secado en comparación con temperatura ambiente e irradiación global en el sitio de los días 14 y 15 de abril de 2023.

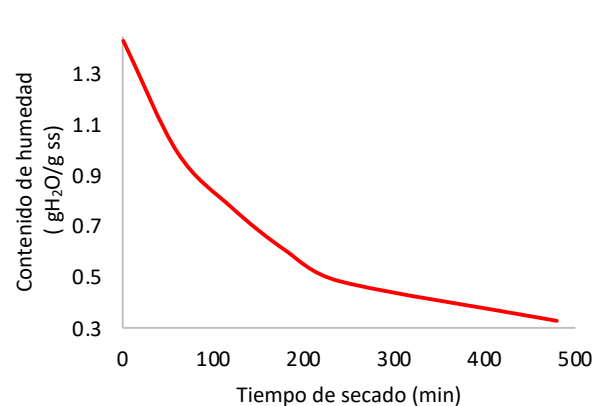


Figura 4 Contenido de humedad durante el secado

La velocidad de secado puede analizarse en la Figura 5, donde se observa un decremento desde .0074 g H₂O/ g ss min hasta 0.0007 g H₂O/g ss min. Durante toda la cinética, no se observan periodos de velocidad constante. Debido a los procesos de difusión de la humedad, las velocidades de secado decrecen con el tiempo. Puede observarse que las velocidades disminuyen y luego incrementan nuevamente, esto puede deberse a que el agua ligada empieza a ser más difícil de extraerse y a la disminución de calor dentro de la cámara cuando el irradiancia disminuye. Estas condiciones determinan cuando hay que implementar el sistema con gas para concluir el secado del grillo con la calidad deseada.

Modelado de las cinéticas de secado. La Figura 6 muestra la comparación entre los datos experimentales y los predichos con los cinco modelos de capa delgada ajustados, de acuerdo con el R², X² y RMSE obtenidos.

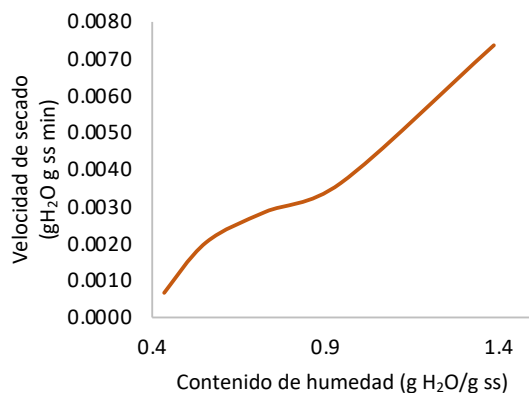


Figura 5 Velocidad de secado durante el secado del grillo

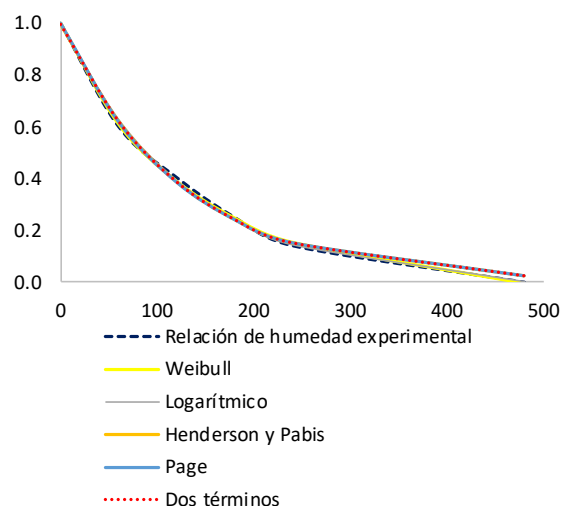


Figura 6 Ajuste de datos experimentales con modelos matemáticos de capa delgada.

Los parámetros obtenidos para cada modelo se concentran en la Tabla 3. Como puede observarse, todos los modelos tienen un alto nivel de ajuste, con un R^2 mayor a .99 y RMSE cercano a 0. Aun así, el modelo que representa de mejor manera el comportamiento del secado de grillo es el Wang y Sing, con un R^2 de 0.9992, X^2 0.0002 y RMSE de 0.0091. Esto es importante porque este modelo puede sustituir a la experimentación y estos datos pueden utilizarse para dimensionar y diseñar futuros secadores de acuerdo con las necesidades de producto.

