

Modelos cinéticos de secado en biomasa con corriente de aire

Ignacio Gándia¹, Isabel López Cortes¹, Borja Velázquez Martí^{2*}

¹Departamento de Producción Vegetal, Universitat Politècnica de Valencia,
Camino de Vera s/n 46022 Valencia (España)

²Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria, Universitat Politècnica de Valencia,
Camino de Vera s/n 46022 Valencia (España)

*borvemar@dmata.upv.es

Resumen

En el ámbito del secado convectivo, se han propuesto diversos modelos por distintos grupos de investigación, tanto teóricos como empíricos. Sin embargo, la investigación en modelos matemáticos teóricos han sido pocos estudiados y los modelos empíricos actuales presentan dificultades en su implantación en otras investigaciones. Esto sugiere enfocar nuevas investigaciones en la obtención de modelos adaptables a diferentes especies y condiciones ambientales. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue analizar el estado actual de la investigación en el proceso de secado y transferencia de masa, donde se concluye que el secado es un proceso matemáticamente complejo que debe modelarse en dos etapas: etapa de velocidad de secado constante y etapa de velocidad de secado decreciente. La modelización de la fase de secado constante se puede basar en la ecuación de transferencia de masa por convección, aunque las predicciones del coeficiente con analogías a la transferencia de calor no son precisas y presenta no desviaciones cuando son aplicados a procesos de secado de biomasa. La modelización de la fase de secado con velocidad variable debe centrarse en la variación de la difusividad del agua en los materiales porosos o la permeabilidad del vapor en función de la humedad y temperatura del material. Por lo que se requiere generar una base de datos de ecuaciones homogeneizadas particularizadas para cada material para predecir velocidades y tiempos de secado en condiciones de convección predeterminadas. Esto representa un desafío científico y sugiere que la investigación en cinética de secado aún necesita desarrollo.

Palabras clave: cinética de secado, tiempo de secado, biomasa, bioenergía, tratamiento biomasa, biocombustibles.

Abstract

In the area of convective drying, numerous models have been proposed by various research teams, encompassing both theoretical and empirical approaches. However, the exploration of theoretical mathematical models has been limited and requires further development. Empirical models face challenges when applied to other studies. It is recommended that future research focus on creating models that can be adapted to different species and environmental conditions. This study aimed to assess the current state of research in the drying and mass transfer process. It was found that drying is a mathematically intricate process that needs to be modeled with differential equations in two distinct stages: a constant drying rate stage and a decreasing drying rate stage. The modeling of the constant drying phase can utilize the convective mass transfer equation, although predicting the coefficient using heat transfer analogies shows discrepancies with biomass. The modeling of the variable drying rate phase should concentrate on the changes in water diffusivity in porous materials or vapor permeability based on the material's humidity and temperature. A comprehensive database of homogenized equations tailored to each material is necessary to accurately predict drying rates and times under specific convection conditions. This presents a scientific challenge and indicates that further research in drying kinetics is still needed.

Key words: drying kinetics, drying time, biomass, bioenergy, biomass treatment, biofuels.

Introducción

El secado es un proceso consistente en eliminar la humedad de un material hasta un nivel deseado. Éste es comúnmente utilizado en la producción de biocombustibles sólidos. Sin embargo, a pesar de que es un proceso frecuente, su modelación matemática para la predicción de energía y tiempo empleado en el proceso no ha sido completamente desarrollada debido a la dependencia de múltiples factores y variantes del proceso (Kudra y Mujumdar, 2009; Mujumdar, 2007; Chávez *et al.*, 2021). La porosidad y la estructura química de la biomasa hace que las partículas de agua que contiene estén sometidas a capilaridad, y fuerzas electrostáticas, como puentes de hidrógeno fuerzas de van der Waals. La variabilidad de las estructuras biomásicas hace que no se puedan dar valores generales a los parámetros que tienen los modelos matemáticos de predicción de velocidad de secado de la biomasa. En este capítulo se pretende realizar una revisión de las propuestas que han realizado distintos investigadores, proponiendo un procedimiento estandarizado de evaluación que se ajuste lo más posible a la realidad física.

Generalmente, antes de iniciar el proceso de secado para la producción de biocombustibles sólidos, se suele preparar el material mediante una trituración o molienda. La trituración es la fragmentación del material hasta un tamaño de partículas de pocos centímetros (3 a 5 cm). La molienda es la reducción del tamaño de partícula a menos de 3 mm. Tras la reducción de tamaño, el material puede ser combustionado directamente o ser transformado en otros biocombustibles. Los materiales triturados pueden ser transformados a carbón vegetal. El material molido puede ser usado para la fabricación de pellets o briquetas. Aunque probablemente existen experimentos de secado de partículas pequeñas, lo habitual es realizar secado en material astillado o triturado, con tamaño de partícula mayor a 3 cm. Obviamente el tamaño de partícula pequeño

aumenta la superficie de transferencia de masa, pero el manejo de esas partículas es más dificultoso.

Tras la reducción del tamaño de partícula, hay varios métodos de secado disponibles: Los métodos comunes incluyen:

- Secado por aire: Es el método más comúnmente utilizado; implica el uso de aire para evaporar la humedad del material. La corriente de aire puede ser forzada o natural. EL aire absorbe las partículas de agua por difusión y convección (Sychevskii, 2018; Saha, 2006).

- Secado al vacío: Se utiliza una presión negativa reducida sobre la superficie para acelerar el proceso de evaporación. Esta presión influye en la difusión de partículas en el interior de los poros de la biomasa y por tanto aumenta la velocidad de transferencia de masa.

- Secado por radiación: En este proceso, la energía radiante es absorbida por el material, lo que provoca la evaporación del agua. La radiación electromagnética puede provenir de diversas fuentes, como radiadores eléctricos, lámparas infrarrojas, microondas u otras fuentes de energía radiante. Cuando la radiación alcanza el material húmedo, parte de la energía se absorbe y se convierte en calor. Este calor provoca la evaporación del agua, permitiendo que escape del material en forma de vapor. El secado por radiación puede ser selectivo, ya que los diferentes materiales tienen diferentes capacidades de absorción, lo que afecta la velocidad y eficiencia del proceso de secado. Por ejemplo, el material puede comportarse transparente a las microondas que interaccionarán exclusivamente sobre las moléculas de agua, donde se genera el calor de evaporación.

- Secado por liofilización: Implica congelar el material y luego eliminar el agua mediante sublimación en condiciones de vacío.

