

Capítulo 5

Transformación sostenible de alimentos: El secado solar como estrategia para una economía circular

*Berenice Recio Colmenares*¹

*Carolina Livier Recio Colmenares*²

*César Alejandro García García*³

<https://doi.org/10.61728/AE20251659>



¹ Doctora en Agua y energía; Departamento de Ciencias Básicas, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara; México.

² Doctora en Agua y energía; Departamento de Ciencias Básicas, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara; México.

³ Doctor en Tecnologías de la información; Departamento de Ciencias de la Información y Desarrollos Tecnológicos, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara; México.

Resumen

Este capítulo examina el secado solar como una tecnología sostenible para la conservación de alimentos, utilizando como caso de estudio la deshidratación del tomate verde (*Physalis ixocarpa* Brot). Se analizó la viabilidad técnica y económica de diferentes tipos de secadores solares —de convección natural, forzada y con condiciones controladas—, evaluando su impacto en la eficiencia del proceso y en la calidad del producto final. Mediante el estudio de las cinéticas de secado, se desarrollaron modelos matemáticos que permiten optimizar los parámetros operacionales y mejorar el rendimiento del proceso.

El secado solar se presenta, además, como una estrategia coherente con los principios de la economía circular, al fomentar el aprovechamiento de excedentes agrícolas, reducir el desperdicio poscosecha y promover el uso de energías limpias. Su implementación contribuye al cumplimiento de diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), entre ellos: Hambre Cero (ODS 2), Energía Asequible y No Contaminante (ODS 7), Producción y Consumo Responsables (ODS 12) y Acción por el Clima (ODS 13).

Los resultados del estudio ofrecen una alternativa viable y rentable para la agroindustria mexicana, al proporcionar una tecnología accesible que reduce costos operativos y agrega valor a productos subutilizados. Su adopción no solo mejora la seguridad alimentaria y las condiciones de vida en comunidades rurales, sino que también refuerza la resiliencia del sector agroalimentario frente a los desafíos del cambio climático.

Introducción

El secado solar, una técnica ancestral de conservación, ha resurgido como una solución eficiente y sostenible frente a los desafíos actuales de la industria agroalimentaria. Al utilizar energía solar para reducir el

contenido de humedad de los alimentos, esta tecnología permite extender su vida útil sin comprometer sus propiedades nutricionales o sensoriales, reduciendo además la dependencia de fuentes energéticas convencionales.

En un contexto global marcado por el aumento del desperdicio alimentario y la necesidad de avanzar hacia modelos productivos más sostenibles, el secado solar se posiciona como una estrategia clave dentro de la economía circular. Su implementación no solo contribuye a reducir las pérdidas poscosecha, sino que promueve el aprovechamiento integral de los recursos, disminuye la huella de carbono y favorece la autosuficiencia energética en comunidades rurales.

La industria agroalimentaria, uno de los sectores con mayor consumo energético, enfrenta importantes retos asociados a la falta de tecnologías de conservación adecuadas. La deshidratación, en este sentido, se configura como una alternativa viable para preservar alimentos, facilitando su almacenamiento y transporte, al tiempo que garantiza su inocuidad y calidad (Deepak y Behura, 2023).

Desde una perspectiva alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), el secado solar aporta a metas fundamentales como Hambre Cero (ODS 2), Energía Asequible y No Contaminante (ODS 7), Producción y Consumo Responsables (ODS 12) y Acción por el Clima (ODS 13). Al aprovechar recursos naturales renovables y fortalecer economías locales, esta tecnología promueve la generación de empleo digno, la reducción de la pobreza energética y la resiliencia frente al cambio climático (Parvathy y Kumar, 2023).

Los avances recientes en sistemas pasivos y activos han mejorado significativamente la eficiencia del secado solar, permitiendo su adaptación a diversas condiciones climáticas y escalas de producción. Estas innovaciones, además de mejorar la calidad del producto final, han potenciado la competitividad de los productores rurales, abriéndose nuevas oportunidades en mercados nacionales e internacionales (Gilago et al., 2023).

En este capítulo se presenta un estudio de caso sobre la aplicación del secado solar en la conservación del tomate verde (*Physalis ixocarpa* Brot), un cultivo ampliamente consumido en México y de alta vulnerabilidad poscosecha. Se evaluaron distintos sistemas de secado (convección natural, forzada y controlada) desde una perspectiva técnica y económica,

considerando parámetros operacionales, calidad del producto, costos y beneficios. Los resultados obtenidos evidencian el potencial del secado solar para reducir pérdidas, mejorar la rentabilidad y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios rurales.

Fundamentos del proceso de secado y métodos de deshidratación de alimentos

El secado de alimentos mediante energía solar constituye un componente clave en la transición hacia sistemas alimentarios sostenibles, al integrar prácticas tradicionales con principios contemporáneos de la economía circular. Esta técnica aprovecha la radiación solar como fuente de energía renovable para reducir el contenido de humedad de los alimentos, inhibiendo la actividad microbiana y enzimática, y extendiendo su vida útil sin requerir aditivos químicos ni altos consumos energéticos.

A diferencia de los métodos industriales que utilizan combustibles fósiles o electricidad intensiva, el secado solar opera a temperaturas moderadas (generalmente entre 40 y 70 °C), lo cual permite conservar las propiedades nutricionales, funcionales y organolépticas de los productos tratados. Esta característica lo convierte en una alternativa respetuosa con el medio ambiente, con una huella de carbono considerablemente menor que otros procesos de conservación térmica (Gilago et al., 2023; Tamasiga et al., 2023).

Existen diversas modalidades de secado solar, desde sistemas pasivos, como los secadores de tipo invernadero, hasta equipos activos con ventilación forzada y control de temperatura. La elección del sistema depende de factores como el tipo de alimento, las condiciones climáticas locales, la escala de producción y los recursos disponibles. En todos los casos, la eficiencia del proceso está determinada por parámetros clave como la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del flujo de aire y el espesor del producto.

La deshidratación mediante energía solar no solo permite reducir pérdidas poscosecha, sino que también contribuye a la valorización de excedentes agrícolas y a la generación de ingresos en comunidades rurales. Su integración en cadenas de valor locales fortalece la seguridad

alimentaria, promueve el uso responsable de recursos y favorece la diversificación de productos agroindustriales bajo un enfoque sostenible.

