

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2026,
Volumen 10, Número 1.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i1

ANÁLISIS DEL SECADO CONVECTIVO DE ZANAHORIA MEDIANTE UN MODELO MATEMÁTICO DESARROLLADO EN SCILAB- XCOS

**ANALYSIS OF CONVECTIVE DRYING OF CARROTS USING A
MATHEMATICAL MODEL DEVELOPED IN SCILAB-XCOS**

Emilio Hernández-Bautista

Departamento de ingeniería química y bioquímica, Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Oaxaca

Arlet Arellanes-Taylor

División de Estudios de Posgrado e Investigación Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Oaxaca

Iván Antonio García-Montalvo

División de Estudios de Posgrado e Investigación Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Oaxaca

Diana Matías-Pérez

División de Estudios de Posgrado e Investigación Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Oaxaca

Aymara Judith Díaz Barrita

Departamento de ingeniería química y bioquímica, Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Oaxaca

Análisis del secado convectivo de zanahoria mediante un modelo matemático desarrollado en Scilab–Xcos

Emilio Hernández-Bautista¹

Bautistahe@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8893-7647>

Departamento de ingeniería química y bioquímica, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Oaxaca
Oaxaca, México

Arlet Arellanes-Taylor

arletarellanestaylor@gmail.com

División de Estudios de Posgrado e Investigación Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Oaxaca
Oaxaca, México

Iván Antonio García-Montalvo

ivan.garcia@itoaxaca.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4993-9249>

División de Estudios de Posgrado e Investigación Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Oaxaca
Oaxaca, México

Diana Matías-Pérez

dian_1007@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6592-9342>

División de Estudios de Posgrado e Investigación Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Oaxaca
Oaxaca, México

Aymara Judith Diaz Barrita

aymara.db@itoaxaca.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0005-9548-2827>

Departamento de ingeniería química y bioquímica, Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Oaxaca
Oaxaca, México

RESUMEN

El secado convectivo de productos agrícolas es un proceso ampliamente utilizado para prolongar la vida útil de los alimentos; sin embargo, su correcta descripción requiere considerar de manera simultánea los fenómenos de transferencia de calor, transferencia de masa y los cambios estructurales del material. En este trabajo se desarrolló y validó un modelo matemático fenomenológico para simular el secado convectivo de cubos de zanahoria, incorporando explícitamente el efecto del encogimiento volumétrico durante la deshidratación. El modelo se formuló a partir de balances macroscópicos de masa y energía bajo el supuesto de parámetros concentrados, considerando números de Biot menores a 0.1, y se implementó numéricamente en el entorno de código abierto Scilab–Xcos. La simulación se realizó para cubos de zanahoria de 0.8, 1.0 y 1.5 cm, sometidos a secado con aire caliente a 50 °C y una velocidad de 1.5 m/s. Los resultados obtenidos para el contenido de humedad, la temperatura del sólido y la variación de volumen se compararon con datos experimentales de secado convectivo. El modelo reprodujo adecuadamente la cinética de secado y la evolución térmica del material, con coeficientes de correlación de 0.97 entre valores simulados y experimentales. Asimismo, la inclusión del encogimiento permitió describir la contracción progresiva del material y su dependencia con el tamaño inicial del cubo. Los resultados confirman que el modelo propuesto constituye una herramienta útil para el análisis y la simulación del secado convectivo de zanahoria.

Palabras clave: Análisis dimensional, Contracción volumétrica, Longitud característica, Número de Biot, Parámetros concentrados.

¹ Autor principal

Correspondencia: Bautistahe@gmail.com

Analysis of convective drying of carrots using a mathematical model developed in Scilab–Xcos

ABSTRACT

Convective drying of agricultural products is widely used to extend food shelf life; however, its accurate description requires the simultaneous consideration of heat and mass transfer phenomena as well as structural changes in the material. In this study, a phenomenological mathematical model was developed and validated to simulate the convective drying of carrot cubes, explicitly accounting for volumetric shrinkage during dehydration. The model was derived from macroscopic mass and energy balances under the lumped-parameter assumption, with Biot numbers less than 0.1, and implemented numerically in the open-source Scilab–Xcos environment. The simulation was performed for carrot cubes measuring 0.8, 1.0, and 1.5 cm, subjected to hot air drying at 50 °C and a velocity of 1.5 m/s. The results obtained for moisture content, temperature, and volume variation were compared with experimental data from convective drying. The model adequately reproduced the material's drying kinetics and thermal evolution, with a correlation coefficient of 0.97 between simulated and experimental values. Likewise, the inclusion of shrinkage allowed the progressive contraction of the material and its dependence on the cube's initial size to be described. The results confirm that the proposed model is a useful tool for analyzing and simulating the convective drying of carrots

Keywords: Dimensional analysis, Volumetric shrinkage, Characteristic length, Biot number, Lumped parameters.