La duración del proceso varía según el método utilizado, el tipo de material, porosidad y el nivel de humedad requerido. Durante el proceso de secado, es importante controlar varios parámetros como tamaño de partícula, la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del aire, y la presión de vacío en su caso. Es importante destacar que el proceso de secado puede ser crítico en el balance de energía en la producción de biocombustibles. La eficiencia energética es una consideración importante durante el diseño e implementación de sistemas de secado industriales (Siau, 1995). Es por ello, por lo que la modelización matemática para la predicción del tiempo y calidad del proceso se convierte en un reto científico que es necesario trabajar.

Por otro lado, el secado es también un proceso muy utilizado en la industria agroalimentaria y farmacéutica (por ejemplo, el secado de alimentos o maderas), por lo que su conocimiento en profundidad se torna necesario para poder optimizarlo.

Así, las dificultades técnicas de la modelización predictiva de los procesos de secado han llevado a desarrollar curvas empíricas que, si bien permiten obtener con relativa sencillez los resultados del proceso (Mills, 1995; Baroni y Hubinger, 1998; Tremblay *et al.*, 2000), sólo permiten su aplicación en las condiciones dadas en el momento y lugar de la experimentación, no pudiendo así transportarse dicho proceso a otras condiciones y obtener los mismos resultados.

$$\dot{m}_w = D_w \cdot \rho_{aire} \frac{(\omega_{sat} - \omega_{aire})}{L_c} \quad (1)$$

$$\dot{m}_w = h_m \cdot \rho_{aire} \cdot (\omega_{sat} - \omega_{aire}) \quad (2)$$

$$\dot{m}_w = K \cdot (x - x_e) \quad (3)$$

Por otra parte, un grupo significativo de investigadores han tratado de modelizar el secado a partir de los fenómenos de transferencia

de masa. Con respecto a ello, se encuentran dos tendencias en el acervo científico, por un lado, los que modelizan el secado a partir de la difusividad por la Ley de Fick (ecuación 1), y la convección de masa (ecuación 2); por otro lado, los que consideran un modelo simplificado de transferencia de masa donde la velocidad de secado es proporcional a la diferencia entre la humedad del material en cada instante y la humedad del material en equilibrio (ecuación 3) ((Dj. Dedic, 2002; Jalili *et al.*, 2013; Khamtree *et al.*, 2020; Koukouch *et al.*, 2020; Kuznetsov *et al.*, 2021).

donde $\dot{m}_w$ es el caudal másico de partículas de agua en el proceso de secado ($\text{g agua m}^{-2} \text{s}^{-1}$), D_w es la difusividad de masa ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), ρ_{aire} es la densidad del aire a la temperatura media del proceso, ω_{sat} la humedad del aire saturado en la superficie del material, ω_{aire} la humedad absoluta del aire, L es la distancia donde se produce la diferencia de humedad en el aire, h_m es el coeficiente de transferencia de masa por convección (m s^{-1}), K es la resistencia global de transferencia de masa ($\text{g sólido m}^{-2} \text{s}^{-1}$), x es la humedad del material en un determinado instante y x_e es la humedad del material en el equilibrio.

Sin embargo, estos modelos no funcionan con precisión debido a una serie de factores influyentes, como la porosidad de los materiales, distribución de tamaño de poro, capilaridad y fuerzas electroestáticas. Estos factores hacen que la difusividad dentro del material no sea constante, y por ende, tampoco lo sea la transferencia en la interfase sólido aire (Chandra y Taludkar, 2010).

Diversos modelos de transferencia de masa intentan predecir el valor de h_m a partir del número de Sherwood, el cual a su vez depende del número de Reynolds y del número de Smith siguiendo correlaciones análogas a las que se utilizan el modelo de transferencia de calor, dónde se sustituye el número de Nusselt por el

número de Sherwood, y el número de Prandtl por el número de Smith. Sin embargo, una de las limitaciones más importantes de estos modelos es que estos números dependen principalmente de las propiedades del flujo de aire utilizado en el proceso de secado, pero también dependen de la difusividad, la cual en la mayoría de los materiales no está bien determinada, puesto que no es constante sino variable con la humedad para una determinada estructura porosa (Rémond y Almeida, 2011; Tarmian *et al.*, 2012). Esto supone un reto científico no abordado todavía con suficiente profundidad. Un estudio interesante para la determinación de esta variabilidad de la difusividad es el presentado por Haya *et al.* (2024). Los cuales presentan un prototipo patentado para esta finalidad.

En la Tabla 1 se muestra un conjunto de trabajos que reportan la variabilidad de la difusividad con la humedad. Sin embargo, no proporcionan ecuaciones sino gráficas para su determinación.

Tabla 1. Trabajos que reportan la variabilidad de la difusividad con la humedad.

Mass diffusivity of low-density fibreboard determined under steady- and unsteady-state conditions: Evidence of dual-scale mechanisms in the diffusion	(Rémond y Almeida, 2011)
Moisture diffusion coefficient of reaction woods: compression wood of <i>Picea abies</i> L. and tension wood of <i>Fagus sylvatica</i> L.	(Tarmian <i>et al.</i> , 2012)
Characterization of sorption behavior and mass transfer properties of four central africa tropical woods: Ayous, Sapele, Frake, Lotofa	(Simo-Tagne <i>et al.</i> , 2016)
Experimental determination of the convective heat and mass transfer coefficients for wood drying	(Tremblay <i>et al.</i> , 2000)
Modification of mass transfer properties in poplar wood (<i>P. robusta</i>) by a thermal treatment at high temperature	(Rousset <i>et al.</i> , 2004)

Comparison of moisture diffusion coefficients for pine, oak and linden wood	(Perkowski <i>et al.</i> , 2017)
---	----------------------------------

Un aspecto clave en la modelización del proceso de secado es el valor del número de Biot en la transferencia de masa (ecuación 4). Este número relaciona la velocidad de transferencia de masa por difusión dentro del material y la transferencia de masa por convección en la superficie.

$$Biot = \frac{h_m \cdot L_c}{D_w} \quad (4)$$

Un número de biot grande indicaría que la velocidad de transferencia de agua en la superficie es significativamente mayor que la movilidad del agua por el material. Esto provocaría la aparición de gradientes de humedad. Las capas de material más superficiales tendrían una humedad menor que las capas más profundas. El número de biot elevado va asociado a un alto coeficiente de transferencia de masa por convección junto una longitud característica grande. Un número de biot pequeño implica una alta difusividad del agua por el material, asociado a un coeficiente de transferencia de masa por convección y tamaños de partículas reducidos. Entonces la variación de humedad en el proceso de secado puede considerarse homogénea sin la aparición de gradientes.