Metodología

El presente estudio experimental se centró en la evaluación del proceso de secado solar aplicado al tomate verde (*Physalis ixocarpa* Brot.), seleccionando frutos con características homogéneas en cuanto a color, tamaño y grado de madurez. Previamente al proceso de deshidratación, los tomates fueron sometidos únicamente a procesos de limpieza, lavado y corte, sin aplicar pretratamientos químicos. Cada fruto fue rebanado en secciones de 4 ± 1 mm de espesor, con un diámetro aproximado de 6 ± 0.5 cm y un peso entre 15 y 20 ± 2 g. Las rebanadas fueron dispuestas de manera uniforme sobre las bandejas de secado, asegurando una cobertura homogénea de la superficie. Para el monitoreo de la pérdida de humedad, se tomaron cuatro muestras representativas por lote experimental.

Protocolo experimental general

El procedimiento seguido para todas las pruebas se estructuró en tres etapas fundamentales: primero, el registro del peso inicial de cada muestra mediante una balanza portátil Ohaus HH320 (capacidad máxima de 320 g, resolución de 0.1 g); segundo, la determinación del contenido de humedad y actividad de agua con un analizador de humedad Ohaus MB-45 (capacidad de 200 g, resolución de 0.001 g); y finalmente, el monitoreo de la pérdida de humedad a intervalos de 30 minutos, hasta alcanzar la condición de humedad de equilibrio. Cuando las tres últimas mediciones consecutivas no presentaban variaciones significativas, se dio por concluido el secado y se registró el contenido final de humedad.

El secador utilizado en las pruebas experimentales fue un secador solar tipo gabinete, mostrado en la Figura 1. Este secador operó tanto en modo activo como pasivo, proporcionando las condiciones necesarias para llevar a cabo las evaluaciones del proceso de deshidratación del tomate verde.

Figura 1. Secador solar tipo gabinete utilizado en el estudio experimental, operando en modos activo y pasivo para la deshidratación del tomate verde.



Fuente: Fotografía tomada por los autores.

Evaluación de secadores solares

Secador solar tipo gabinete (SSG)

Se utilizó un secador solar tipo gabinete (Figura 1), capaz de operar tanto en modo pasivo como en modo activo. Este equipo permitió evaluar el comportamiento del tomate verde bajo condiciones variables de radiación y flujo de aire. La velocidad del aire en la cámara de secado fue medida mediante un anemómetro Extech, con rango de operación de 0.30 a 45.00 m/s, resolución de ± 0.01 m/s y margen térmico entre 0 °C y 50 °C.

Secador con condiciones controladas (SCC)

El secador con condiciones controladas fue diseñado con un motovenilador de 1/20 HP, capaz de generar un flujo de aire de hasta 450 m³/h. El sistema cuenta con un mecanismo de calefacción eléctrica de 4.5 kW que permite ajustar la temperatura de la cámara entre 25 y 80 °C. La estructura transparente de la cámara facilita la absorción de energía solar, mientras que las aberturas laterales permiten una circulación eficiente del aire. La velocidad del flujo de aire, controlada por un inyector, puede ajustarse entre 0.5 y 4 m/s, con circulación por encima, debajo y a través

de las bandejas. La temperatura interna se monitorea mediante un sensor PT1000, el cual también regula el sistema de calefacción. Para el análisis cinético del proceso, se establecieron temperaturas de 40, 50 y 60 °C (± 0.5 °C) y velocidades de aire de 2, 4 y 6 m/s (± 0.02 m/s).

Secador solar directo (SSD)

El secador solar directo (Figura 2) consistió en una cámara de acrílico transparente equipada con perforaciones en la base y los laterales, que permiten la salida del aire caliente y húmedo. Se evaluaron dos versiones: una con convección natural y otra con convección forzada, mediante un ventilador tipo abanico de 12 cm, operando a 115 V-AC y 0.17 A, con velocidades entre 3.33 y 3.45 m/s. Las rebanadas de tomate fueron expuestas directamente a la radiación solar, colocadas sobre bandejas metálicas pintadas de negro. En ambas configuraciones, el secado se llevó a cabo hasta que la masa de las muestras se mantuvo constante en tres lecturas consecutivas. El contenido inicial de humedad fue determinado por triplicado, conforme a la norma NMX-F-083-1986.

Figura 2. a) Secadores tipo gabinete convección natural y convección forzada, b) Producto deshidratado sellado al vacío.



Fuente: Fotografías tomadas por los autores.

Modelado de la cinética de secado

Para analizar el comportamiento del tomate verde durante el proceso de deshidratación, se aplicaron modelos matemáticos semiempíricos

ampliamente validados en la literatura, entre ellos los modelos de Page, Midilli y Kucuk, y el modelo logarítmico (Onwude et al., 2016). Los parámetros obtenidos permiten describir la evolución temporal del contenido de humedad bajo diferentes condiciones térmicas y de flujo de aire, con el fin de optimizar la eficiencia del proceso.

Resultados

Cinéticas de secado para el tomate verde

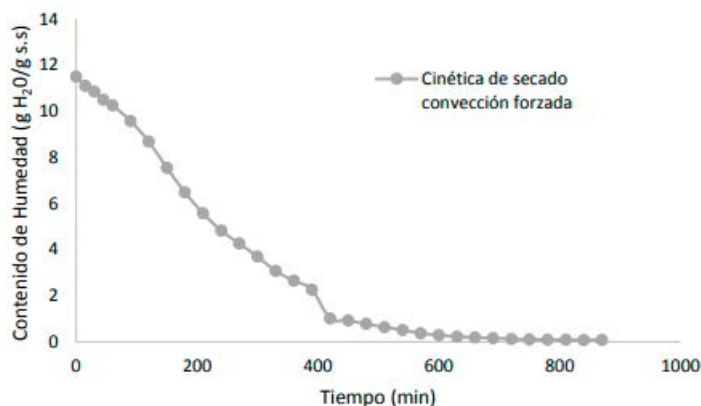
El proceso de desecación del tomate verde generó datos experimentales que correlacionan el contenido de humedad en base seca con el tiempo de secado. Las curvas obtenidas permiten identificar las fases del proceso, evidenciando que este no es uniforme ni continuo. Las metodologías empleadas incluyeron diferencias de humedad, pesaje intermitente y continuo, y permitieron construir curvas de cinética de secado bajo diversas condiciones de temperatura y velocidad del aire.

Se analizaron tres configuraciones: secador solar tipo gabinete con convección natural y forzada, y un secador con condiciones controladas. En cada caso, se seleccionaron cuatro muestras representativas por ensayo para monitorear la pérdida de humedad a lo largo del tiempo.