*Artículo recibido 10 diciembre 2025
Aceptado para publicación: 10 enero 2026*



INTRODUCCIÓN

La conservación de los alimentos constituye un aspecto fundamental para reducir las pérdidas posteriores a la cosecha y asegurar su disponibilidad en condiciones adecuadas para el consumo humano. Entre las tecnologías empleadas con este fin, el secado térmico destaca por su capacidad para disminuir el contenido de agua de los productos, reducir la actividad del agua y prolongar su vida útil, además de facilitar el transporte y el almacenamiento mediante el uso de empaques de menor volumen y peso (Giraldo-Zuniga et al., 2010). Sin embargo, el secado es un proceso complejo que involucra de manera simultánea la transferencia de calor y de masa, condicionada tanto por resistencias internas como externas. En materiales biológicos, como frutas y hortalizas, la contracción asociada a la pérdida de humedad modifica la forma y el volumen del sólido, afectando los mecanismos de difusión interna y el coeficiente de difusión efectivo, lo que repercute directamente en la cinética del proceso (Białobrzewski, Zielińska, Mujumdar, & Markowski, 2008). Estas transformaciones estructurales, junto con la aparición de fenómenos como el endurecimiento superficial, evidencian la necesidad de desarrollar modelos matemáticos que describan con mayor precisión el comportamiento real del alimento durante el secado. En el ámbito agroalimentario, esta aproximación resulta particularmente relevante para el secado de zanahoria en México, un cultivo de amplia importancia económica y social, con una producción de 164.9 miles de toneladas solamente en noviembre de 2025, concentrada principalmente en Zacatecas y el Estado de México (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2025). Debido a su alto contenido de agua, la zanahoria es altamente susceptible al deterioro poscosecha, lo que hace del secado térmico una alternativa eficaz para prolongar su vida útil y reducir pérdidas. Sin embargo, el secado convectivo con aire caliente presenta elevadas demandas energéticas y eficiencias térmicas limitadas, generalmente entre 25 % y 50 %, lo que incrementa los costos operativos y el impacto ambiental, considerando que una parte significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero se asocia al consumo de energía en procesos industriales (Mujumdar, 2014). En este contexto, el desarrollo de modelos matemáticos aplicados al secado de zanahoria adquiere relevancia como una herramienta para mejorar la eficiencia energética y promover prácticas más sostenibles en el sector agroindustrial (Mujumdar, 2001). La simulación de procesos se ha consolidado como una herramienta clave en la ingeniería al permitir el análisis y la optimización de sistemas complejos mediante modelos matemáticos, reduciendo costos,



tiempos de desarrollo y la dependencia de ensayos experimentales extensivos, además de ofrecer un soporte confiable para la toma de decisiones técnicas (Palacios & Plúas, 2021).

Diversos estudios han abordado la modelación y simulación del secado térmico de productos agrícolas con el propósito de comprender los mecanismos de transporte y optimizar las condiciones de operación. (Aversa, Curcio, Calabrò, & Iorio, 2007; Curcio, Aversa, Calabrò, & Iorio, 2008) fue uno de los primeros en aplicar el método de elementos finitos para simular el secado convectivo de zanahoria mediante la plataforma FEM, considerando propiedades termo-físicas dependientes de la temperatura y la concentración local. Sus resultados mostraron que los gradientes más pronunciados de humedad y temperatura se localizan en la interfaz aire-alimento, proporcionando una herramienta útil para el análisis de la distribución térmica y el diseño de secadores de convección forzada. (Aversa, Curcio, Calabrò, & Iorio, 2010) incorporaron una formulación Lagrangiana-Euleriana arbitraria (ALE) para representar la contracción no homogénea del alimento durante la deshidratación, logrando una alta correlación entre las deformaciones predichas y los datos experimentales. De forma complementaria, (Białobrzewski et al., 2008) analizaron el comportamiento térmico y mecánico de cubos de zanahoria sometidos a secado convectivo, evidenciando que las capas externas experimentan mayores deformaciones y que la distribución de la temperatura dentro del sólido no es uniforme. Otros trabajos han profundizado en la relación entre las condiciones de secado y la calidad final del producto. (Curcio & Aversa, 2009, 2014) demostraron que el uso de temperaturas moderadas, cercanas a 50 °C, y velocidades de aire intermedias, del orden de 2.2 m/s, contribuye a reducir el deterioro estructural y a mejorar la capacidad de rehidratación. En la misma línea, (Giraldo-Zuniga et al., 2010), desarrollaron un modelo de transporte de calor y masa que considera la interacción aire-sólido sin recurrir a correlaciones empíricas, permitiendo describir con mayor detalle los campos locales de temperatura, velocidad y humedad. Investigaciones en otros productos vegetales, como la pulpa de cupuaçu, confirmaron la alta sensibilidad del proceso de secado a la temperatura y la velocidad del aire, mostrando un buen ajuste a los modelos de Fick y Page y valores de difusividad efectiva consistentes con los reportados para materiales vegetales. Asimismo, estudios sobre rehidratación evidenciaron que el incremento de la temperatura del medio favorece la absorción de agua y mejora la textura del producto reconstituido. Por otro lado, modelos mecanicistas basados en balances de masa y energía han sido utilizados para simular el secado de



zanahoria en lechos fijos, reproduciendo adecuadamente la cinética experimental y destacando la influencia del patrón de flujo de aire. Más recientemente, se han explorado técnicas de intensificación del proceso, como el uso de ultrasonido, que ha demostrado mejorar la transferencia de masa sin afectar negativamente la calidad del producto, así como estrategias de control dinámico de la humedad relativa del aire, las cuales permiten incrementar la eficiencia exergética y preservar la integridad estructural del alimento (Yu et al., 2020; Zhang, Yang, Mujumdar, Ju, & Xiao, 2022).

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo simular de manera acoplada los fenómenos de transferencia de calor, transferencia de masa y deformación durante el secado convectivo de cubos de zanahoria, a partir de un modelo matemático fenomenológico. A diferencia de enfoques convencionales que asumen geometría constante o tratan la contracción de forma empírica, el modelo propuesto incorpora la deformación volumétrica como un fenómeno dinámico que interactúa directamente con los mecanismos de transporte. La formulación se implementa y resuelve numéricamente en el entorno Xcos–Scilab, lo que representa una alternativa computacional de código abierto para el análisis de procesos de secado multiescala. Asimismo, el modelo se valida mediante ensayos experimentales realizados en un túnel de secado convectivo, empleando cubos de zanahoria de distintas dimensiones y condiciones controladas de operación, con el propósito de analizar la evolución del contenido de humedad, la temperatura y el cambio de volumen, así como evaluar su capacidad predictiva mediante la comparación entre resultados simulados y datos experimentales.