La aparición o no de gradientes de humedad en los materiales durante el proceso de secado dificulta muchísimo la modelización. Por otra parte, no existe un acuerdo generalizado del valor del número de biot a partir del cual se deberían utilizar modelos que consideren estos gradientes, o modelos que consideren la humedad uniforme durante el proceso.

Un gran problema de los modelos de transferencia de masa es que están influenciados por la temperatura a la que se produce el proceso y por el consumo de calor latente en el cambio de estado. Por tanto, se deben desarrollar modelos con estas consideraciones.

El objetivo de este trabajo ha sido analizar el estado actual de las investigaciones publicadas sobre el proceso de secado y transferencia de masa.

Proceso de secado con aire

Para conocer a profundidad como se encuentra en estos momentos la investigación referente al secado de madera, primero es necesario comprender el proceso. El secado es en realidad una transferencia de masa, esto es el intercambio de masa entre dos sistemas debido a dos procesos, la difusión en el interior del material y la convección en la superficie (Faghri *et al.*, 2010). La difusión es el resultado del movimiento aleatorio de moléculas a nivel microscópico y se produce por la diferencia de concentración de agua, provocando un movimiento de dichas partículas desde zonas de alta concentración a zonas de baja concentración (Çencel y Ghajar, 2011). En la convección, al movimiento de moléculas a nivel microscópico hay que sumarle el movimiento masivo a nivel macroscópico del agua, debido a la acción de un fluido en movimiento sobre la superficie de una masa (Faghri *et al.*, 2010; Çencel y Ghajar, 2011).

En el caso del secado con aire caliente con movimiento forzado, donde una corriente de aire aporta el calor superficialmente para la evaporación y arrastra posteriormente las partículas desprendidas, la difusión en la superficie podría calificarse como un proceso menor, debido a que el intercambio de masa que esta produce es tan bajo que se torna despreciable, dominando en el proceso la convección.

En un proceso de secado de una lámina de agua Keen (1914), Fisher (1923; 1927), Sherwood (1929a y b; 1930; 1932) y Sherwood y Comings (1933) determinaron las condiciones de cálculo de D_w y h_m a partir del número de Reynolds y el número de Schmidt para que las ecuaciones (1) y (2) fueran aplicables, pero consideran sus

valores constantes durante el proceso. En general sus determinaciones siguen siendo aplicables mientras la masa porosa se encuentre saturada de agua. Sin embargo, una vez la humedad sea menor a la saturación es necesario adecuar los modelos puesto que D_w y h_m van variando en función de la humedad y la temperatura. Por otra parte, no consideran los fenómenos de transferencia de calor que están íntimamente ligados a los de transferencia de masa en un proceso de secado.

Para abordar estas consideraciones, los investigadores del secado lo han tratado en dos vertientes. Por un lado, algunos equipos de investigación optaron por una línea basada en obtener ecuaciones que describen el proceso a partir de datos obtenidos de forma experimental a través de gráficos de secado (investigación empírica) y, por otro, que optaron por profundizar en el modelo matemático que describe el proceso obteniendo parámetros con significado físico (investigación teórica predictiva).

Investigación empírica del proceso.

Algunas investigaciones experimentales como las de Babiak y Kudela (1995), demuestran distintas fases de secado. Primer periodo de velocidad de secado constante *constant-rate period*, cuando la humedad es superior al punto de saturación de las fibras (*FSP*). Tras este punto, se inicia un periodo donde la velocidad de secado decrece rápidamente, llamado *falling-rate period*. Cuando la humedad alcanza el punto de equilibrio, la velocidad de secado llega al valor cero.

La definición del *FSP* ha sido muy debatida hasta el momento. Zelinka *et al.* (2016) definió un nuevo punto del proceso (basado en soluciones termodinámicas) distinto del *FSP*, llamado contenido crítico de humedad (x_c), que es el más preciso a la hora de establecer el punto de transición del periodo de velocidad de secado constante al periodo con velocidad de secado decreciente.

En las investigaciones de Inoué *et al.* (2010), estudiando los efectos de la temperatura en bulbo seco y húmedo en los tiempos de secado de materiales en procesos convectivos con aire forzado en condiciones ambientales, aire forzado caliente y con vapor sobrecalentado, indicaron que la humedad crítica del material no era una característica fija del mismo, sino que dependía de la temperatura del aire y de la velocidad de secado en el periodo constante. La velocidad de secado constante la calculaba a partir de la transferencia de calor, mediante la ecuación (5), donde h es el coeficiente de transferencia de calor combinado de convección y radiación (W/m²K), T es la temperatura del bulbo seco (K), T_{bh} es la temperatura del bulbo húmedo, y λ_w es el calor latente de evaporación específico a temperatura del proceso (J/kg).

$$\dot{m}_w = \frac{h \cdot (T - T_{bh})}{\lambda_w} \quad (5)$$

Inoué *et al.* (2010) propusieron un modelo de regresión lineal para el cálculo de la humedad crítica (x_c), obteniendo un coeficiente de determinación $R^2=0.97$

$$x_c = 0.063829 \cdot \dot{m}_w - 0.00168 \cdot T_{bh} + 0.250371$$

Con ello, concluyeron que el punto crítico de humedad es bajo con temperaturas del bulbo húmedo altas y constante a temperaturas bajas. Es muy importante este estudio del punto crítico de humedad del material estudiado, pues puede resultar muy útil para ayudar a determinar el punto final del proceso de secado. Una vez predicho la humedad crítica para el periodo con velocidad de secado constante, Chanpet *et al.* (2020) describe la cinética como:

$$\dot{m}_w = -\frac{m_0}{A} \frac{dx}{dt} \quad \text{ó} \quad \frac{dx}{dt} = -\dot{m}_w \frac{A}{M_0} = -k_l$$

$$x = x_0 - k_l t = x_0 - \dot{m}_w \frac{A}{M_0} t$$

donde $\dot{m}_w$ es la velocidad de secado (g de agua/s m²), m_0 y A son la masa seca (g) y su área de transferencia de humedad (m²), x humedad del solido en base seca.

