



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



INSTITUTO DE INGENIERÍA DE  
ALIMENTOS PARA EL DESARROLLO

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

***INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE  
CONGELACIÓN Y LA APLICACIÓN DE  
ULTRASONIDOS EN LA LIOFILIZACIÓN  
A PRESIÓN ATMOSFÉRICA DE  
CHAMPIÑÓN***

TRABAJO FIN DE MÁSTER UNIVERSITARIO EN CIENCIA E  
INGENIERÍA DE ALIMENTOS

ALUMNA: CLARA CARRIÓN BALUFO

TUTOR ACADEMICO: JUAN ANDRÉS CÁRCEL CARRIÓN

*Curso Académico: 2018-2019*

**VALENCIA, Julio 2019**

# **INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE CONGELACIÓN Y LA APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS EN LA LIOFILIZACIÓN A PRESIÓN ATMOSFÉRICA Y LA CALIDAD DE CHAMPIÑÓN.**

Clara Carrión Balufo, Juan Andrés Cárcel Carrión<sup>1</sup>

## **RESUMEN**

El objetivo principal de este trabajo fue determinar la influencia de la velocidad de congelación y de la aplicación de ultrasonidos sobre la cinética de liofilización a presión atmosférica de champiñón y la calidad del producto final. Para ello, se realizaron cuatro tipos de experiencias de liofilización combinando congelación rápida y lenta, con y sin aplicación de ultrasonidos. Se obtuvieron las cinéticas de secado, que se modelizaron con dos modelos difusivos considerando o no la resistencia externa a la transferencia de materia. Para cuantificar la influencia sobre la calidad del producto final se evaluaron cinco parámetros: color, encogimiento, textura, rehidratación y capacidad de retención de agua. El tiempo de secado se redujo de manera importante con la aplicación de ultrasonidos, siendo entre 82 y 85 % menor en todos los casos. El ajuste de los modelos a los datos experimentales mostró que la aplicación de ultrasonidos afectó tanto a la resistencia interna como a la externa. La aplicación de ultrasonidos no generó cambios importantes en la calidad del producto final, aunque aparecieron ligeras diferencias en los parámetros estudiados. En cuanto a la velocidad de congelación, no afectó de manera apreciable a la cinética de proceso ni a la mayor parte de los parámetros de calidad, si bien, las muestras que se trataron con congelación rápida mostraron una mejor capacidad de retención de agua tras la rehidratación. En general, se pudo apreciar que la aplicación de ultrasonidos durante liofilización a presión atmosférica es una tecnología muy interesante al intensificar el proceso sin generar cambios importantes en la calidad del producto, independientemente de la velocidad de congelación utilizada.

**PALABRAS CLAVE:** difusividad efectiva, cinética, color, textura, rehidratación, retención de agua

## **RESUM**

L'objectiu principal d'aquest treball va ser determinar la influència de la velocitat de congelació i de l'aplicació d'ultrasons sobre la cinètica de liofilització a pressió atmosfèrica de xampinyó i la qualitat del producte final. Per a això, es van realitzar quatre tipus d'experiències de liofilització combinant congelació ràpida i lenta, amb i sense aplicació d'ultrasons. Es van obtenir les cinètiques d'assecat, que es modelitzaren amb dos models difusius considerant o no la resistència externa a la transferència de matèria. Per a quantificar la influència sobre la qualitat del producte final es van avaluar cinc paràmetres: color, encongiment, textura, rehidratació i capacitat de

<sup>1</sup>Dpto. de Tecnología de Alimentos. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n 46022.

retenció d'aigua. El temps d'assecat es va reduir de manera important amb l'aplicació d'ultrasons, sent entre 82 i 85 % menor en tots els casos. L'ajust dels models a les dades experimentals va mostrar que l'aplicació d'ultrasons va afectar tant la resistència interna com a l'externa. L'aplicació d'ultrasons no va generar canvis importants en la qualitat del producte final, encara que van aparèixer lleugeres diferències. Pel que fa a la velocitat de congelació, no va afectar de manera apreciable a la cinètica de procés ni a la major part dels paràmetres de qualitat, si bé, les mostres que es van tractar amb congelació ràpida van mostrar una millor capacitat de retenció d'aigua després de la rehidratació. En general, es va poder apreciar que l'aplicació d'ultrasons durant liofilització a pressió atmosfèrica és una tecnologia molt interessant en intensificar el procés sense generar canvis importants en la qualitat del producte, independentment de la velocitat de congelació utilitzada.