Cinética de secado con secador tipo gabinete

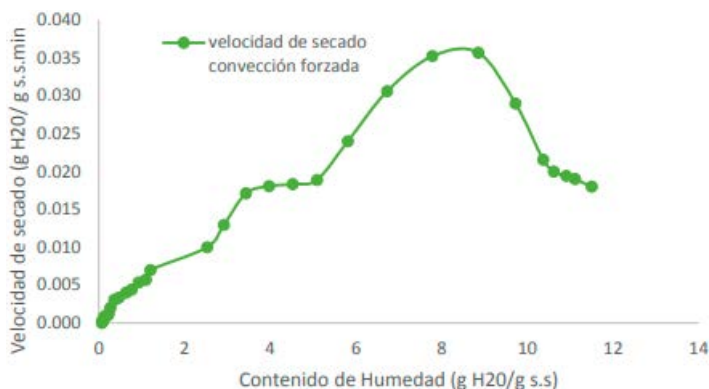
El uso del secador solar tipo gabinete permitió alcanzar humedades finales entre 5 % y 8 % (bh), con tiempos de secado de aproximadamente 12 horas para la convección natural y 15 horas para la convección forzada. Las Figuras 3 y 4 muestran la evolución del contenido de humedad y la velocidad de secado, respectivamente. Durante los primeros 60 minutos, no se observó un periodo claro de calentamiento, ya que la temperatura de operación fue moderada (~40 °C).

Figura 3. Cinética de secado solar convección forzada.



Fuente: Elaboración propia.

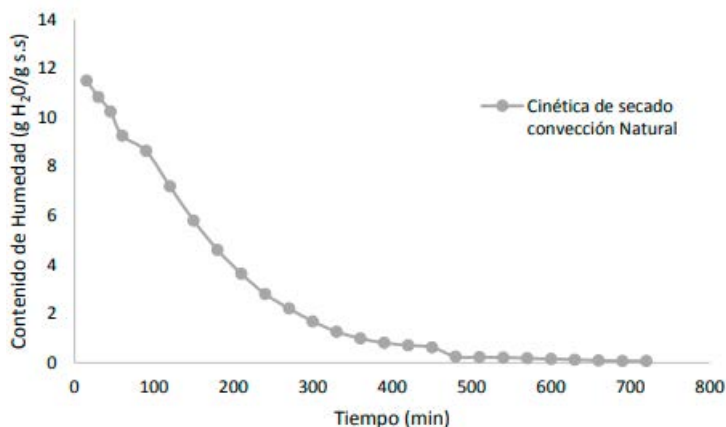
Figura 4. Velocidad de secado convección forzada.



Fuente: Elaboración propia.

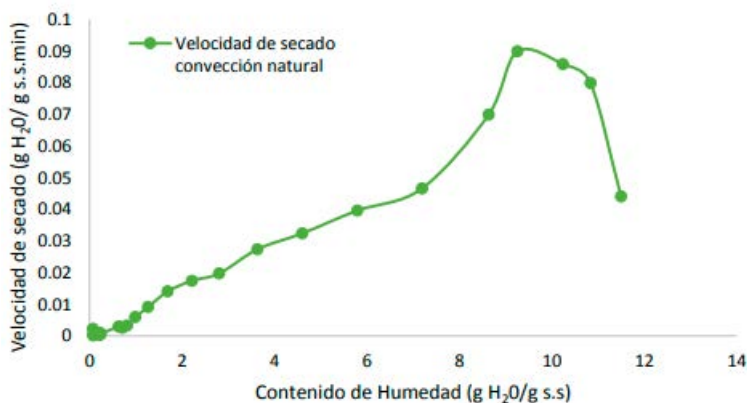
En convección natural (Figuras 5 y 6), se identificaron igualmente dos fases de velocidad decreciente: de 60 a 450 minutos y de 450 a 720 minutos. La humedad disminuyó de 0.39 ± 0.05 g H₂O/g s.s. a 0.071 ± 0.02 g H₂O/g s.s., con irradiancias máximas de 990 y 986 W/m², respectivamente.

Figura 5. Cinética de secado solar convección natural.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Velocidad de secado convección natural.



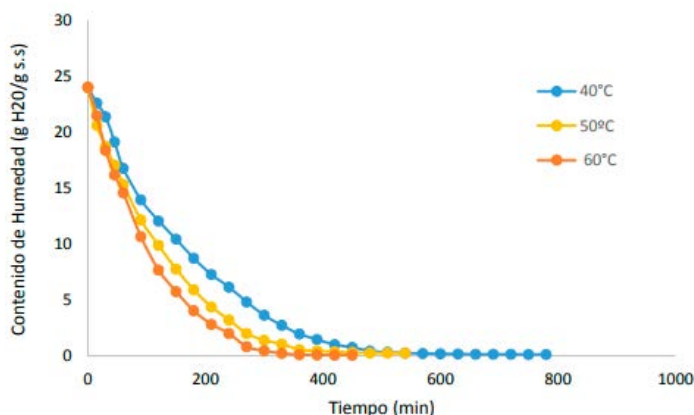
Fuente: Elaboración propia.

Cinética de secado con condiciones controladas

Las Figuras 7 y 8 presentan los resultados del secado bajo condiciones controladas a velocidades constantes de 2 m/s y temperaturas de 40, 50 y 60 °C. El tiempo requerido para alcanzar humedades finales disminuyó significativamente al aumentar la temperatura: a 60 °C, se logró 0.11 g

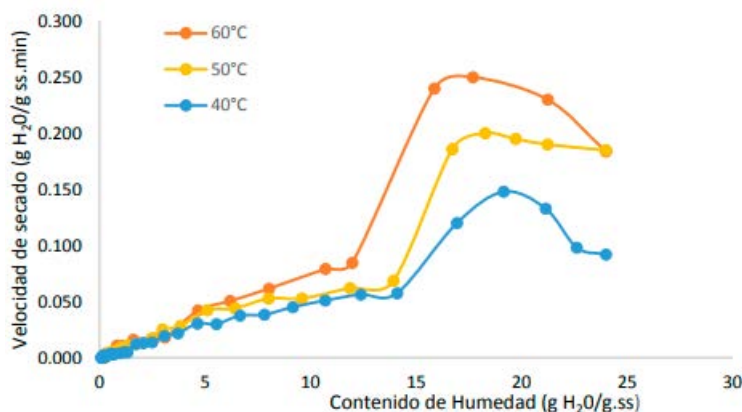
H₂O/g s.s. en 500 minutos; a 50 °C, 0.20 g H₂O/g s.s. en 650 minutos; y a 40 °C, 0.13 g H₂O/g s.s. en 800 minutos.