Para el periodo con ratio de secado decreciente, Chanpet *et al.* (2020) la cinética de secado la define como:

$$\dot{m}_w = -\frac{m_0}{A} \frac{dx}{dt} = K(x - x_e) \quad \text{para} \quad \omega < \omega_s$$

$$\frac{dx}{x - x_e} = -K \frac{A}{m_0} dt$$

$$\ln \ln \frac{x - x_e}{x_c - x_e} = -K \frac{A}{m_0} t$$

$$\frac{x - x_e}{x_c - x_e} = e^{-K \frac{A}{m_0} t}$$

donde x_c es el contenido de humedad crítico que separa el periodo con ratio de secado constante del periodo con ratio de secado decreciente, y x_e es la humedad en el equilibrio. El primer término de la ecuación se denomina Ratio de humedad MR (Dedić, 2002; Kumar, *et al.*, 2012; Promtong, 2012), tal que:

$$MR = \frac{x - x_e}{x_c - x_e}$$

Hay amplios estudios que relacionan la variación del ratio de humedad (MR) con tiempo en un proceso de secado, tales como los de Wang y Brennan (1992, 1993a, 1993b), Simal *et al.* (1994, 1995, 1998), Haroni y Hubinger (1998) y Velic *et al.* (2004). Todos ellos usaron modelos empíricos mostrados en la Tabla 2, que son aplicables en el periodo de secado de velocidad decreciente, obteniendo los coeficientes para condiciones particulares.

Un ejemplo de investigación empírica es el trabajo de Khamtree *et al.* (2019), quienes probaron todos los modelos empíricos de la Tabla 2, para el cálculo de la cinética de secado del caucho

Tabla 2. Modelos de cálculo del ratio de humedad (MR) en los porcesos de secado.

Model name	Model equation	Reference
Page	$MR = \frac{x - x_e}{x_0 - x_e} = \exp(-k, t^n)$	Page (1949)
Henderson y Pabis	$MR = \frac{x - x_e}{x_0 - x_e} = a * \exp(-k, t)$	Henderson (1961)
Logarithmic	$MR = \frac{x - x_e}{x_0 - x_e} = \exp(-k, t) + c$	Togrul and Pehlivan (2002)
Two-term exponential	$MR = \frac{x - x_e}{x_0 - x_e} = \exp(-k, t) + (1 - a)\exp(-k, a, t)$	Chandra and Singh (1995)
Diffusion approach	$MR = \frac{x - x_e}{x_0 - x_e} = \exp(-k, t) + (1 - a)\exp(-k, b, t)$	Kumar <i>et al.</i> (2012)

con un secador de aire caliente. De cada uno se obtuvieron los parámetros de las constantes para casos particulares. El modelo que mejor se adaptaba a los datos experimentales obtenidos en el secado de caucho era el de Henderson (1961) para el cual llegan a obtener que para una temperatura de secado de 90 °C el valor de k es igual a 0.0008, y el de a es igual a 1.038 (con una $R^2=0.9963$ y un error cuadrático medio de 0.00015). No obstante, los coeficientes a y k se ven influenciados por la temperatura del proceso de tal manera que, a medida que la temperatura aumenta, la velocidad de secado también era mayor. También indicaron que las propiedades físicas del caucho podrían variar y las ecuaciones obtenidas no son aplicables a diferentes cauchos. Además, las condiciones de su experimentación podrían no hacer aplicable este modelo a otros procesos de secado con diferentes condiciones de ensayo.

Ananias *et al.* (2020) propusieron una estimación del valor de la resistencia global de transferencia de masa (K) a través de la ecuación:

$$\frac{1}{K} = \alpha_0 \exp\left(\frac{c_0}{T_K}\right) e + b_0 \exp\left(\frac{c_0}{T_K}\right) v^{-P} \exp\left(\frac{-Z}{x_{FSP} - x_e}\right)$$

donde $x_{FSP} - x_e$ es la diferencia entre el punto de saturación de las fibras y el contenido de

humedad en el equilibrio para una temperatura del aire y humedad relativa específicas. T_K es la temperatura en grados Kelvin (K) y e es el espesor de los sólidos a secar, v es la velocidad del aire. Los parámetros de esta ecuación particularizados para maderas de picea (*Picea abies*) y haya (*Fagus sylvatica*) establecen el modelo:

$$\frac{1}{K} = 0.12 \exp\left(\frac{2683}{T_K}\right) e + 23.9 \exp\left(\frac{2683}{T_K}\right) v^{-0.8} \exp\left(\frac{\frac{HR}{100} - 1}{x_{FSP} - x_e}\right)$$

Nótese que la resistencia global de la transferencia de masa sólo depende de la temperatura del proceso, humedad de saturación de fibra y humedad en el equilibrio. La humedad de saturación de la fibra (x_{FSP}) podría aproximarse a la humedad crítica (x_c).

Mierzwa y Musielak (2023) para comparar la efectividad de los diferentes métodos de secado desde el punto de vista cinético, evaluaron la constante de secado β . Para ello, asumieron que la ratio de evaporación del material secado es proporcional a la diferencia entre la masa en un instante (m) y la masa en el equilibrio húmedo (m_e):

$$\frac{dm}{dt} = -\beta \cdot (m - m_e)$$

donde m_e es el equilibrio en la muestra de masa.

Así, obtuvieron la siguiente solución a la ecuación anterior:

$$m = m_e + C \cdot e^{-\beta t}$$

Obteniendo el valor de la constante de secado C de forma experimental.

Chandra y Talukdar (2010) continuaron su línea de investigación modelizando procesos de secado de materiales porosos y húmedos a partir de datos experimentales. En este caso, se estudió el secado con aire caliente de láminas de patata de dimensiones predefinidas (4x2x2 cm), siendo en este caso las temperaturas del aire del secador variables entre 40, 50, 60 y 70 °C. La velocidad del aire siempre fue de 2 m/s. A partir de los datos obtenidos, los investigadores llegaron a una serie de conclusiones realmente interesantes. La primera de ellas fue que, en los primeros instantes del proceso, la ratio de secado es muy rápida, puesto que el contenido de humedad es elevado, de forma que al principio el material pierde el agua libre de su superficie, para lo cual se requiere de poca energía, que aporta rápidamente el aire caliente que incide sobre el objeto. La densidad del material es

directamente proporcional a la humedad del material, de forma que, a mayor contenido en humedad, mayor densidad. Cuando se realiza un proceso de secado, a medida que avanza este con el tiempo, menor contenido de humedad presenta el material y, por tanto, menor densidad. Para alcanzar esta conclusión, Chandra y Talukdar (2013) relacionaron la densidad medida experimentalmente con la ecuación de correlación creada por Wang y Brennan (1993b):

$$\rho = A_1 + A_2 \cdot e^{A_3 x^2}$$

donde, A_1 , A_2 y A_3 son constantes a una temperatura de secado de 40°C (1.08, 0.3 y -0.325, calculadas a partir de una regresión no lineal) y x es el contenido de humedad del material. Por otro lado, Mierzwa y Musielak (2023) compararon el secado convectivo mediante microondas con el secado híbrido mediante infrarrojos.