Tabla 3 Coeficientes y parámetros estadísticos encontrados para cada modelo de ajuste.

| | Wang and Sing | Logarítmico | Henderson y Pabis | Dos términos | Page |
|-------|---------------|-------------|-------------------|--------------|--------|
| a | -0.0539 | 1.0171 | 0.9957 | 0.4978 | - |
| b | -1.0528 | - | - | 0.4978 | - |
| c | - | -0.0251 | - | 0.4734 | - |
| d | - | - | - | 0.4734 | - |
| k | 0.4606 | 0.4471 | 0.4734 | - | 0.4803 |
| n | 0.9076 | - | - | - | 0.9881 |
| R^2 | 0.9992 | 0.9985 | 0.9978 | 0.9979 | 0.9992 |
| RMSE | 0.0091 | 0.0126 | 0.0153 | 0.0153 | 0.0153 |
| X^2 | 0.0002 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0007 | 0.0004 |

Coeficiente de difusividad efectiva y energía de activación.

La difusividad efectiva se calculó utilizando la curva de tiempo de secado versus $\ln(MR)$.

Los valores de D_{eff} aumentan al aumentar la temperatura, variando dentro de un rango de 3.526×10^{-11} a $2.833 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Los valores de D_{eff} obtenidos en este estudio están dentro del rango general de 10^{-13} a $10^{-87} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para productos alimenticios secos (Bonazzi & Bimbenet, 2003; Zhu & Shen, 2014). Estos son los valores que la humedad se difunde por la influencia de un gradiente de unidad. La difusividad efectiva se relacionó con la temperatura mediante la ecuación de Arrhenius y, a partir de la pendiente de la línea obtenida se calculó la energía de activación obteniendo un valor de 55.43 kJ/gmol.

Conclusiones

En este trabajo se presentó el proceso de deshidratado de grillo común empleando una planta de deshidratado híbrida solar-LP localizada en el Estado de Zacatecas, México, que representan una solución para el problema de desperdicio por falta de tecnologías de conservación. Se analizaron las cinéticas de secado llegando a la humedad de equilibrio en 8 horas, obteniendo 78 kg de producto. Los datos experimentales se ajustaron a 9 modelos de capa delgada, siendo el Wang y Sing el que presenta mejor ajuste con un R^2 de 0.9992. Este modelo puede utilizarse para predecir cinéticas similares de grillo, diseñar y dimensionar secadores para su secado. La difusividad efectiva más alta fue de $2.833 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y la energía de activación fue de 55.43 kJ/gmol. El proceso de deshidratado híbrido resultó ser efectivo, siendo una opción deshidratar el grillo común *Acheta Domesticus* para futuras aplicaciones en la industria alimenticia, especialmente para la obtención de proteína sustituyendo al consumo cárnico, una de las grandes fuentes de emisiones de metano en el mundo. El modelado de estas cinéticas puede ayudar a los productores a diseñar y dimensionar secadores de acuerdo a sus necesidades bajo estas condiciones de secado.