**PARAULES CLAU:** difusivitat efectiva, cinètica, color, textura, rehidratació, retenció d'aigua

## **ABSTRACT**

The main aim of this work was to determine the influence of the freezing speed and ultrasound application on the kinetics of atmospheric freeze drying of mushrooms and on the quality of the final product. For that purpose, four types of freeze-drying experiments were carried out, combining fast and slow freezing, with and without ultrasound application. The drying kinetics were modelled with two diffusive models considering or not the external resistance to the transfer of matter. To quantify the influence on the quality of the final product, five parameters were evaluated: colour, shrinkage, texture, rehydration and water holding capacity. The processing time was significantly reduced with ultrasound application, being between 82 and 85 % lower in all cases. The fit of the models to the experimental data showed that the application of ultrasound affected both internal and external resistance. The ultrasound application did not generate important changes in the quality of the final product, although slight differences appeared. Regarding the freezing speed, it did not appreciably affect the kinetics of the process or most of the quality parameters, although the samples that were treated with fast freezing showed a better water holding capacity after rehydration. In general, it was observed that the application of ultrasound during atmospheric freeze drying might be considered as an interesting technology to intensify the process avoiding significant changes in product quality, regardless of the freezing speed used.

**KEY WORDS:** effective diffusivity, kinetics, colour, texture, rehydration, water holding capacity

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el cultivo de hongos comestibles, así como su consumo, se ha visto incrementado, y la previsión es que esta tendencia ascendente continúe. Entre los distintos tipos de hongos, el champiñón (*Agaricus bisporus*) es la especie más cultivada en la región europea, cuya producción se mantiene por detrás de China. En España su cultivo se centra en dos zonas bien diferenciadas: el área de Navarra y Aragón, y la zona de la Manchuela, entre las provincias de Cuenca y Albacete (CTICH).

El champiñón es un alimento muy perecedero que debe ser consumido con relativa rapidez tras su recolección (Fang et al., 1971). Esto, unido al incremento de su consumo y al crecimiento de la población mundial, hace que su procesado sea cada vez una opción más importante. Entre los diferentes tipos de procesado hay que destacar la deshidratación. La comercialización de setas comestibles deshidratadas está en pleno proceso de expansión y, hoy en día, este tipo de productos se puede encontrar en la mayoría de supermercados.

El secado es un proceso que consiste en la eliminación parcial del contenido en agua de un alimento con el objetivo de disminuir la actividad de agua, de modo que se ralentiza el crecimiento de microorganismos y el desarrollo de reacciones químicas perjudiciales (Vega-Mercado et al., 2001). No obstante, el secado produce cambios físicos, químicos y biológicos que pueden afectar a la calidad del producto deshidratado (García-Pérez et al., 2007). Por esta razón, es necesario utilizar métodos de secado que mantengan la calidad del producto.

La liofilización es un proceso de secado a bajas temperaturas y en el que el producto es previamente congelado. La eliminación del agua del alimento se produce mediante sublimación del hielo (Vega-Mercado et al., 2001). Estas condiciones generan un producto de alta calidad que mantiene en gran medida sus propiedades nutricionales, aroma y sabor (Claussen et al., 2007), así como su aspecto y tamaño. Sin embargo, presenta importantes inconvenientes, como son los altos costes energéticos y económicos y la imposibilidad de funcionamiento en continuo debido a que se realiza a vacío. Estos aspectos hacen que sea un proceso que sólo se aplica a productos de alto valor añadido. Por ello, la liofilización a presión atmosférica se posiciona como una alternativa económica. En este caso se utiliza una corriente de aire muy seco como transporte del agua sublimada lo que posibilita que se pueda utilizar en continuo. Su principal inconveniente es el largo tiempo de proceso pues presenta una cinética muy lenta, y que se debería acelerar, por ejemplo, mediante la aplicación de tecnologías alternativas como fuentes adicionales de energía (Puig et al., 2012). Entre dichas tecnologías (microondas, radio frecuencia o radiación infrarroja) destaca la aplicación de los ultrasonidos de potencia. Los efectos de la energía acústica son principalmente mecánicos y no térmicos y, por lo tanto, no dañan a los componentes termolábiles del producto.