Investigación teórica predictiva

La investigación teórico-predictiva intenta realizar modelizaciones basadas en las ecuaciones de balances de masa y energía, junto los modelos de transferencia de masa y calor. La modelización debe contemplar tres balances:

Balance de masa de agua

$$\dot{m}_{aire} \cdot (\omega - \omega_{aire1}) = m_s \cdot (x - x_e)$$

Balance de energía en el aire

$$\begin{aligned} \dot{m}_{aire} \cdot \left[\left(C_{p_{aire}} \cdot T + \omega \cdot (\lambda + C_{p_{vapor}} \cdot T) \right) - \left(C_{p_{aire}} \cdot T_1 + \omega_{aire1} \cdot (\lambda + C_{p_{vapor}} \cdot T_1) \right) \right] \\ = K \cdot A \cdot h_w \cdot (x - x_e) + h \cdot A \cdot (T - T_b) \end{aligned}$$

Balance de energía en la biomasa

$$\begin{aligned} m_s \cdot (C_{p_b} + x \cdot C_{p_w}) \frac{dT_b}{dt} + m_s \cdot \lambda \cdot \frac{dx}{dt} \\ = \dot{m}_{aire} \cdot [(\lambda + C_{p_v} \cdot T_e) \cdot (\omega - \omega_{aire1}) + (C_{p_{aire}} + \omega C_{p_v}) \cdot (T - T_e)] \end{aligned}$$

$$\dot{m}_w = \frac{m_s}{A} \cdot \frac{dx}{dt} = K \cdot (x - x_e)$$

donde T es la temperatura del aire, T_b es la temperatura de la biomasa. Las variables incógnitas son ω , T , x , T_b . Salinas *et al.* (2015) y Pang (2007) ya advierten que para simular y modelizar el secado de madera es necesario realizar fuertes simplificaciones del proceso y de los factores que lo gobiernan, como, por ejemplo, considerar la madera a secar un medio continuo, eliminando la heterogeneidad del material, o tomar la temperatura del aire de la corriente de aire constante durante el proceso de secado.

Algunos autores han diseñado modelos cinéticos de secado basados en procesos de transferencia de masa. Tremblay *et al.* (2000) a partir de un método experimental, buscaron la determinación del coeficiente de transferencia de calor y masa por convección en *Pinus resinosa* A. basándose en el contenido de humedad, estableciendo como fuerza impulsora del intercambio de calor y masa la diferencia de potencial hídrico entre la superficie de la madera y el aire. Sus conclusiones fueron que el coeficiente varía en función de la velocidad de aire, a mayor velocidad, mayor coeficiente, y se muestra constante hasta alcanzar valores de humedad en la superficie de la madera próximos al 80%.

Por su parte, otros autores diseñaron modelos de secado basados en la teoría de Whitaker (1977; 1998), desarrollada por Nasrallah y Perré (1988), Perré y Degiovanni (1990), Perré *et al.* (1993), Turner y Ferguson (1995a y 1995b), Turner (1996), Perré y Turner (1999) y Jalil *et al.* (2013). Sus modelos se basan en la conservación de la energía para modelizar el secado de una partícula de pino de geometría cilíndrica infinita como medio poroso. Para ello, utilizan la ecuación:

$$\varepsilon_g + \varepsilon_s + \varepsilon_{fw} + \varepsilon_{bw} = 1$$

donde la suma de las fracciones de volumen de cada fase (mezcla de gas: g , sólido: s , agua libre: fw y agua ligada: bw) es igual a 1. Así, investigaron nueve propiedades físicas (conductividad

térmica efectiva, capacidad calorífica específica, permeabilidades intrínsecas de gas y líquido, permeabilidades relativas de gas y líquido, presión capilar, difusividad del agua ligada y difusividad efectiva del vapor de agua) y los coeficientes de transporte del modelo. Los autores concluyeron que estas propiedades mostraron un notable impacto en el tiempo de secado previsto, de las cuales, la permeabilidad intrínseca del gas fue la más influyente en el modelo.

Por su parte, Chávez *et al.* (2021) elaboraron un modelo capaz de simular simultáneamente la transferencia de masa y calor a baja temperatura en pequeñas masas de madera de la especie *Pinus radiata* D. Don., prediciendo las tensiones mecánicas durante el proceso de secado. En particular, los valores del coeficiente de transferencia de calor local (h) fueron calculados por la Analogía de Colburn, lo que permitió encontrar los valores en términos de coeficientes de masa por convección k_r (radial) y de k_t (tangencial), respectivamente (Sánchez-Escalona *et al.*, 2020).

$$h_m = k_r \left(\frac{K_w}{D_{air}} \right) \left(\frac{Sch}{Pr} \right)^{-\frac{1}{3}}$$

donde h_m es el coeficiente local de transferencia de masa (agua), k_r la conductividad radial, K_w es la permeabilidad, D_{air} es la difusividad, Sch es el número de Schmidt y Pr el número de Prandtl.

Simo-Tagne *et al.* (2016) modelaron para dos tipos de madera tropical (*Triplochiton scleroxylon* K. Schum. y *Terminalia superba* Engl. & Diels.) las transferencias de calor y masa durante su secado. Para dichos cálculos utilizaron datos termofísicos recopilados de forma experimental en su mayoría, obteniendo el resto mediante revisión bibliográfica. Los resultados que obtuvieron con su modelo, fueron comparados con los obtenidos por el modelo de Luikov (1966) y por los obtenidos de forma experimental. El modelo se basó en:

$$h_m = \frac{D_w \cdot Sh}{D_h}$$

donde h_m es el coeficiente de transferencia de masa (agua), D_w es el coeficiente de difusión del agua causado por el gradiente de humedad, Sh es el número de Sherwood (Sherwood, 1929a y b; 1930; 1932; Sherwood y Comings, 1934) y D_h es el diámetro hidráulico (distancia consecutiva entre dos filas de las muestras).