Figura 7. Cinética de secado bajo condiciones controladas velocidad 2 m/s.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Velocidad de secado bajo condiciones controladas 2 m/s.

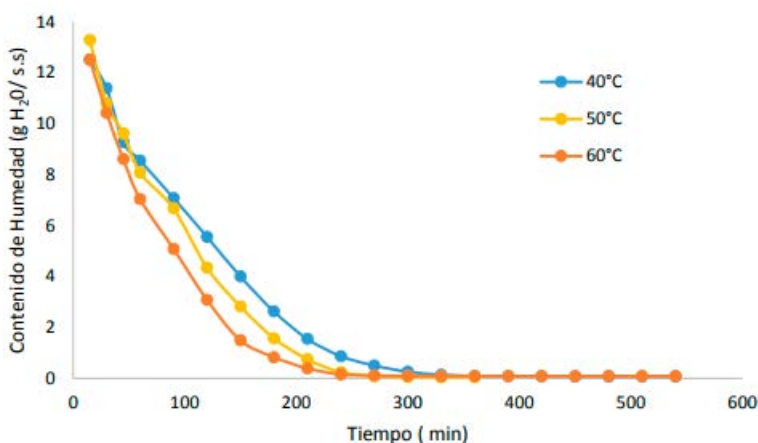


Fuente: Elaboración propia.

Las velocidades máximas registradas fueron de 0.22, 0.18 y 0.12 g H₂O/g s.s. min para 60, 50 y 40 °C, respectivamente, evidenciando tres fases de secado: calentamiento, velocidad decreciente 1 y velocidad decreciente 2.

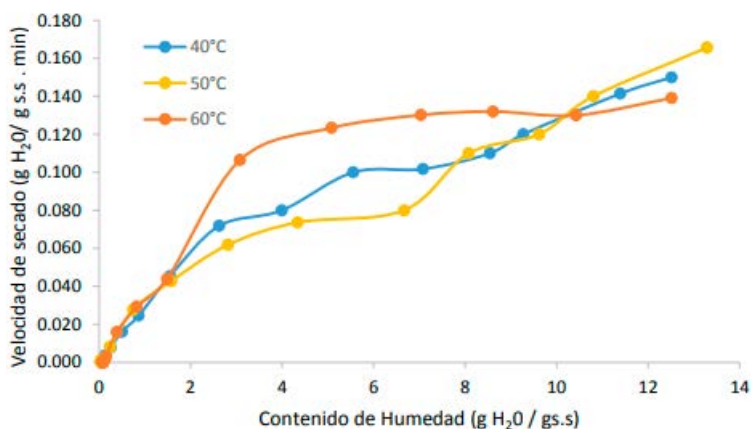
Con una velocidad de aire de 4 m/s (Figuras 9 y 10), los tiempos de secado se redujeron aún más: 250 minutos a 60 °C (0.071 g H₂O/g s.s.), 300 minutos a 50 °C (0.06 g H₂O/g s.s.), y 450 minutos a 40 °C (0.07 g H₂O/g s.s.). Las velocidades máximas fueron de 0.30, 0.20 y 0.17 g H₂O/g s.s. min respectivamente.

Figura 9. Cinética de secado bajo condiciones controladas 4 m/s.



Fuente: Elaboración propia.

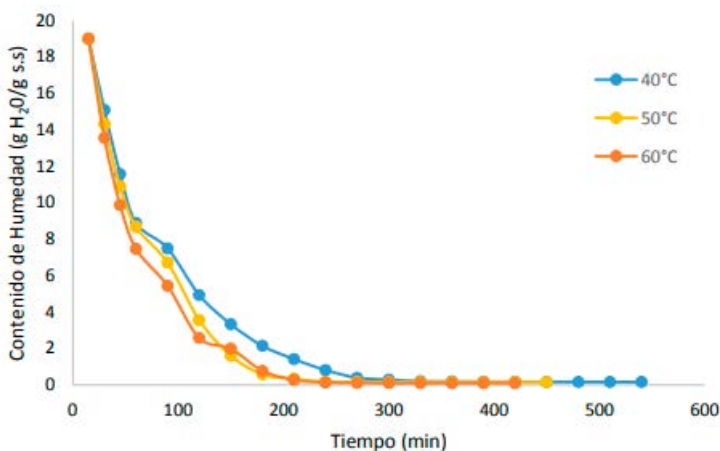
Figura 10. Velocidad de secado 4 m/s.



Fuente: Elaboración propia.

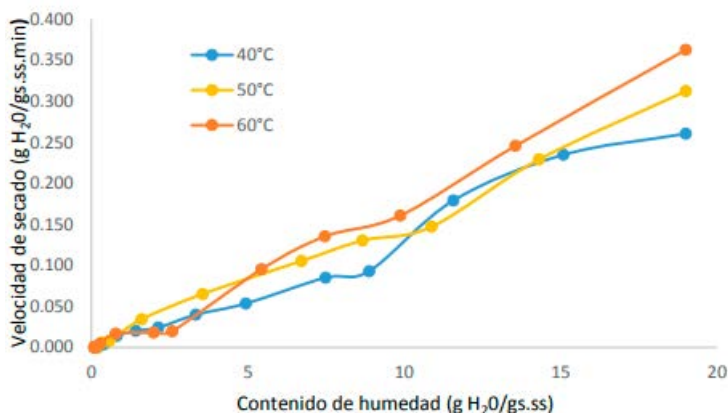
Finalmente, a 6 m/s (Figuras 11 y 12), se obtuvo una mayor eficiencia de secado, especialmente a 60 °C, con una humedad final de 0.084 g H₂O/g s.s. en 300 minutos. A 40 °C, se alcanzó 0.13 g H₂O/g s.s. en 420 minutos. Se observaron dos etapas claramente diferenciadas: velocidad constante inicial (en 40 y 50 °C) y velocidad decreciente. A 60 °C se identificó un periodo de velocidad creciente seguido por la fase decreciente.

Figura 11. Cinética de secado 6 m/s.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Velocidad de secado 6 m/s.



Fuente: Elaboración propia.

En todos los casos, las curvas se construyeron con promedios de cuatro muestras por ensayo, de $4 \text{ mm} \pm 0.001$ de espesor y masa entre 13 y 20 g. Las correlaciones ($r = 0.7$ a 0.8) y la desviación estándar (0.068) indican que la masa no tuvo una influencia significativa sobre la cinética de secado.