2. Desarrollo del modelo

2.1 Planteamiento general y consideraciones del modelado

El desarrollo del modelo matemático se orientó a representar de forma integrada los principales fenómenos físicos que tienen lugar durante el secado convectivo de cubos de zanahoria, considerando de manera explícita la interacción entre la transferencia de masa, la transferencia de calor y la deformación volumétrica del material. Tal como se expuso en la sección anterior, estos procesos se encuentran estrechamente acoplados en alimentos con alto contenido de humedad inicial, por lo que su análisis conjunto resulta indispensable para describir adecuadamente la cinética de secado y la evolución estructural del sólido.

Con este propósito, se adoptó un enfoque fenomenológico basado en balances macroscópicos,

formulados mediante ecuaciones diferenciales dependientes del tiempo. El sistema se modeló utilizando un modelo global de transferencia, considerando cubos de zanahoria de 0.8, 1.0 y 1.5 cm, bajo el supuesto de que el número de Biot térmico y masa es menor que 0.1, lo que permite asumir una distribución uniforme de la temperatura en el interior del sólido. Se consideró que la zanahoria presenta inicialmente una geometría cúbica homogénea, con propiedades físicas uniformes en todo el dominio. A medida que avanza el proceso de secado, la pérdida de humedad induce cambios estructurales que se manifiestan como una reducción progresiva del volumen, la cual se incorpora dinámicamente en el modelo. Asimismo, se asumió que el aire de secado mantiene condiciones constantes de temperatura y velocidad, de modo que las resistencias externas gobiernan el intercambio en la interfaz aire sólido.

2.2 Descripción del fenómeno de transferencia de masa

La transferencia de masa se describió mediante un balance global que representa la pérdida de humedad del sólido hacia el aire circundante (Ecuación 1). Este proceso está gobernado por el gradiente de concentración de agua entre el interior del cubo de zanahoria y el medio de secado, el cual constituye la fuerza motriz del fenómeno. A medida que el agua se desplaza desde el interior del material hacia su superficie, se establece un contenido de humedad superficial (W_s), desde el cual ocurre la transferencia de masa hacia el aire circundante, impulsada por la diferencia de concentración con respecto a la humedad del ambiente (W_a).

El contenido de humedad (W) en la ecuación 1, se expresó en base seca y su variación en el tiempo se describió mediante una ecuación diferencial de primer orden, en la cual intervienen el coeficiente de transferencia de masa (h_m) y una longitud característica (Le) asociada a la geometría del sólido, determinada a partir del cociente entre el volumen del sólido y el área total de sus seis caras. La condición inicial (W_i) del sistema se definió a partir del contenido de humedad en base seca del material fresco (condición inicial de la Ecuación 1), el cual se consideró representativo del estado del producto previo al inicio del proceso de secado.

$$\frac{dW}{dt} = - \frac{h_m}{Le} (W_s - W_a) \quad (1)$$

$$t = 0. \quad W = W_i$$

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de masa (Ecuación 2) se emplearon correlaciones adimensionales que relacionan el número de Sherwood (Sh) con los números de Reynolds (Re) y Schmidt (Sc) (Ecuación 3), permitiendo incorporar el efecto de la velocidad del aire (v) y de las propiedades del fluido sobre la intensidad del transporte convectivo. De esta manera, el modelo refleja la influencia directa de las condiciones operativas sobre la cinética de eliminación de humedad, en concordancia con lo reportado para procesos de secado convectivo de materiales vegetales (Sandoval-Torre, Leonard, Plougonven, Díaz-González, & Hernández-Bautista, 2022).

$$hm = \frac{Sh \cdot D_{AB}}{L_c} \quad (2)$$

$$Sh = 2 + 0.552 Re^{0.53} Sc^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

2.3 Formulación del modelo de transferencia de calor

De forma simultánea a la pérdida de humedad, el sólido experimenta un proceso de calentamiento debido al intercambio térmico con el aire caliente. La transferencia de calor se representó mediante un balance de energía, representado en la ecuación 4, que considera tanto el aumento de la temperatura del material (T) como el consumo energético asociado a la evaporación del agua contenida en la superficie.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{h_c}{L_e \cdot \rho \cdot C_p} \cdot (T - T_0) - \frac{\lambda v \cdot hm}{L_e \cdot C_p} \cdot (W_s - W_a) \quad (4)$$

$t = 0 \quad T = T_i$

El flujo de calor desde el aire hacia la superficie del cubo está controlado por el gradiente de temperatura, entre la temperatura del material y del secado (T₀) y por el coeficiente de transferencia de calor por convección (h_c). Dicho coeficiente se estimó mediante correlaciones basadas en el número de Nusselt (Nu) expresado en la Ecuación 5, el cual se expresa como función de los números de Reynolds y Prandtl (Pr), para cubos de Zanahoria (Yu et al., 2020). El número de Prandtl se determinó a partir de la temperatura del aire (Çengel & Ghajar, 2007), mientras que el número de Reynolds se calculó considerando las condiciones de flujo, identificándose un régimen laminar en todos los casos analizados.



$$\text{Nu} = 2 + 0.552 \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \text{Re}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

El balance energético incorpora un término asociado al calor latente de vaporización (λ), el cual representa la energía necesaria para el cambio de fase del agua durante el proceso de secado, así como la capacidad calorífica promedio de la zanahoria (C_p), que determina la energía requerida para elevar la temperatura del material. De este modo, el modelo integra de manera natural la interacción entre la transferencia de calor y la transferencia de masa, ya que la evaporación depende de la disponibilidad de energía térmica y, a su vez, influye en la evolución del contenido de humedad. La ecuación diferencial resultante describe la variación temporal de la temperatura del sólido, considerando como condición inicial la temperatura ambiente previa al proceso de secado.