Al realizar la comparación de resultados entre el modelo propuesto por Simo-Tagne *et al.* (2016) y el de Luikov (1966), se comprobó que, si bien ambos modelos presentaban la misma evolución en el contenido de humedad de la muestra a lo largo del proceso de secado, en la evolución de la temperatura las diferencias eran amplias. Cabe destacar que el modelo propuesto no tenía en cuenta factores como los dominios higroscópicos y no higroscópicos de las especies adultas.

Algunos autores han introducido a sus investigaciones sobre el proceso de secado un nuevo factor a tener en cuenta, la porosidad del material. Así, Inoué *et al.* (2009) investigaron el impacto de la distribución del tamaño de los poros en la transferencia de calor y humedad en materiales porosos durante el secado. Para ello, utilizaron tanto enfoques teóricos como experimentales, estimando a partir de ellos los coeficientes de transferencia de humedad. Así, la difusividad del agua (D_w) la estimaron como:

$$D_w = \frac{\sigma_w}{\eta_w} K x^3 = (1.604T - 394.3) K x^3$$

donde σ_w es la tensión superficial del agua, η_w es la viscosidad del agua y K es la constante de transferencia del agua. Tanto σ_w como η_w dependen de la temperatura, mientras que K depende de la estructura de los poros. T es la temperatura del material.

Inoué *et al.* (2009) analizaron que cuando la suma del calor por convección y radiación en la superficie del material es mayor que la conducción hacia el interior de la masa, comienza la evaporación de la humedad en la superficie del material y la temperatura de la superficie aumenta. En el primer periodo se cumplen las siguientes ecuaciones: En primer lugar, el calor empleado en la evaporación del agua en la superficie es igual al calor que se recibe por convección más el calor que se recibe por radiación menos el calor que se transfiere al interior de la pieza por conducción.

$$\dot{m}_w \cdot \lambda_w = q_{conv} + q_{rad} - k \frac{dT}{dr} \Big|_{r=R}$$

Sólo cuando la temperatura central alcanza la temperatura de la superficie, la tasa de evaporación $\dot{m}_w$ se vuelve constante. Por otra parte, el flujo de agua en el interior de la masa y el agua evaporada en la superficie son equivalentes:

$$\dot{m}_{wi} = \dot{m}_w$$

$$D_w \cdot \rho_{sólido} \cdot \varepsilon_w \frac{dx}{dr} \Big|_{r=R} = h_m \cdot \rho_{aire} \cdot (\omega_{sat} - \omega_{aire})$$

En la segunda etapa, si no hay humedad local presente en la superficie (contenido de humedad inferior al crítico) el flujo de agua interno $\dot{m}_{wi}$ no puede llegar a ser igual a $\dot{m}_w$, y el plano de evaporación (δ) se mueve hacia el interior del material. El valor de $\dot{m}_w$ disminuye porque aumenta la resistencia térmica en la región seca del material, comenzando el período de velocidad de secado decreciente.

En esta etapa el calor recibido por convección y por radiación desde la superficie es igual al calor que se disipa por conducción hacia el interior de la masa. El plano de desecación retrocede hacia el interior alejándose de la superficie. En ese plano una parte del calor que se recibe por conducción desde la superficie se transfiere al agua en

proceso de evaporación, otra parte se transfiere hacia el interior también por conducción.

$$q_{conv} + q_{rad} = k \frac{dT}{dr} \Big|_{r=R}$$

$$\dot{m}_{wi} \cdot \lambda_w = k \frac{dT}{dr} \Big|_{r=\delta^+} - k \frac{dT}{dr} \Big|_{r=\delta^-}$$

$$\dot{m}_{wi} = D_w \cdot \rho_{sólido} \cdot \varepsilon_w \frac{dx}{dr} \Big|_{r=\delta}$$

$$\dot{m}_w = \frac{\delta^2}{R^2} \cdot \dot{m}_{wi}$$

La gran aportación de Inoué es establecer una relación entre el agua vaporada en la superficie y el agua evaporada en el interior de la masa cómo relación de distancias al cuadrado. De esta forma, establecieron relaciones entre el contenido de humedad y la temperatura, tanto en la superficie como en el núcleo del material, con el tiempo de secado. El coeficiente de transferencia de calor y el coeficiente de transferencia de agua por convección lo calcula como:

$$h = \frac{k_{aire}}{2R} \left(2.0 + 0.60 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \right)$$

$$h_m = \frac{D_w}{2R} \left(2.0 + 0.60 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Sc^{\frac{1}{3}} \right)$$

Conclusiones

Las conclusiones que se pueden extraer de la revisión bibliográfica es que el proceso de secado es un proceso matemáticamente complejo de modelar que conviene tratarlo con ecuaciones diferenciadas en dos etapas, unas para la fase de secado de velocidad constante y otras para la fase de secado de velocidad decreciente. Aunque se han propuesto aproximaciones muy loables en ambas, es un campo que todavía requiere profundización debido a que las variables implicadas están condicionadas al tipo de materia (porosidad), su humedad, la temperatura, y condiciones del aire convectivo (velocidad, temperatura, humedad del aire).

La modelización de la fase de secado con velocidad constante puede realizarse a partir de la ecuación de transferencia de masa por convección (2). La utilización del número de Reynolds y el número de Schmidt para el cálculo del coeficiente h_m con las analogías de las correlaciones utilizadas para la transferencia de calor para el cálculo de h , sustituyendo el número de Prandtl por el número de Schmidt, requieren revisión puesto que presentan desviaciones en la biomasa, y no son aplicables en la fase de secado de velocidad decreciente.

Sugerencias para investigaciones futuras han sido introducidas en las conclusiones y también en la discusión de los modelos. Una de las más importantes es estudiar la variación de difusividad en función de la humedad en estructuras porosas, así como la variación del coeficiente de transferencia por convección. Algunas investigaciones modernas están avanzando en este sentido, tales como Haya *et al.* (2024).

La modelización de la fase de secado con velocidad variable debe centrarse en la variación de D_w o K en función de la humedad del material y la temperatura. Existen iniciativas en la medición de estas variables, por ejemplo, con la patente P202330957 de la Universitat Politècnica de València (Velázquez *et al.*, 2023). Para ello se ha de asumir:

$$D_w \cdot \rho_{sólido} \cdot \varepsilon_w \frac{dx}{dr} \Big|_{r=R} = h_m \cdot \rho_{aire} \cdot (\omega_{sat} - \omega_{aire})$$

La variabilidad de D_w o K en cada material obliga a generar una base de datos de las ecuaciones específicas para el cálculo de estos parámetros para cada tipo de material en función de la humedad y temperatura, es decir, para distintos tipos de madera, alimentos, pieles, cerámicas, minerales etc. La generación de esta base de datos para poder predecir las velocidades y tiempos de secado es un reto científico. Esto significa que la investigación en la cinética de secado no es una línea extinguida, sino que requiere todavía desarrollo.