Discusión

La eficiencia del proceso de secado solar depende de múltiples factores técnicos y físicos que deben ser cuidadosamente optimizados para garantizar la calidad del producto final. Entre estos factores destacan la temperatura de operación, el corte y el espesor del alimento. Un espesor excesivamente delgado, por ejemplo, puede dificultar la manipulación del producto y provocar adherencias en la charola de secado, mientras que espesores mayores ralentizan el proceso de deshidratación. En este sentido, se ha sugerido la aplicación de pretratamientos como la deshidratación osmótica para reducir el contenido inicial de agua y mejorar la eficiencia del secado, aunque en este estudio se optó por no aplicarlos para evaluar el comportamiento natural del producto.

Asimismo, el contenido inicial de humedad, aunque importante, no es el único parámetro determinante del proceso. La selección del estado

de madurez del tomate verde (*Physalis ixocarpa* Brot) también juega un papel fundamental, ya que influye en su estructura celular, contenido de sólidos solubles y respuesta térmica durante la deshidratación.

Desde un enfoque termodinámico, el contenido de humedad se expresa comúnmente como porcentaje en base seca, definido como la relación entre la masa de agua contenida en la muestra (adsorbato) y la masa de la materia seca (adsorbente). Esta representación permite una mejor comparación entre condiciones experimentales y facilita la modelación matemática del proceso.

En términos comparativos, Sharma et al. (2009) realizaron una revisión de los sistemas de secado solar, describiendo sus principios, tipologías y aplicaciones, aunque sin ofrecer datos experimentales específicos ni integrar criterios de sostenibilidad o economía circular. En contraste, el presente estudio proporciona una evaluación experimental detallada de la cinética de secado del tomate verde, bajo diversas condiciones de operación, y contextualiza sus hallazgos en función de los principios de circularidad.

Del mismo modo, Onwude et al. (2016) abordaron el modelado del secado en capa fina mediante diversos enfoques teóricos, pero no profundizaron en aplicaciones prácticas para cultivos específicos ni en la incorporación de residuos en ciclos productivos. En el presente trabajo, se validaron modelos semiteóricos como los de Page, Midilli y Kucuk, adaptándolos a las condiciones experimentales observadas, y se exploró la posibilidad de integrar los residuos del proceso en nuevas cadenas de valor.

Rabha et al. (2017), por su parte, analizaron la cinética de secado del chile fantasma en un secador solar tipo túnel, identificando un comportamiento de velocidad decreciente sin fase constante, lo cual concuerda con las observaciones registradas en este estudio para el tomate verde. No obstante, las diferencias en el tipo de secador y en las características del producto limitan la extrapolación directa de los resultados. Similarmente, Elavarasan et al. (2021) investigaron el secado del tomate (*Solanum lycopersicum*) en condiciones de convección forzada, obteniendo datos comparables en términos de tiempos y humedades finales, aunque sin evaluar impactos ambientales ni posibilidades de circularidad.

Este estudio aporta evidencia sobre la viabilidad técnica del secado solar de tomate verde, subrayando su potencial para ser integrado en esquemas productivos más sostenibles. La comparación entre distintos tipos de secadores y velocidades de aire permitió identificar configuraciones óptimas para reducir el tiempo de secado y preservar la calidad del producto. Además, se destaca el potencial de los residuos generados durante el proceso (como pieles o partes no comercializables) para ser utilizados en la elaboración de nuevos productos, promoviendo así la reducción del desperdicio alimentario y el cierre de ciclos materiales en el marco de la economía circular.

Modelos matemáticos

Los modelos matemáticos constituyen una herramienta fundamental para optimizar las condiciones del proceso de secado y comprender los mecanismos complejos de transferencia de calor y masa que intervienen en la deshidratación de alimentos. La elección adecuada del modelo permite predecir el comportamiento del producto durante el secado y ajustar las variables operativas en función de la eficiencia energética y la calidad final.

Existen dos escalas principales en la modelación del secado: los modelos a macroescala y los modelos a microescala. Los primeros se centran en describir el comportamiento global del alimento, sin entrar en los detalles estructurales microscópicos. En este grupo se incluyen los modelos empíricos, semiteóricos y teóricos, los cuales se emplearon en el presente estudio para ajustar las curvas de cinética de secado del tomate verde.

En la Tabla 1 se presentan los catorce modelos matemáticos considerados, junto con sus respectivas ecuaciones y referencias bibliográficas.

Tabla 1. Modelos matemáticos para cinética de secado

Modelo	Correlación matemática	Referencias
Newton	$MR = \exp(-kt)$	Liu y Bakker-Arkema (1997) O'Callaghan, Menzies y Bailey (1971)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Agrawal y Singh (1977) Zhang y Litchfield (1991)
Page Modificado	$MR = \exp(-(kt)^n)$	Overhults, White, Hamilton y Ross (1973) White, Ross y Ponekert (1981)
Henderson y Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Chinnman (1984) Westerman, White y Ross (1973)
Logarítmico	$MR = a \exp(-kt) + c$	Yagcioglu, Degirmencioglu, and Cagatay (1999)
Dos términos	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	Henderson (1974) Rahman, Perera y Theband (1998)
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	Wang and Singh (1978)
Thomson	$MR = \exp((-a - (a^2 + 4bt)^{1/2})/2b)$	Thomson, Peart y Foster (1968)
Difusión aproximada	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	Kassem (1998)
Werna	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	Werma, Bucklin, Endan y Wratten (1985)
Henderson y Pabis modificado	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Karathanos (1999)
Dos términos exponencial	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	Sharaf-Elden, Blaisdell y Hamdy (1980)
Difusión simplificada de Fick	$MR = a \exp(-c(t/L^2))$	Diamante and Munro (1991)
Page Modificado Ec.2	$MR = \exp(-k(t/L^2)^n)$	Diamante and Munro (1991)

Se analizó el comportamiento de los datos experimentales obtenidos en las pruebas realizadas bajo diferentes condiciones controladas en el secador de gabinete, con el objetivo de determinar cuál de los modelos ofrecía el mejor ajuste a la cinética de secado del tomate verde. Para ello se evaluaron los catorce modelos descritos en la Tabla 1.