2.4 Representación de la deformación volumétrica del material

La deformación del material se incorporó al modelo mediante una relación que vincula el cambio de volumen del sólido (V) con la pérdida de humedad durante el secado. A medida que el contenido de agua disminuye, la estructura celular de la zanahoria sufre una contracción progresiva, fenómeno conocido como encogimiento, que se traduce en una reducción de las dimensiones del cubo.

Este comportamiento se representó mediante un coeficiente de contracción volumétrica (α), mostrado en la ecuación 6, definido como la relación entre el volumen instantáneo del sólido y su volumen inicial (V_i). Dicho coeficiente permite cuantificar la magnitud de la deformación y su dependencia con el contenido de humedad. La formulación adoptada asume que el encogimiento se produce de manera continua a lo largo del proceso de secado, y que su fuerza motriz está determinada por la diferencia entre el contenido de humedad del material y su contenido de humedad de equilibrio (W_{eq}).

$$\frac{dV}{dt} = -\alpha \cdot (W - W_{eq}) \quad (6)$$

$t = 0 \quad V = V_i$

La inclusión de la deformación volumétrica permite actualizar dinámicamente la geometría del sólido, lo que afecta directamente parámetros como la longitud característica y el área de transferencia utilizados en los balances de masa y energía. En consecuencia, el modelo logra una representación más realista del comportamiento físico del material, al considerar la interacción entre los fenómenos de

transporte y los cambios estructurales inducidos por la deshidratación.

2.5 Implementación numérica y variables de análisis

La implementación numérica del modelo se realizó en el entorno Scilab–Xcos (Figura 1), mediante la representación en diagramas de bloques de las ecuaciones diferenciales que describen el balance de masa, el balance de energía y el encogimiento del sólido durante el proceso de secado, integrando de forma secuencial el cálculo de la longitud característica a partir de la geometría del material (a partir de V_0 y A_0), la evaluación de los números adimensionales de Schmidt, Reynolds, Sherwood y Nusselt, así como la determinación de las propiedades termodinámicas necesarias (Tabla 1), como la presión de saturación mediante la ecuación de Antoine. A partir de estas relaciones se obtuvieron los coeficientes de transferencia de masa y calor, los cuales se incorporaron en las ecuaciones diferenciales del contenido de humedad del sólido (W), la temperatura (T) y el volumen (V), resueltas de manera simultánea. La simulación se ejecutó para un tiempo total de 5 horas, con un paso de tiempo de 60s, y las salidas de las tres ecuaciones diferenciales fueron exportadas mediante el bloque “To workspace”, lo que permitió obtener 100 puntos de datos para cada variable y analizarlos posteriormente. Estas variables W , T y V constituyen los principales parámetros de análisis del modelo, ya que permiten evaluar la evolución cinética del secado, el comportamiento térmico del sólido y los cambios físicos asociados al encogimiento del material bajo las condiciones de operación establecidas



Figura 1. Diagrama de flujo de información del modelo.