Los ultrasonidos son ondas mecánicas de frecuencia superior a 20 kHz (Cárcel et al., 2017). La generación de ultrasonidos se realiza gracias a un

transductor, que transforma una fuente de energía (eléctrica, mecánica, o magnética) en energía acústica (García-Pérez, 2007). Existen distintos tipos de transductores según la fuente de energía que utilizan. Así se pueden encontrar transductores magnetostrictivos, accionados por fluidos y piezoeléctricos, si bien estos últimos son los más extendidos (Cárcel et al., 2017). El funcionamiento de los transductores piezoeléctricos está basado en el efecto piezoeléctrico, el cual consiste en la contracción-expansión del material al aplicarse una carga eléctrica de signo contrario y de polaridad a ambos lados de dicho material. Esta expansión-contracción genera, al repetirse en frecuencias superiores a 20.000 veces por segundo, una onda ultrasónica (Cárcel et al., 2014).

Los ultrasonidos se dividen en dos tipos en función de sus aplicaciones y de su frecuencia e intensidad: ultrasonidos de señal, de baja potencia y alta frecuencia, utilizados en el control de procesos y análisis no destructivo de materiales; y ultrasonidos de potencia o alta intensidad, destacados por su capacidad de causar efectos sobre el medio en el que se propagan (Cárcel et al., 2012). Según el impacto generado sobre el producto, los ultrasonidos de potencia son utilizados en tecnología de alimentos para, entre otros, procesos de limpieza, filtración, extracción, acción antiespumante, corte, emulsión y, sobre el que se centra el presente estudio, secado (Chemat et al., 2011).

La aplicación de ultrasonidos en el secado, al tratarse de un intercambio de materia y energía que se produce normalmente en un sistema sólido-gas, encuentra dos principales inconvenientes: la dificultad de propagación de las ondas ultrasónicas en medios gaseosos y la diferencia de impedancia acústica entre sólido y gas (García-Pérez et al., 2007) que dificulta el acople entre los transductores y el aire. No obstante, el desarrollo de sistemas eficientes de generación y aplicación ha posibilitado la realización de numerosos estudios en aplicación de ultrasonidos sobre secado convectivo de alimentos tanto con aire caliente (Ortuño et al., 2010) como a bajas temperaturas (Santacatalina et al., 2015). En este sentido, los ultrasonidos de potencia pueden contribuir a la reducción de la resistencia interna y externa a la transferencia de materia. Sus principales efectos sobre el producto son el denominado "efecto esponja", producido por la rápida compresión-expansión del producto, la creación de microcanales, que favorece la transferencia de agua, y la cavitación en moléculas de agua localizadas en el interior de la matriz del sólido (García-Pérez et al., 2007). Por otra parte, en la interfase sólido-gas se producen efectos como variaciones de presión, velocidades oscilantes y microcorrientes que pueden facilitar el intercambio de agua (Cárcel et al., 2017).

Sin embargo, también es importante conocer si estos efectos sobre la velocidad del proceso de secado generan también efectos sobre la calidad del producto, que es cada vez más valorada por el consumidor. Numerosos estudios (Santacatalina et al., 2016; Santacatalina et al., 2012; Fernandes et al., 2015) han evaluado la viabilidad del secado convectivo con aplicación de ultrasonidos, considerando tanto la cinética del proceso como la calidad del producto final y han concluido que podría ser un método interesante para reducir el tiempo de procesado sin afectar significativamente a la calidad final.