Bibliografía

- Akpinar, E. K., & Bicer, Y. (2007). Modelling of thin layer drying kinetics of sour cherry in a solar dryer and under open Sun. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 66(9), 764–771. <https://doi.org/10.1016/j.ifofoodeng.2005.04.018>
- Barton, A., Richardson, C. D., & McSweeney, M. B. (2020). Consumer attitudes toward entomophagy before and after evaluating cricket (*Acheta Domesticus*)-based protein powders. *Journal of Food Science*, 85(3), 781–788. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1750-3841.15043>
- Bonazzi, C., & Bimbenet, J.-J. (2003). Séchage des produits alimentaires - Principes. *Techniques de L'ingénieur*.
- Castro, A. M., Mayorga, E. Y., & Moreno, F. L. (2018). Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. *Journal of Food Engineering*, 223, 152–167. <https://doi.org/10.1016/j.ifofoodeng.2017.12.012>
- Chan-González, J. de J., Castillo Téllez, M., Castillo-Téllez, B., 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)*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su13169393>
- Compton, M., Willis, S., Rezaie, B., & Humes, K. (2018). Food processing industry energy and water consumption in the Pacific northwest. In *Innovative Food Science and Emerging Technologies* (Vol. 47, pp. 371–383). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.04.001>
- Crank, J. (1975). The mathematics of diffusion. *Brunel University Uxbridge*, 4, 205–206. [https://doi.org/10.1016/0306-4549\(77\)90072-X](https://doi.org/10.1016/0306-4549(77)90072-X)
- Domínguez-Niño, A., Pilatowsky Figueroa, I., López-, E. C., Castillo-Téllez, B., Lucho-Gómez, A. M., & García-Valladares, O. (2020). Experimental study of the dehydration kinetics of chicken breast meat and its influence on the physicochemical properties. *CyTA - Journal of Food*, 18(1), 508–517. <https://doi.org/10.1080/19476337.2020.1791961>
- Fombong, F. T., Van Der Borgh, M., & Broeck, J. Vanden. (2017). Influence of freeze-drying and oven-drying post blanching on the nutrient composition of the edible insect *Ruspolia differens*. *Insects*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/insects8030102>
- Hartmann, C., & Siegrist, M. (2018). Development and validation of the Food Disgust Scale. *Food Quality and Preference*, 63, 38–50. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2017.07.013>
- Henderson, S. M. (1974). Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 17(6).
- Henderson, S. M., & Pabis, S. (1961). Grain drying theory II: Temperature effects on drying coefficients. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6(3), 169–174.
- Lakshmi, D. V. N., Muthukumar, P., Layek, A., & Nayak, P. K. (2018). Drying kinetics and quality analysis of black turmeric (*Curcuma caesia*) drying in a mixed mode forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage. *Renewable Energy*, 120, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.053>
- Liu, Q., & Bakker-Arkema, F. W. (1997). Stochastic modelling of grain drying: Part 2. Model development. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 66(4), 275–280. <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0145>
- Melgar-Lalanne, G., Hernández-Álvarez, A.-J., & Salinas-Castro, A. (2019). Edible Insects Processing: Traditional and Innovative Technologies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(4), 1166–1191. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1541-4337.12463>
- Montowska, M., Kowalczewski, P. Ł., Rybicka, I., & Fornal, E. (2019). Nutritional value, protein and peptide composition of edible cricket powders. *Food Chemistry*, 289, 130–138. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.062>
- Ortiz-Rodríguez, N. M., García-Valladares, O., Pilatowsky-Figueroa, I., & Menchaca-Valdez, A. C. (2020). Solar-LP gas hybrid plant for dehydration of food. *Applied Thermal Engineering*, 177, 115496. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115496>
- Osimani, A., Milanović, V., Cardinali, F., Roncolini, A., Garofalo, C., Clementi, F., Pasquini, M., Mozzon, M., Foligni, R., Raffaelli, N., Zamporlini, F., & Aquilanti, L. (2018). Bread enriched with cricket powder (*Acheta Domesticus*): A technological, microbiological and nutritional evaluation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 48, 150–163. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.06.007>
- Ozdemir, M., & Devres, Y. O. (2000). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Food Science and Technology Research*, 42(1999), 225–233.
- Page, G. E. (1949). *Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers*. M. S. Thesis. Purdue University, West Lafayette, IN, USA.
- Sanjuán, N., Lozano, M., García-Pascual, P., & Mulet, A. (2003). Dehydration kinetics of red pepper (*Capsicum annum* L var Jaranda). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83(7), 697–701. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1334>

- Stone, A. K., Tanaka, T., & Nickerson, M. T. (2019). Protein quality and physicochemical properties of commercial cricket and mealworm powders. *Journal of Food Science and Technology*, 56, 3355–3363. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:189773089>
- Toğrul, H. (2005). Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices. *Journal of Food Engineering*, 71(3), 311–323. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.03.031>
- 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>
- Tzempelikos, D. A., Vouros, A. P., Bardakas, A. V., Filios, A. E., & Margaritis, D. P. (2015). Experimental study on convective drying of quince slices and evaluation of thin-layer drying models. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 8(3), 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2014.12.002>
- Vandeweyer, D., Lenaerts, S., Callens, A., & Van Campenhout, L. (2017). Effect of blanching followed by refrigerated storage or industrial microwave drying on the microbial load of yellow mealworm larvae (*Tenebrio molitor*). *Food Control*, 71, 311–314. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.07.011>
- Velić, D., Planinić, M., Tomas, S., & Bilić, M. (2004). Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of Food Engineering*, 64(1), 97–102. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.09.016>
- Wang, C. Y., & Singh, R. P. (1978). A single layer drying equation for rough rice. *American Society of Agricultural Engineers*, 78, 3001. <https://doi.org/10.1081/E-EEE2-120046011>
- White, G. M., Ross, I. J., & Poneleit, C. G. (1981). Fully-exposed drying of popcorn. *European Physical Education Review*, 24(2), 466-468,475. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1108/17506200710779521>
- Y. I. Sharaf-Eldeen, J. L. Blaisdell, & M. Y. Hamdy. (1980). A Model for Ear Corn Drying. *Transactions of the ASAE*, 23(5), 1261–1265. <https://doi.org/10.13031/2013.34757>
- Zhu, A., & Shen, X. (2014). The model and mass transfer characteristics of convection drying of peach slices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72, 345–351. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.001>