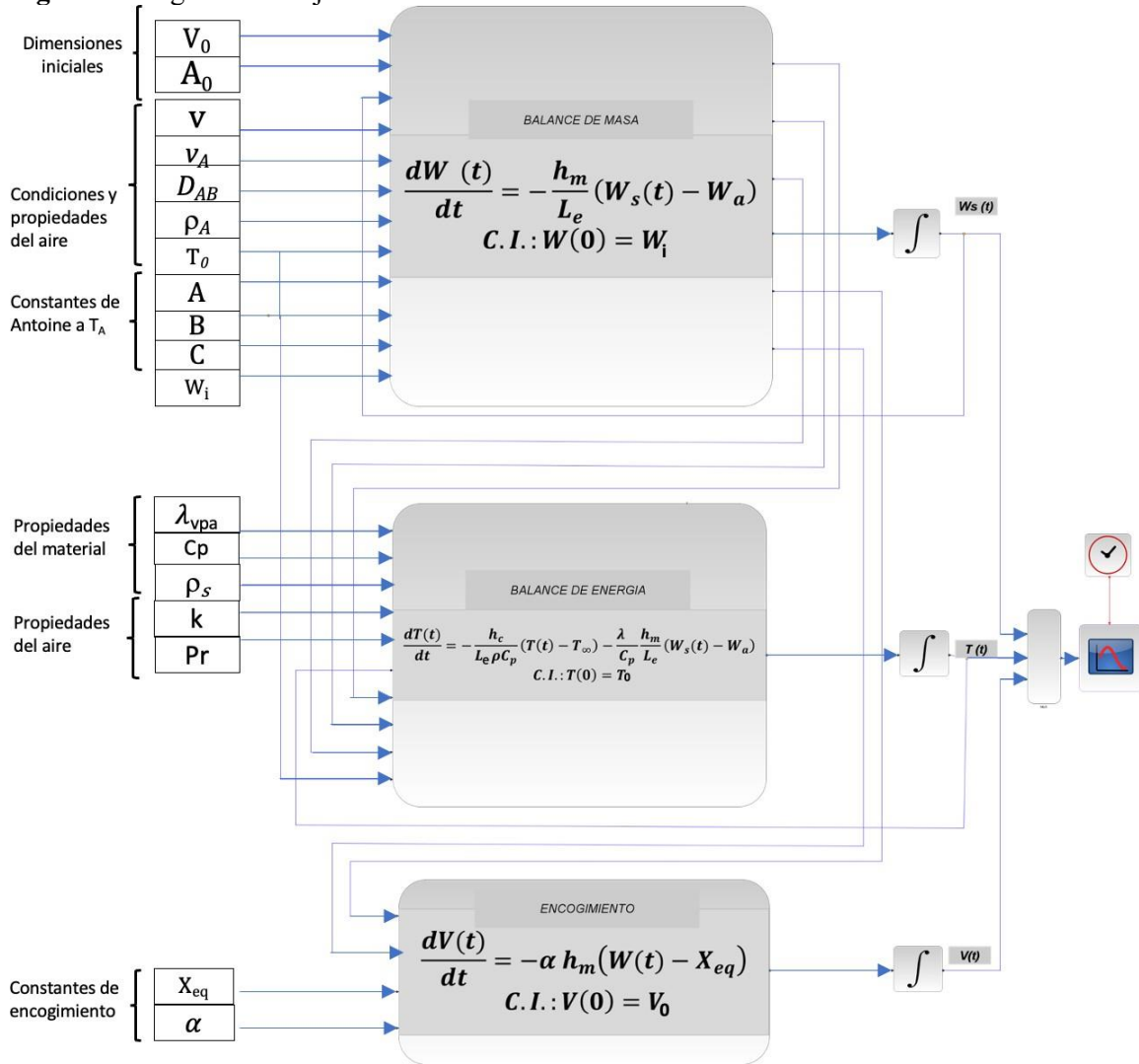


Tabla 1. Propiedades de la zanahoria y del aire utilizadas en el modelo.

Propiedad	Valor	Categoría /Fuente	Descripción
Ta	50 °C	Condiciones del proceso sección 3	Temperatura del aire
v	1.5 m/s	Condiciones del proceso sección 3	Velocidad del aire
A0	6 cm ²	Dimensiones de la zanahoria	Área inicial del cubo
V0	1 cm ³	Dimensiones de la zanahoria	Volumen inicial del cubo
v	1.798x10 ⁻⁵ m ² /s	Propiedades del aire	Viscosidad cinemática del
	1.092 kg/m ³	(Çengel & Ghajar, 2007)	aire Densidad del aire
ρa		Propiedades del aire (Çengel & Ghajar, 2007)	
Pr	1.8345	Propiedades del aire	Número de Prandtl
k	0.02735 W/m-K	(Çengel & Ghajar, 2007)	Conductividad térmica del
		Propiedades del aire	
λ	2256.5 kJ/kg	(Çengel & Ghajar, 2007) Propiedades del aire	Calor latente de
			vaporización del agua
		(Çengel & Ghajar, 2007)	
DAB	2.4x10 ⁻³ m ² /s	1082 Propiedades agua-aire (Çengel & Ghajar, 2007) Propiedades de la zanahoria (Moreno	Coefficiente de difusividad
	kg/m ³	agua-aire	
ρz		Riquero, 2020)	Densidad de la zanahoria
			húmeda
ρs	1490 kg/m ³	Propiedades de la zanahoria (Zogzas, Maroulis, & Marinos-Kouris, 1994) (Zogzas et al., 1994)	Densidad de la zanahoria seca
Cp	3918 J/kg °C	Propiedades de la zanahoria (Carrasquero D, 2001)	Capacidad calorífica de la zanahoria
Xeq	0.05 kg/kg	Propiedades de la zanahoria (Kiranoudis, Maroulis, Tsami, & Marinos-Kouris, 1993)(Zogzas et al., 1994)	Contenido de humedad de equilibrio

3.-Evaluación y validación del modelo matemático

Se realizaron pruebas de secado convectivo a 50 °C y una velocidad de aire de 1.5 m/s. Se emplearon cubos de zanahoria de 0.8 cm, 1 cm y 1.5 cm con el propósito de analizar la influencia de la geometría sobre la cinética de secado y contrastar dicha respuesta con las predicciones del modelo. Las muestras fueron colocadas dentro de la cámara de secado una vez que las condiciones operativas se mantuvieron constantes.

La medición de la temperatura se realizó mediante termopares tipo J, con un intervalo de registro de un minuto. Uno de los sensores se insertó en el interior de un cubo de zanahoria, mientras que el segundo se colocó en la cámara de secado para medir la temperatura del aire. Ambos termopares se conectaron a un sistema de adquisición de datos, el cual registró y almacenó automáticamente las mediciones a intervalos regulares. El peso de los cubos de zanahoria se registró manualmente utilizando una balanza analítica. Adicionalmente, el contenido de humedad inicial de las muestras se determinó mediante el método de secado en horno, pesando los cubos antes y después de someterlos a 105 °C durante 24 h. Los resultados obtenidos mediante simulación se compararon directamente con los datos experimentales, como se describen en la siguiente sección.