A	Área de transferencia de masa
D_w	Difusividad de masa
ε_w	Porosidad del material
h	Coeficiente de transferencia de calor por convección
h_m	Coeficiente de transferencia de masa por convección
λ	Entalpía de evaporación a 0°C (Calor latente)
λ_w	Entalpía de evaporación a una temperatura (Calor latente)
k	Conductividad térmica
K	Resistencia global de transferencia de masa
m_s	Masa del sólido
$\dot{m}_{aire}$	Flujo de aire
$\dot{m}_w$	Flujo de agua evaporada en una superficie externa
$\dot{m}_{wi}$	Flujo de agua evaporada en una superficie externa
T	Temperatura del aire
T_b	Temperatura de la biomasa
ω	Humedad instantánea del aire
ω_{aire}	Humedad absoluta del aire
ω_{sat}	Humedad absoluta del aire saturado en la superficie del material
x	Humedad del material sólido
x_c	Humedad crítica
x_e	Humedad del material en el equilibrio
x_0	Humedad del material inicial

Agradecimientos

A la red RIETI-CYTED justamente por permitirnos compartir experiencias en el campo de las energías renovables y enriquecernos con los conocimientos aportados por los estudios desarrollados en las instituciones integrantes. Se agradece el arbitraje por parte del Dr. Artemio Carrillo.

Referencias

- Ananias, R. A., Chrusciel, A., Zoulalian, A., Salinas-Lira, C., & Mougel, E. (2020). Overall mass transfer coefficient for wood drying curves predictions. In M. El-Amin (Ed.), *Mass transfer in multiphase systems and its applications*.
- Babiak, M., & Kudela, J. (1995). A contribution to the definition of the fiber saturation point. *Wood Science and Technology*, 29 (3), 217-226.
- Baroni, A. F., & Hubinger, M. D. (1998). Drying of onion: Effects of pretreatment on moisture transport. *Drying Technology*, 16 (9&10), 2083-2094.
- Chandra, P.K.; SINGH, R.P. (1995). *Applied numerical methods for food and agricultural engineers*. CRC Press. Boca Raton, USA.
- Chandra, M., & Talukdar, P. (2010). Three dimensional numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer in a moist object subjected to convective drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53 , 4638-4650.
- Chandra, M., & Talukdar, P. (2013). Design of an experimental set up for convective drying: Experimental studies at different drying temperature. *Heat and Mass Transfer*, 49, 31-40.
- Chanpet, M., Rakmak, N., Matan, N., & Siripatana, C. (2020). Effect of air velocity, temperature, and relative humidity on drying kinetics of rubberwood. *Heliyon*, 6, e05151.
- Chávez, C. A., Moraga, N. O., Salinas, C. H., Cabrales, R. C., & Ananías, R. A. (2021). Modeling unsteady heat and mass transfer with prediction of mechanical stresses in wood drying. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 123, 105230.

- Çencel, Y.; Ghajar, A. (2011). *Transferencia de Calor y Masa. Fundamentos y Aplicaciones*. McGraw Hill. Méjico. 919 pp
- DJ. Dedić, A. (2002). Modelling of coupled heat and mass transfer during convective drying of wood. *Drying Technology*, 20 (6), 1299–1301.
- Faghri, A., Zhang, Y., & Howell, J. (2010). *Advanced heat and mass transfer*. Global Digital Press.
- Fisher, E. A. (1923). Some factors affecting the evaporation of water from soil. *Journal of Agricultural Science*, 13, 121-143.
- Fisher, E. A. (1927). Some factors affecting the evaporation of water from soil II. *Journal of Agricultural Science*, 17, 407-419.
- Henderson, S. M. (1961). Grain drying theory: Temperature effects of drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6, 169-174.
- Inoué, T.; Iyota, H.; Nishimura, N. (2009). Effect of pore size distribution on heat and moisture transfer in porous material for high humidity hot air and superheated steam drying. *Journal of JSEM*, 9: 54-59
- Inoué, T., Iyota, H., Nishimura, N. (2010). Prediction method for drying time of wet porous material in humid hot air and superheated steam. *Drying technology*, 28: 608-614
- Jalili, M.; Anca-Couce, A.; Zobel, N. (2013). On the uncertainty of a mathematical model for drying of a wood particle. *Energy Fuels*, 27: 6705-6717
- Keen, B. A. (1914). The evaporation of water from soil. *Journal of Agricultural Science*, 6 , 456-475.
- Khamtree, S., Ratanawilai, T., & Nuntadusit, C. (2019). Empirical modeling of air-dried rubberwood drying system. *International Journal of Structural and Construction Engineering*, 13 (7), 428-431.
- Khamtree, S., Ratanawilai, T., Nuntadusit, C., & Marzbani, H. (2020). Experimental study and numerical modeling of heat and mass transfer in rubberwood during kiln drying. *Heat and Mass Transfer*, 57 (3), 453–464.
- Koukouch, A., Bakhattar, I., Asbik, M., Idlimam, A., Zeghami, B., & Aharoune, A. (2020). Analytical solution of coupled heat and mass transfer equations during convective drying of biomass: Experimental validation. *Heat and Mass Transfer*, 56 (6), 1971–1983.
- Kumar, N., Sarkar, B. C., & Sharma, H. K. (2012). Mathematical modelling of thin layer hot air drying of carrot pomace. *Journal of Food Science Technology*, 49 (1), 33-41.
- Kuznetsov, G. V., Syrodoy, S. V., Nigay, N. A., Maksimov, V. I., & Gutareva, N. Y. (2021). Features of the processes of heat and mass transfer when drying a large thickness layer of wood biomass. *Renewable Energy*, 169 , 498–511.
- Kudra, T., & Mujumdar, A. S. (2007). *Advanced drying technologies* (2nd ed.). Taylor & Francis Group, 478 p.
- Luikov, A.V. (1966). *Heat and mass transfer in capillary porous bodies*. Pergamon Press, Oxford.
- Mierzwa, D., & Musielak, G. (2023). Convective-Microwave-IR hybrid drying of kaolin clay-kinetics of process. *Applied Sciences*, 13 , 7451.
- Mills, A.F. (1995). *Basic Heat and Mass Transfer*. Irwin Pub