La Tabla 2 resume los valores de los parámetros ajustados para cada modelo, así como los errores asociados a cada uno, utilizando datos correspondientes a una temperatura de 60 °C y una velocidad de aire de 6 m/s. En total, se llevaron a cabo nueve combinaciones de prueba, variando la temperatura entre 40 y 60 °C y la velocidad del aire entre 2 y 6 m/s.

Tabla 2. Parámetros de cada modelo para ajuste con cinética de secado a 60°C y 6 m/s y sus errores correspondientes al ajuste.

Modelo	Correlación matemática	Parámetros de los modelos	χ^2	MBE	RMSE	R ²
Newton	$MR = \exp(-kt)$	k = 0.0212	9.19E-05	8.62E-05	9.28E-03	9.99E-01
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	k = 0.0241 n = 0.9679	8.19E-05	7.17E-05	8.47E-03	9.99E-01
Page Modificado	$MR = \exp(-(kt)^n)$	k = 0.0213 n = 0.9679	8.19E-05	7.17E-05	8.47E-03	9.99E-01
Henderson y Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	a = 0.9925 k = 0.0211	9.33E-05	8.16E-05	9.03E-03	9.99E-01
Logarítmico	$MR = a \exp(-kt) + c$	a = 0.9911 k = 0.0212 c = 0.0024	9.71E-05	7.89E-05	8.88E-03	9.99E-01
Dos términos	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	a = 0.4963 b = 0.4963 k0 = 0.0211 k1 = 0.0211	1.09E-04	8.16E-05	9.03E-03	9.99E-01
Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$	a = -0.0090 b = 0.0000	2.43E-02	2.13E-02	1.46E-01	8.86E-01
Thomson	$MR = \exp((-a - (a^2 + 4bt)^{1/2})/2b)$	a = -8607 b = 11.3759	1.17E-03	1.05E-03	3.97E-02	9.25E-01
Difusión aproximada	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	a = 0.0303 k = 0.2751 b = 0.0745	8.33E-05	6.77E-05	8.23E-03	9.99E-01
Werma	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$	a = 0.9697 k = 0.0205 g = 0.2754	8.33E-05	6.77E-05	8.23E-03	9.99E-01
Henderson y Pabis modificado	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	a = 0.3308 k = 0.0211 b = 0.3308 g = 0.0211 c = 0.3308 h = 0.0211	1.31E-04	8.16E-05	9.03E-03	9.99E-01
Dos términos exponencial	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	a = 0.6717 k = 0.0243	9.04E-05	7.91E-05	8.90E-03	9.99E-01
Difusión simplificada de Fick	$MR = a \exp(-c(t/L^2))$	a = 0.9925 c = 0.0015 L = 0.2652	1.00E-04	8.16E-05	9.03E-03	9.99E-01
Page Modificado Ec. 2	$MR = \exp(-k(t/L^2)^n)$	k = 0.0085 L = 0.5855 n = 0.9679	8.82E-05	7.17E-05	8.47E-03	9.99E-01

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 2, los modelos que presentan mejor ajuste a los datos experimentales bajo estas condiciones específicas son: el modelo de Werma, el modelo de Difusión Aproximada y el modelo de Page Modificado. No obstante, considerando todas las condiciones evaluadas, los tres modelos que consistentemente ofrecieron mejor ajuste son: Werma, Dos Términos Exponencial y Page Modificado. Los valores promedio de las medidas estadísticas correspondientes se resumen en la Tabla 3, ordenados de menor a mayor error.

Tabla 3. Valores de medidas estadísticas para el ajuste promedio de todas las pruebas

Modelo	Promedio			
	X ²	MBE	RMSE	R ²
Werma	0.00021	0.00017	0.01268	0.9985
Dos términos exponencial	0.00021	0.00019	0.01328	0.9983
Page Modificado	0.00022	0.00020	0.01345	0.9983
Page	0.00023	0.00020	0.01349	0.9982
Difusión aproximada	0.00027	0.00022	0.01421	0.9980
Page Modificado Ec.2	0.00030	0.00025	0.01459	0.9979
Logaritmico	0.00038	0.00030	0.01639	0.9972
Newton	0.00055	0.00052	0.02157	0.9969
Dos términos	0.00050	0.00039	0.01877	0.9969
Henderson y Pabis modificado	0.00064	0.00042	0.01944	0.9966
Henderson y Pabis	0.00050	0.00044	0.01987	0.9965
Difusión simplificada de Fick	0.00052	0.00044	0.01987	0.9965
Thomson	0.00156	0.00140	0.05291	0.9647
Wang and Singh	0.00943	0.00836	0.08284	0.9532

Una vez identificados los modelos con mejor desempeño, se procedió a analizar los parámetros de ajuste de cada uno de ellos para establecer correlaciones en función de la temperatura y la velocidad del aire. El modelo de Werma, que mostró el mejor ajuste general, requiere la definición de tres parámetros: a , k y g . Estos parámetros varían en función de las condiciones específicas de secado, y fueron determinados empíricamente a partir de los datos obtenidos en las distintas pruebas.

Tabla 4. Parámetros del modelo Werma en las pruebas realizadas

Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)	a	k	g
2	40	11.9232	0.0091	0.0095
2	50	8.4928	0.0111	0.0116
2	60	9.5703	0.0145	0.0154
4	40	14.9463	0.0165	0.0171
4	50	14.9804	0.0203	0.0211
4	60	11.1929	0.0257	0.0273
6	40	0.8399	0.0136	0.0364
6	50	7.9088	0.0247	0.0258
6	60	0.9697	0.0205	0.2754

Modelo de dos términos exponencial

El modelo de dos términos exponencial requiere definir dos parámetros: a y k. Estos parámetros se muestran en la Tabla 5 a diferentes temperaturas y velocidad de secado.