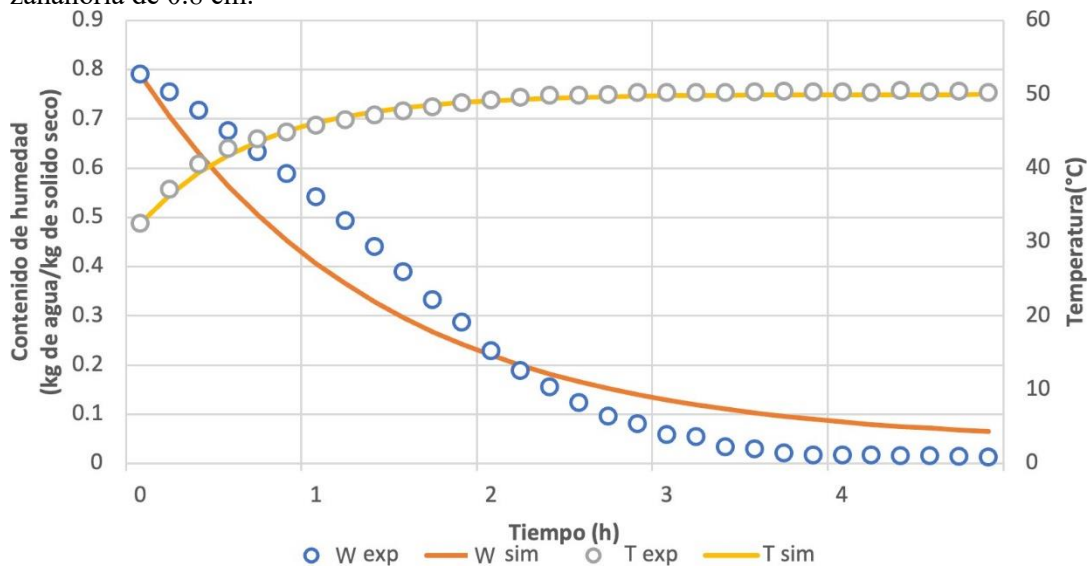
4. Resultados

En este apartado se presentan los resultados numéricos del secado por convección de aire caliente, junto con los datos experimentales obtenidos para diferentes tamaños de muestra. En todos los ensayos se mantuvieron constantes la temperatura y la velocidad del aire, mientras que la humedad relativa de secado no fue controlada.

La Figura 2 muestra la evolución del contenido de humedad y de la temperatura para cubos de zanahoria de 0.8 cm. El contenido de humedad presenta una disminución continua a lo largo del proceso, y la simulación reproduce adecuadamente la tendencia observada experimentalmente. En cuanto a la temperatura, se observa un incremento rápido durante la etapa inicial, seguido de una estabilización cercana a la temperatura del aire de secado (50 °C), con una buena correspondencia entre los datos experimentales y los simulados ($R = 0.979$).

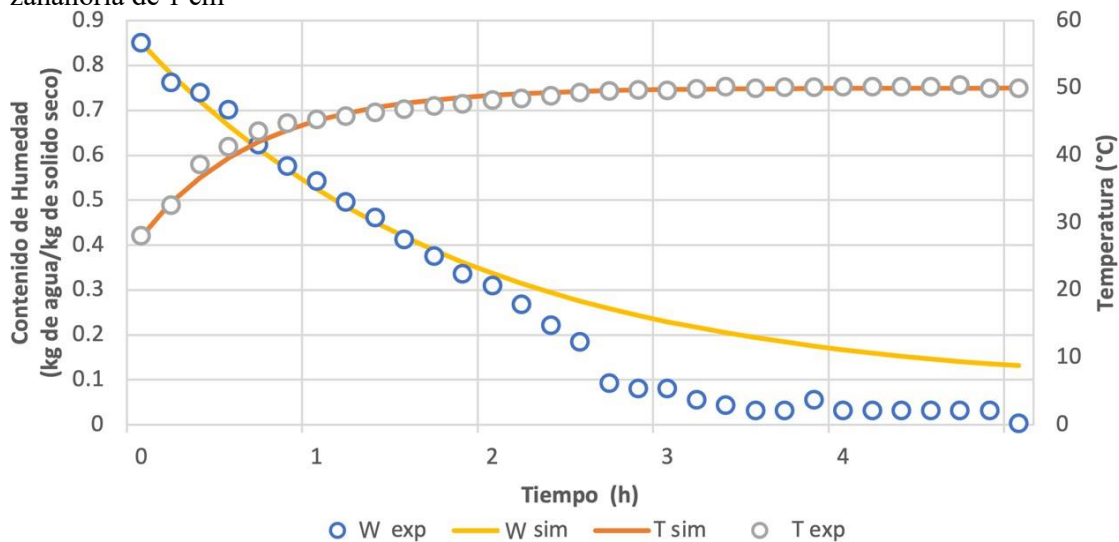


Figura 2. Datos experimentales y simulados de temperatura y contenido de humedad de cubos de zanahoria de 0.8 cm.



La Figura 3 presenta los resultados correspondientes a cubos de 1 cm. En este caso, la evolución del contenido de humedad es bien capturada por el modelo durante las primeras horas del proceso, aunque se aprecia una ligera sobreestimación del contenido de humedad en la etapa final. La evolución de la temperatura muestra un comportamiento similar al observado en el caso anterior, alcanzando rápidamente el equilibrio térmico con el aire de secado, con un coeficiente de correlación de 0.99 entre los datos simulados y experimentales.