En el caso de la liofilización a presión atmosférica, una variable de proceso que puede afectar tanto a la cinética del proceso como a la calidad del producto final es el proceso previo de congelación del material. El impacto está directamente relacionado con el crecimiento de cristales de hielo que pueden romper la pared celular de los vegetales y, liberar así compuestos oxidativos y/o enzimáticos (Haiying et al., 2007). El tamaño y estructura de estos cristales de hielo dependen del método de congelación. En este sentido, la velocidad de congelación influye directamente sobre el tamaño de los cristales de hielo. Así, una congelación rápida generaría cristales de hielo de menor tamaño que podrían producir un menor daño en la microestructura del producto (Haiying et al., 2007).

De este modo, los objetivos del presente estudio fueron evaluar y cuantificar la influencia del método de congelación y la aplicación de ultrasonidos en la calidad del champiñón liofilizado a presión atmosférica.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Materia prima

Para la realización de las experiencias, se adquirieron champiñones (*Agaricus bisporus*) en un supermercado local (Valencia) con un tamaño y color similar. Con la ayuda de una mandolina de uso doméstico (Mandolina en V, Ibili), se obtuvieron muestras de geometría laminar de 6 mm de espesor, que fueron escaldadas en agua hirviendo durante 3 minutos, tiempo determinado por Lidhoo y Agrawal (2008) como el adecuado para desactivar la enzima peroxidasa. Después, las muestras se enfriaron a temperatura ambiente y se colocaron de forma aleatoria en un portamuestras (figura 1).



**FIGURA 1.** Portamuestras con láminas de champiñón.

### 2.2. Congelación

La congelación se realizó directamente sobre las muestras colocadas en el portamuestras. Se utilizaron dos tipos de congelación: congelación rápida y

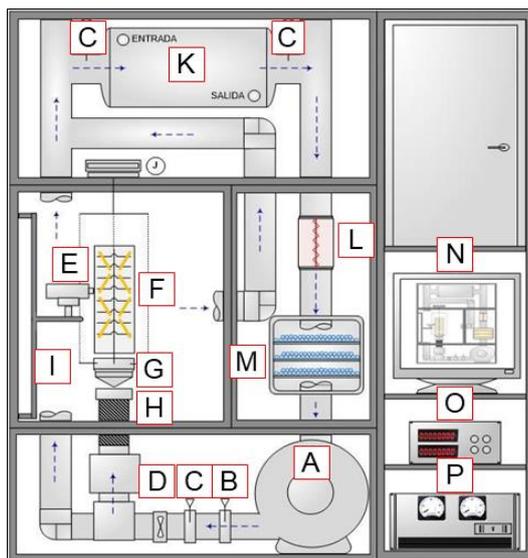
congelación lenta. Para la congelación rápida se utilizó un abatidor de temperatura (Hiber, mod. 051S) trabajando a  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Se consideró la congelación completa de las muestras cuando éstas alcanzaron  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  en el centro de estas. Para ello, fue necesario un tiempo mínimo de congelación de 30 minutos. En cambio, para la congelación lenta se utilizó un congelador doméstico ( $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) en el que se introdujeron las muestras el día anterior al comienzo de la experiencia de secado. En ambos casos, la congelación se realizó con el conjunto de muestras y portamuestra introducido dentro de una bolsa impermeable y cerrada para evitar la pérdida de humedad durante el proceso.

### **2.3. Determinación de humedad y actividad de agua**

La determinación del contenido de agua de las muestras frescas, escaldadas, deshidratadas y rehidratadas se obtuvo por diferencia de peso según el procedimiento de la AOAC número 934.01 (AOAC, 1997). Las muestras, entre 3 y 4 gramos, se trituraron y se introdujeron en un pesasustancias, que se colocó en una estufa a vacío a  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $0,2\text{ atm}$  hasta alcanzar un valor de peso constante. Además, se obtuvieron los valores de actividad de agua a  $25^{\circ}\text{C}$  de las muestras deshidratadas con el objetivo de comprobar la estabilidad de las mismas. Para ello, se utilizó un equipo profesional de laboratorio (AW SPRINT TH500, Novasina, Suiza).