Tabla 5. Parámetros del modelo Dos términos exponencial en las pruebas realizadas

Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)	a	k
2	40	1.6367	0.0077
2	50	1.5218	0.0096
2	60	1.6468	0.0124
4	40	1.7102	0.0137
4	50	1.6790	0.0169
4	60	1.7730	0.0212
6	40	0.5286	0.0213
6	50	1.4775	0.0218
6	60	0.6717	0.0243

Modelo de Page modificado

El modelo de Page modificado también utiliza dos parámetros: a y k . Los valores de estos parámetros, obtenidos a diferentes temperaturas y velocidades de secado, se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros del modelo Page modificado en las pruebas realizadas

Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)	k	n
2	40	0.0059	1.1345
2	50	0.0080	1.0691
2	60	0.0094	1.1388
4	40	0.0100	1.1866
4	50	0.0126	1.1668
4	60	0.0149	1.2262
6	40	0.0156	0.9417
6	50	0.0184	1.0553
6	60	0.0213	0.9679

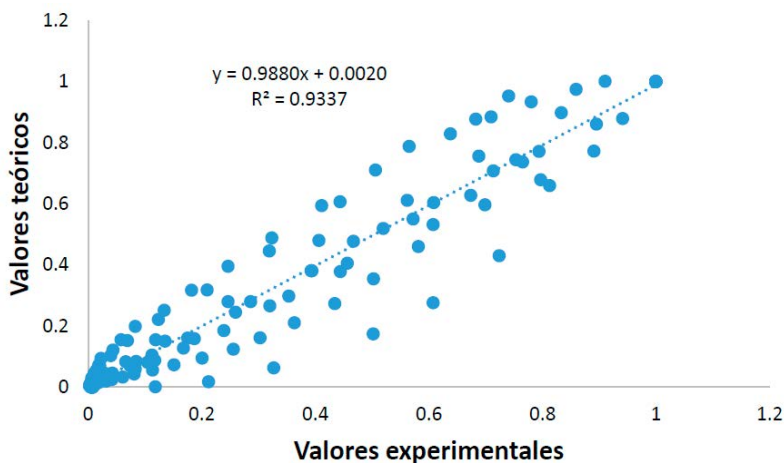
Validación de los modelos desarrollados.

La validación de los modelos matemáticos desarrollados se realizó empleando como criterio principal el coeficiente de determinación (R^2), el cual indica el grado de correlación entre los valores teóricos calculados y los datos experimentales. Este coeficiente permite cuantificar la proporción de la variabilidad de los datos observados que es explicada por el modelo, siendo un valor cercano a 1 indicativo de un ajuste óptimo. En el presente estudio, los tres modelos seleccionados (Werma, Dos términos exponencial y Page modificado) presentaron valores de R^2 superiores al 93 %, lo que evidencia un elevado nivel de ajuste y una adecuada capacidad predictiva en la descripción de la cinética de secado del tomate verde bajo las condiciones experimentales evaluadas.

Para el proceso de validación, se utilizaron los datos experimentales obtenidos en el secador de gabinete bajo condiciones controladas de temperatura y velocidad del aire. A partir de dichas condiciones, y mediante las correlaciones previamente obtenidas para los parámetros de cada modelo, se calcularon las razones de humedad (MR) en función del tiempo. Posteriormente, se compararon los resultados teóricos generados con cada modelo frente a los datos experimentales, y se determinaron las medidas estadísticas correspondientes: el error cuadrático medio (RMSE), el error medio absoluto (MBE) y el valor de χ^2 .

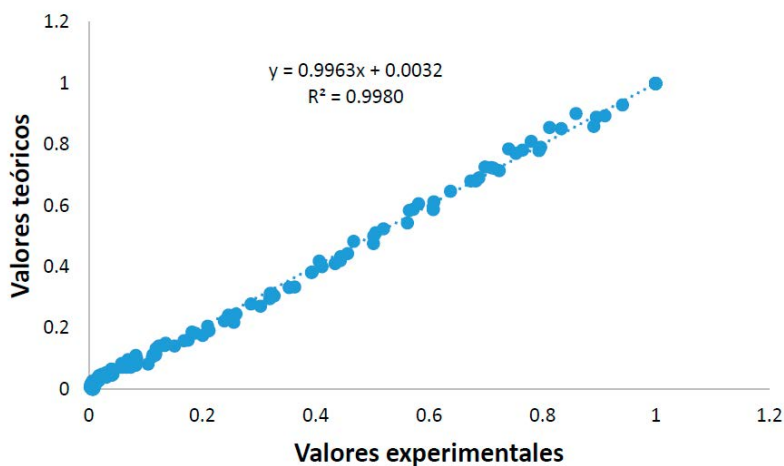
Las Figuras 13, 14 y 15 presentan las comparaciones gráficas entre los datos experimentales y los valores teóricos obtenidos con los modelos de Werma, Dos términos exponencial y Page modificado, respectivamente. Estas gráficas permiten visualizar la calidad del ajuste para cada modelo bajo diversas condiciones de operación.

Figura 13. Comparación entre valores experimentales y teóricos calculados con el modelo de Werma.



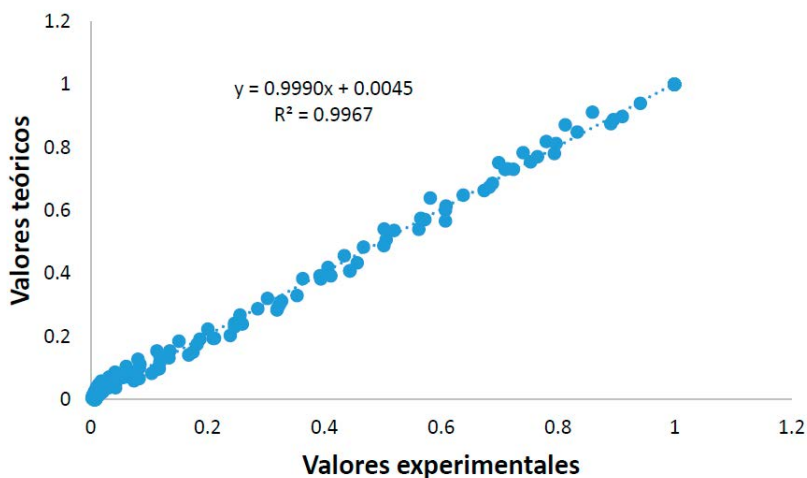
Fuente elaboración propia.

Figura 14. Comparación entre valores experimentales y teóricos calculados con el modelo de dos términos exponencial.



Fuente elaboración propia.

Figura 15. Comparación entre valores experimentales y teóricos calculados con el modelo de Page modificado.



Fuente elaboración propia.

El análisis visual y estadístico reveló que el modelo de Dos términos exponencial es el que mejor reproduce el comportamiento experimental

del proceso de secado, seguido por el modelo de Page modificado, y finalmente el modelo de Werma. Esta jerarquía de ajuste fue confirmada mediante las medidas estadísticas resumidas en la Tabla 7.