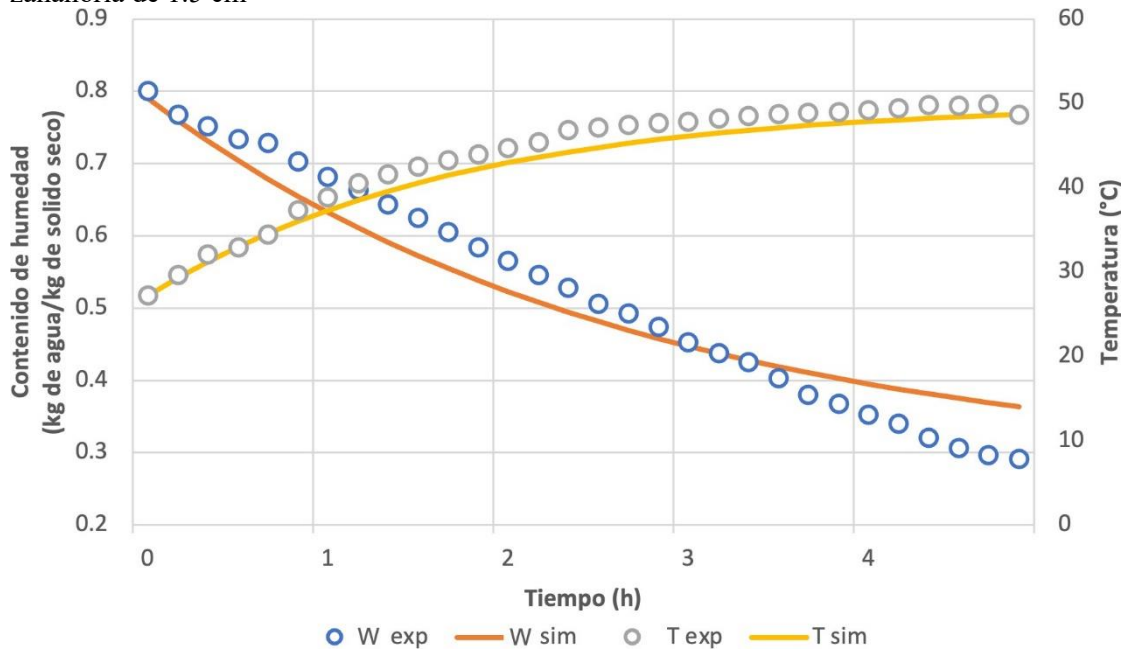
Figura 3. Datos experimentales y simulados de temperatura y contenido de humedad de cubos de zanahoria de 1 cm



En la Figura 4 se muestran los resultados para cubos de 1.5 cm. El contenido de humedad experimental exhibe la respuesta típica de un proceso de secado, mientras que la simulación mantiene una concordancia general, con desviaciones más notorias en la segunda mitad del proceso. A pesar de ello,

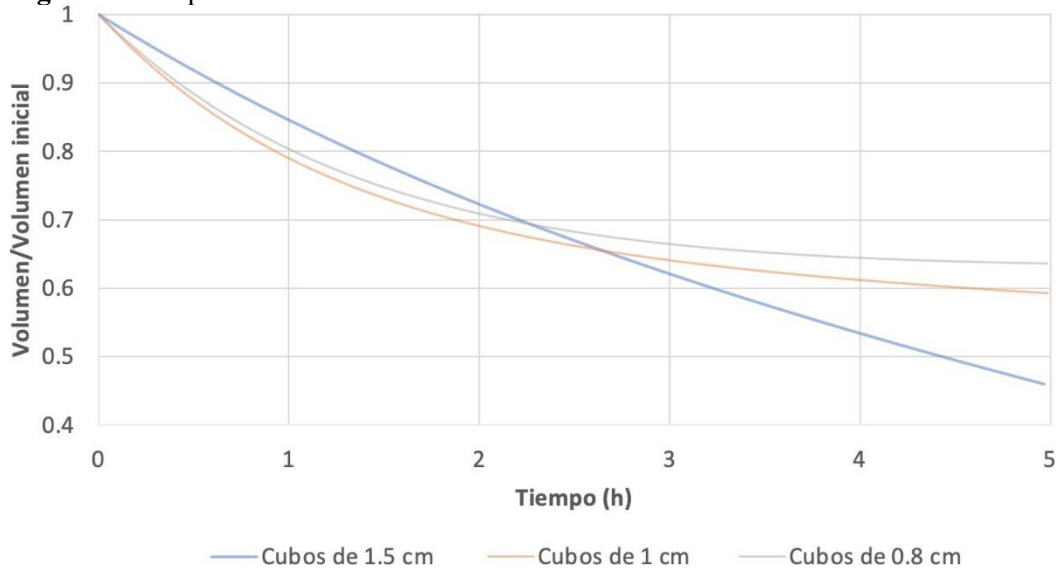
la correlación entre ambos conjuntos de datos se mantiene elevada ($R = 0.98$). La evolución de la temperatura sigue el mismo patrón observado para los tamaños menores, alcanzando el equilibrio térmico alrededor de los 50 °C, con un alto grado de ajuste entre la simulación y los datos experimentales ($R = 0.995$).

Figura 4. Datos experimentales y simulados de temperatura y contenido de humedad de cubos de zanahoria de 1.5 cm



Finalmente, la Figura 5 muestra la variación del volumen de los cubos de zanahoria durante el secado para los tres tamaños evaluados. En todos los casos se observa una contracción progresiva asociada a la pérdida de agua y al encogimiento estructural del material. Sin embargo, la magnitud de la reducción de volumen depende del tamaño inicial del cubo: los cubos de 1.5 cm presentan la mayor contracción total, seguidos por los de 1 cm, mientras que los cubos de 0.8 cm muestran la menor disminución volumétrica.

Figura 5. Comportamiento de la contracción de los cubos de zanahoria Conclusiones



En este trabajo se implementó y evaluó un modelo matemático de carácter fenomenológico para describir de manera acoplada los procesos de transferencia de masa, transferencia de calor y deformación volumétrica durante el secado convectivo de cubos de zanahoria. La formulación propuesta, resuelta numéricamente en el entorno Scilab–Xcos, permitió representar la cinética de secado, la evolución térmica del sólido y el encogimiento asociado a la pérdida de humedad, mostrando una concordancia razonable con los resultados experimentales obtenidos bajo condiciones de operación controladas.

El modelo global de parámetros concentrados, sustentado en números de Biot menores a 0.1, describió satisfactoriamente la evolución temporal del contenido de humedad y la temperatura del sólido para los tres tamaños de cubos evaluados (0.8, 1.0 y 1.5 cm).