### **2.4. Equipo de secado**

El equipo de secado utilizado en todas las experiencias fue un secadero convectivo a baja temperatura con aplicación de ultrasonidos y con control automático (PID) de la temperatura y la velocidad del aire en la cámara de secado (figura 2), desarrollado y descrito por García-Pérez et al. (2012). El portamuestras con las láminas de champiñón congeladas se coloca en la cámara de secado, por donde se hace pasar una corriente de aire cuya humedad relativa se mantiene inferior al 15 % en todos los casos. Para ello, se fuerza al flujo de aire a atravesar un lecho de material desecante (Drying Beads, 6-8 mm, Rung Rueng Cosulting, Tailandia). La cámara de secado se compone de un cilindro vibrante unido a un transductor ultrasónico (frecuencia  $21.9\text{ kHz}$ , impedancia  $369\ \Omega$ , capacidad de potencia  $90\text{ W}$ ) que genera la señal acústica que es transmitida hasta la muestra.



**FIGURA 2.** Esquema del secadero convectivo (Ozuna, 2013).

A. Soplante; B. Sensor de temperatura Pt-100; C. Sensor de temperatura y humedad relativa; D. Anemómetro; E. Transductor ultrasónico piezoeléctrico; F. Cilindro vibrante y cámara de secado; G. Dispositivo de carga de la muestra; H. Tubo retráctil; I. Mecanismo de desplazamiento vertical; J. Módulo de pesada; K. Intercambiador de calor; L. Resistencia eléctrica; M. Cámara de bandejas de material desecante; N. Ordenador; O. Amplificador; P. Controlador dinámico de resonancia.

Las cinéticas de secado se obtuvieron mediante un módulo de pesada automático que registró la variación de peso de la muestra. Se utilizó una aplicación informática desarrollada en LabVIEW2009TM (National Instruments, USA) para definir las variables de secado (temperatura, velocidad de aire y potencia ultrasónica) y el intervalo entre pesadas.

## 2.5. Experiencias de secado

Las experiencias de secado realizadas en el presente estudio se realizaron con y sin aplicación de ultrasonidos (US, NOUS), y ambas experiencias se repitieron con dos tipos de congelación: congelación lenta (CL) y congelación rápida (CR). Así se obtuvieron cuatro tipos de experiencias, CR NOUS, CR US, CL NOUS y CL US, y se realizaron al menos tres repeticiones para cada una de ellas. Las condiciones de secado utilizadas en todos los casos fueron temperatura y velocidad de aire constantes de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $2\text{ m/s}$ , respectivamente. En las experiencias con aplicación de ultrasonidos se utilizó una potencia ultrasónica de  $60\text{ W}$ , referida a la potencia eléctrica suministrada al transductor ultrasónico, que se corresponde con una concentración de energía de  $24.6\text{ kW/m}^3$  al tenerse en cuenta el volumen de la cámara de secado. Las experiencias se prolongaron hasta alcanzar al menos un  $82\%$  de pérdida de peso. Las muestras deshidratadas se almacenaron en recipientes herméticos con material desecante para asegurar su estabilidad.

## 2.6. Parámetros de calidad

Para evaluar la influencia de la congelación y de la aplicación de ultrasonidos en la calidad del champiñón deshidratado se analizaron cinco parámetros: color, encogimiento, textura, cinética, capacidad de rehidratación y capacidad de retención de agua.

### 2.6.1. COLOR

Se determinó el color de las láminas de champiñón fresco, escaldado, deshidratado y rehidratado mediante la medida de las coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  del espacio de color CIE Lab en dos puntos diferentes sobre la superficie de cada lámina. El equipo utilizado fue un colorímetro modelo CM-2500d de Konica Minolta (Japón) con iluminante D65 y ángulo de observación de  $10^\circ$ . Se utilizó un área de medida de 8 mm y se consideró el componente especular excluido (SCE). La calibración del equipo se realizó siempre antes de realizar cada medida.