Tabla 7. Validación de los modelos matemáticos desarrollados

Modelo	X ²	MBE	RMSE	R ²
Werma	0.00723	0.00714	0.08451	0.9337
Dos términos exponencial	0.00022	0.00021	0.01458	0.9980
Page Modificado	0.00036	0.00036	0.01897	0.9967

Los valores presentados en la Tabla 7 confirman que los tres modelos presentan un ajuste aceptable ($R^2 > 0.93$). No obstante, el modelo de Dos términos exponencial destaca por ofrecer el mejor desempeño general, con un valor promedio de R^2 de 0.998, lo cual garantiza una precisión del 99.8 % en la predicción del contenido de humedad en función del tiempo de secado, dentro del rango de temperaturas de 40 a 60 °C y velocidades del aire de 2 a 6 m/s.

A pesar de los resultados positivos, es importante señalar que el estudio se desarrolló bajo condiciones experimentales controladas y en una escala de laboratorio. Por lo tanto, las conclusiones podrían no ser directamente extrapolables a entornos agroindustriales reales, donde influyen factores como la variabilidad climática, la radiación solar disponible y las características locales de operación. En consecuencia, se recomienda llevar a cabo estudios adicionales en condiciones reales de campo para validar y ajustar los modelos desarrollados, garantizando así su aplicabilidad práctica en contextos productivos diversos.

Conclusiones

El presente estudio permitió realizar una evaluación técnica y económica del secado solar como estrategia sostenible para la conservación del tomate verde, centrando el análisis en distintas configuraciones de secadores: convección natural, convección forzada y condiciones controladas.

Los resultados obtenidos evidencian el potencial de esta tecnología para optimizar el uso de recursos, reducir pérdidas poscosecha y favorecer una producción alimentaria más eficiente y resiliente.

Se comprobó que la temperatura y la velocidad del aire inciden de forma significativa en la eficiencia del proceso de secado, lo que permitió identificar condiciones óptimas de operación. Entre los modelos matemáticos evaluados, el modelo de Werma mostró el mejor desempeño en la representación de la cinética de deshidratación del tomate verde bajo condiciones experimentales controladas.

Más allá de su eficiencia técnica, el secado solar representa una alternativa que promueve el aprovechamiento energético responsable, contribuye a la reducción del desperdicio alimentario y permite agregar valor a productos agrícolas frecuentemente subutilizados. Esto refuerza su utilidad como herramienta en la transición hacia modelos de producción y consumo más sostenibles y con menor impacto ambiental.

Los hallazgos de esta investigación tienen aplicaciones prácticas relevantes para el sector agroindustrial nacional, ya que muestran que la implementación de tecnologías solares de secado puede reducir costos operativos, mejorar la conservación de alimentos y beneficiar directamente a los productores rurales. Además, al emplear fuentes de energía limpia y fomentar el aprovechamiento integral de los recursos, esta tecnología se perfila como una solución viable para enfrentar desafíos vinculados al cambio climático, a la seguridad alimentaria y al desarrollo sostenible de las comunidades agrícolas.

Bibliografía

- Bhanu, A. S., Elavarasan, E., Natarajan, S. K., Anandu, A., & Senin, H. M. (2021). Experimental investigation of drying kinetics of poovan banana under forced convection solar drying. En S. K. Acharya & D. P. Mishra (Eds.), *Current Advances in Mechanical Engineering* (pp. 621-631). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4795-3_56
- Deepak, C.N., & Behura, A.K. (2023). Critical review on various solar drying technologies: Direct and indirect solar dryer systems. *Applied Solar Energy*, 59(5), 672–726. <https://doi.org/10.3103/S0003701X2360073X>

- Elavarasan, E., Natarajan, S. K., Bhanu, A. S., Anandu, A., & Senin, H. M. (2021). Experimental investigation of drying kinetics of poovan banana under forced convection solar drying. En S. K. Acharya & D. P. Mishra (Eds.), *Current Advances in Mechanical Engineering* (pp. 621-631). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8390-4_63
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s. f.). Hambre [Página de inicio]. <https://www.fao.org/hunger/es/>
- Fernandes, L.; Tavares, PB Una revisión sobre dispositivos de secado solar: transferencia de calor, movimiento de aire y tipo de cámaras. *Solar* 2024, 4 , 15-42. <https://doi.org/10.3390/solar4010002>.
- Gilago, M. C., Mugi, V. R., & Chandramohan, V. P. (2023). Evaluating the performance of an indirect solar dryer and drying parameters of pineapple: Comparing natural and forced convection. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(9), 3701-3709.
- Ilikaracan, I., & Appleton, H. (1994). Women's roles in the innovation of food cycle technologies.
- Jangde, K., Singh, A., & Arjunan, T. V. (2022). Efficient solar drying techniques: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 50970-50983. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15792-4>
- Kaimal, A. M., Tidke, V. B., Mujumdar, A. S. et al. (2022) Seguridad alimentaria y sostenibilidad mediante tecnologías de secado solar: un estudio de caso basado en un secador de conducción solar. *Mater Circ Econ*, 4(7). <https://doi.org/10.1007/s42824-022-00051-9>
- Khan, MIH; Batuwatta-Gamage, CP; Karim, MA; Gu, Y. (2022). Comprensión fundamental de los procesos de transferencia de calor y masa para el modelado de secado basado en aprendizaje automático basado en la física. *Energies*, 15, 9347. <https://doi.org/10.3390/en15249347>
- Lodamo, B. Z., Adem, K. D., & Jemal, F. K. (2023). Performance evaluation and comparison of mixed-mode natural convection solar dryer with and without solar air heater for green banana flour production. En B. H. Woldegiorgis, K. Mequanint, M. Z. Getie, E. G. Mulat, & A. Alemayehu Assegie (Eds.), *Advancement of Science and Technology: Green Energy and Technology*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33610-2_16

- Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M., & Abdan, K. (2016). Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(3), 599-618. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12196>
- Parvathy, V. K., & Kumar, J. (2023). Convergence of community network and sustainable development goals, Kudumbashree community network. En *SDGs in the Asia and Pacific Region* (pp. 1-25). Springer International Publishing.
- Rabha, D. K., Muthukumar, P., & Somayaji, C. (2017). Experimental investigation of thin layer drying kinetics of ghost chilli pepper (*Capsicum Chinense* Jacq.) dried in a forced convection solar tunnel dryer. **Renewable Energy*, 105*, 583-589. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.091>
- Sharma, A., Chen, C. R., & Lan, N. V. (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13*(6-7), 1185-1210. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.015>
- Tamasiga, P., Miri, T., Onyeaka, H., & Hart, A. (2022). Food waste and circular economy: Challenges and opportunities. *Sustainability*, 14(16), 9896. <https://doi.org/10.3390/su14169896>