Las predicciones del contenido de humedad mostraron una buena correspondencia con los datos experimentales, con desviaciones moderadas en la etapa final del secado para los cubos de mayor tamaño, atribuibles a simplificaciones inherentes al enfoque global y a la no consideración explícita de gradientes internos.

La evolución de la temperatura del material fue reproducida con alta precisión, alcanzando rápidamente el equilibrio térmico con el aire de secado, con coeficientes de correlación superiores a 0.97 en todos los casos analizados.

La inclusión explícita del encogimiento permitió capturar la contracción volumétrica progresiva del

material, evidenciando que la magnitud de la deformación depende de la dimensión inicial del cubo, siendo más pronunciada en muestras de mayor tamaño.

La actualización dinámica de la geometría del sólido influyó directamente en los parámetros de transferencia, particularmente en la longitud característica, mejorando la representación física del proceso frente a modelos que asumen geometría constante.

La implementación en un entorno de código abierto como Scilab–Xcos demostró ser una alternativa viable y flexible para la simulación de procesos de secado convectivo, con potencial aplicación en el análisis, diseño y optimización de equipos de secado agroindustrial.

En conjunto, los resultados confirman que el modelo propuesto puede servir como base para futuras extensiones, tales como la incorporación de humedad relativa variable del aire, propiedades dependientes del estado del material o estrategias de control orientadas a mejorar la eficiencia energética y la calidad del producto final.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aversa, M., Curcio, S., Calabrò, V., & Iorio, G. (2007). An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process. *Journal of Food Engineering*, 78(3), 922-932. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.12.005>

Aversa, M., Curcio, S., Calabrò, V., & Iorio, G. (2010). Transport Phenomena Modeling During Drying of Shrinking Materials. En *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 28, pp. 91-96). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(10\)28016-1](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(10)28016-1)

Białobrzewski, I., Zielińska, M., Mujumdar, A. S., & Markowski, M. (2008). Heat and mass transfer during drying of a bed of shrinking particles – Simulation for carrot cubes dried in a spout-fluidized-bed drier. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(19- 20), 4704-4716. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.02.031>

Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2007). *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications*. New York, NY: McGraw-Hill Education.

Curcio, S., & Aversa, M. (2009). *Transport Phenomena and Shrinkage Modeling During Convective Drying of Vegetables*.



- Curcio, S., & Aversa, M. (2014). Influence of shrinkage on convective drying of fresh vegetables: A theoretical model. *Journal of Food Engineering*, 123, 36-49. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.09.014>
- Curcio, S., Aversa, M., Calabrò, V., & Iorio, G. (2008). Simulation of food drying: FEM analysis and experimental validation. *Journal of Food Engineering*, 87(4), 541-553. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.01.016>
- Giraldo-Zuniga, A. D., Arévalo-Pinedo, A., Silva, A. F., Silva, P. F., Valdes-Serra, J. C., & Pavlak, M. C. D. M. (2010). Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 30(1), 179-182. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612010000100027>
- Kiranoudis, C. T., Maroulis, Z. B., Tsami, E., & Marinos-Kouris, D. (1993). Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables. *Journal of Food Engineering*, 20(1), 55-74. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(93\)90019-G](https://doi.org/10.1016/0260-8774(93)90019-G)
- Mujumdar, A. S. (2001). DRYING TECHNOLOGY IN AGRICULTURE AND FOOD SCIENCE. *Drying Technology*, 19(6), 1217-1218. <https://doi.org/10.1081/DRT-100104817>
- Mujumdar, A. S. (Ed.). (2014). *Handbook of Industrial Drying* (0 ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17208>
- Palacios, A., & Plúas, V. (2021). *Modelado de un secador de bandeja por lotes como un módulo integrado a un simulador de procesos comercial en la elaboración de bebidas nutracéuticas*. (Tesis de grado). Guayaquil, Ecuador. Recuperado de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/54380/1/T-110339%20-%20ANDREA%20PALACIOS%20Y%20VICKY%20PL%20C3%29AAS.pdf>
- Sandoval-Torre, S., Leonard, A., Plougouven, E., Díaz-González, M., & Hernández-Bautista, E. (2022). Drying model to predict the deformation of tuberous crop. *Proceedings of the 22nd International Drying Symposium on Drying Technology - IDS '22*. Presentado en 22nd International Drying Symposium. Worcester, MA, USA: Worcester Polytechnic Institute - Gordon Library. <https://doi.org/10.55900/yxfpiprt>



- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2025). *Índice de Volumen Físico (IVF) de la producción agropecuaria. Noviembre de 2025*. México: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Recuperado de Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural website: <https://nube.agricultura.gob.mx/IVF/noviembre2025.php>
- Yu, X.-L., Zielinska, M., Ju, H.-Y., Mujumdar, A. S., Duan, X., Gao, Z.-J., & Xiao, H.-W. (2020). Multistage relative humidity control strategy enhances energy and exergy efficiency of convective drying of carrot cubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *149*, 119231. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119231>
- Zhang, W.-P., Yang, X.-H., Mujumdar, A. S., Ju, H.-Y., & Xiao, H.-W. (2022). The influence mechanism and control strategy of relative humidity on hot air drying of fruits and vegetables: A review. *Drying Technology*, *40*(11), 2217-2234. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1943669>
- Zogzas, N. P., Maroulis, Z. B., & Marinou-Kouris, D. (1994). DENSITIES, SHRINKAGE AND POROSITY OF SOME VEGETABLES DURING AIR DRYING. *Drying Technology*, *12*(7), 1653-1666. <https://doi.org/10.1080/07373939408962191>