- Mujumdar, A. S. (2007). Handbook of industrial drying . Drying Technology, 25 , 1143-1144.
- Nasrallah, S.B.; Perré, P. (1988). Detailed study of a model of heat and mass transfer during convective drying of porous media. Int. J. Heat and Mass Transfer, 31(5): 957 – 967
- Page, G. E. (1949). Factors influencing the maximum rates of air-drying shelled corn in thin layers (Master's thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana).
- Pang, S. (2007). Mathematical modeling of kiln drying of softwood timber: model development, validation and practical application. Dry Technology, 25(3): 421-431
- Perré, P., Degiovanni, A. (1990). Simulation par volumes finis des transferts couplés en milieux poreux anisotropes: séchage du bois à basse et à haute température. Int. J. Heat Mass Transfer, 33 (11): 2463-2478
- Perré, P.; Moser, M.; Martin, M. (1993). Advances in transport phenomena during convective drying with superheated steam and moist air. Int. J. Heat and Mass Transfer, 36(11):2725-2746.
- Perré, P.; Turner, I. W. (1990). A 3-D version of TransPore: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media. Int. J. Heat Mass Transfer 42: 4501–4521
- Saha, A. K. (2006). Three-dimensional numerical study of flow and heat transfer from a cube placed in a uniform flow. International Journal of Heat and Fluid Flow, 26 , 80-94.
- Salinas, C.; Chavez, C.; Ananias, R.A.; Elustondo, D. (2015). Unidimensional simulation of drying stress in radiata pine wood. Dry. Technol. 33(8): 996-1005
- Sánchez-Escalona, A. A.; Góngora-Leyva, E.; Retirado-Mediateja, Y.; Camaraza-Medina, Y. (2020). Ecuación generalizada del número de Nusselt para integrar las analogías de Reynolds-Colburn, Prandtl y Von-Kármán. X Conferencia Internacional de Aprovechamiento de Recursos Minerales Taller ELECTROMECC'20
- Sherwood, T. K. (1929a). The drying of solids I. Industrial and engineering chemistry, 21(1): 12-16.
- Sherwood, T. K. (1929b). The drying of solids II. Industrial and engineering chemistry, 21(10): 976-980.
- Sherwood, T. K. (1930). The drying of solids III. Industrial and engineering chemistry, 22(2): 132-136.
- Sherwood, T. K. (1932). The drying of solids IV. Industrial and engineering chemistry, 22: 307-310.
- Sherwood, T.K., & Comings, E.W. (1933). The drying of solids V. Industrial and Engineering Chemistry, 25 , 150-168.
- Sherwood, T. K.; Comings, E.W. (1934). The drying of solids VII. Industrial and engineering chemistry, 26: 1096-1098
- Siau, J. F. (1995). Wood: Influence of moisture on physical properties . Virginia Polytechnic Institute and State University, 227 p.
- Simal, S., Rosello, C., Berna, A., & Mulet, A. (1994). Heat and mass transfer model for potato drying. Chemical Engineering Science, 49 , 3739-3744.
- Simal, S., Mulet, A., Tarrazo, J., & Rosello, C. (1995). Drying models for green peas. Food Chemistry, 55 (2), 121-128.

- Simal, S., Rosello, C., Berna, A., & Mulet, A. (1998). Drying of shrinking cylinder-shaped bodies. *Journal of Food Engineering*, 37 , 423-435.
- Simo-Tagne, M.; Rémond, R.; Rogaume, Y.; Zoulalian, A.; Bonoma, B. (2016). Modeling of coupled heat and mass transfer during drying of tropical woods. *International Journal of Thermal Sciences*, 109, 299–308.
- Sychevskii, V.A. (2018). Heat and mass transfer in convective wood-drying plants. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 91 (3), 705-711.
- Togrul, I.T., & Pehlivan, D. (2002). Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 55 (3), 209-216.
- Tremblay, C., Cloutier, A., & Fortin, Y. (2000). Determination of the effective water conductivity of red pine sapwood. *Wood Science and Technology*, 34 (2), 109-124.
- Turner, I.W. (1996). A two dimensional orthotropic model for simulating wood drying process. *Applied Mathematical Modelling*, 20(1): 60-81
- Turner, I.W.; Ferguson, W.J. (1995a). An unstructured mesh cell-centered control volume method for simulating heat and mass transfer in porous media: application to softwood drying, part I: the isotropic model. *Applied Mathematical Modelling*, 19 (11): 654-667
- Turner, I.W.; Ferguson, W.J. (1995b). An unstructured mesh cell-centered control volume method for simulating heat and mass transfer in porous media: application to softwood drying—part II: the anisotropic model. *Applied Mathematical Modelling*, 19 (11): 668-674
- Turner, I.W.; Perré, P. (1998). The use of implicit flux limiting schemes in the simulation of the drying process: a new maximum flow sensor applied to phase mobilities. *Journal of Applied Mathematical Modelling*, 25(6): 513-540
- Velázquez Martí, B. (2023). Aparato medidor de transferencia de masa. Universidad Politécnica de Valencia, P202330957. 21 Nov 2023
- Velic, D., Planinic, M., Tomas, S., & Bili, M. (2004). Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of Food Engineering*, 64, 97-102.
- Wang, N., & Brennan, J. G. (1993a). A mathematical model of simultaneous heat and moisture transfer during drying of potato. *Journal of Food Engineering*, 24, 47-60.
- Wang, N., & Brennan, J. G. (1993b). Changes in structure, density and porosity of potato during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 24, 61-76.
- Wang, N., & Brennan, J. G. (1992). Thermal conductivity of potato as a function of moisture content. *Journal of Food Engineering*, 17, 153-160.
- Whitaker, S. (1977). Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: a theory of drying, *Advances in Heat Transfer* 13: 119-203.
- Whitaker, S. (1998). Coupled transport in multiphase systems: a theory of drying, *Advances in Heat Transfer* 31: 1-104.
- Zelinka, S.L., Glass, S.V., Jakes, J.E., & Stone, D.S. (2016). A solution thermodynamics definition of the fiber saturation point and the derivation of a wood-water phase (state) diagram. *Wood Science and Technology*, 50 (3), 443-462.

Manuscrito recibido: 29 de agosto de 2024

Recepción del manuscrito corregido: n/a

Manuscrito aceptado: 13 de septiembre de 2024