A partir de las coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  (de las que se obtienen datos sobre la luminosidad, la intensidad de verde y rojo, y la intensidad de azul y amarillo, respectivamente), se calcularon la variación global de color ( $\Delta E^*$ ; ecuación 1), el índice de pardeamiento (IP; ecuación 2 y 3; Mohapatra et al., 2010) y el croma, que indica la saturación del color ( $C^*$ ; ecuación 4; Argyropoulos et al., 2011).

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (1)$$

donde  $\Delta E^*$  es la variación global de color,  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  son valores medidos en las muestras tratadas y  $L_0^*$ ,  $a_0^*$  y  $b_0^*$  son valores de referencia de las muestras en fresco.

$$IP = 100 \times \frac{X-0.31}{0.17} \quad (2)$$

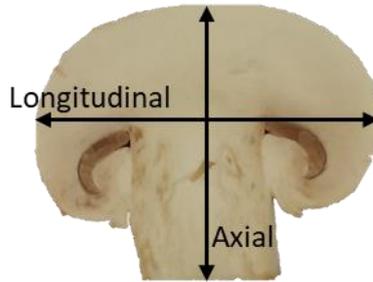
donde X es el parámetro calculado mediante la ecuación 3.

$$X = \frac{(a^*+1.75 \times L^*)}{(5.645 \times L^*+a^*-3.012 \times b^*)} \quad (3)$$

$$C^* = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})} \quad (4)$$

### 2.6.2. ENCOGIMIENTO

Se evaluó la influencia tanto del escaldado como del secado (con y sin aplicación de ultrasonidos) en las dimensiones de las láminas. Para ello, se tomaron medidas longitudinales, axiales (figura 3) y de espesor de todas las láminas procesadas (130 láminas en total), para lo que se utilizó un calibre pie de rey. El porcentaje de reducción de las láminas fue calculado a partir de las dimensiones previas y posteriores al procesado (escaldado o secado).



**FIGURA 3.** Medida longitudinal y axial de las láminas de champiñón.

### 2.6.3. TEXTURA

La textura de las láminas de champiñón frescas, escaldadas y rehidratadas se determinó mediante ensayos de doble compresión hasta un 50 % de deformación realizados en un texturómetro (TA-XT2, SMS, Reino Unido). A partir de los datos recogidos, se obtuvieron los parámetros de dureza, cohesividad, elasticidad y masticabilidad, considerados como unas de las características mecánicas principales de la textura (Szczesniak, 1963) ya que simulan la presión a la que se somete el alimento durante la masticación.

### 2.6.4. REHIDRATACIÓN

Las cinéticas de rehidratación de las diferentes muestras deshidratadas de champiñón se determinaron experimentalmente mediante el registro del peso (balanza analítica XS204, Mettler Toledo, USA) de las mismas a intervalos de 10 segundos durante su inmersión en un baño termostataado con agua en agitación a  $25 \pm 1$  °C. Antes de cada toma de peso, las láminas se secaron superficialmente. El proceso se repitió hasta alcanzar un peso constante.

### 2.6.5. CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA

La determinación de la capacidad de retención de agua de las muestras rehidratadas se llevó a cabo mediante centrifugación. Para ello se utilizaron tubos de centrifuga equipados en su parte central con una rejilla de sección circular. Allí se coloca un papel de filtro del mismo diámetro. Sobre éste se sitúa aproximadamente 1,5 gramos de muestra. El conjunto se centrifuga a 4000 rpm durante 10 min a temperatura ambiente. La capacidad de retención de agua (CRA), expresada como cantidad de agua retenida por 100 gramos de agua en la muestra, se calculó mediante la ecuación 5.

$$CRA = \left[ 1 - \left( \frac{m_3 - m_1 + m_4 - m_5}{m_2 \times H} \right) \right] \times 100 \quad (5)$$

donde  $m_1$  es el peso del tubo con la rejilla,  $m_2$  la masa de la muestra,  $m_3$  la masa del tubo con la rejilla y el líquido liberado tras la centrifugación,  $m_4$  la masa del filtro húmedo,  $m_5$  el filtro seco tras 24 horas a 100°C en estufa y  $H$  el contenido en humedad de las láminas rehidratadas.

## 2.7. Modelización de las cinéticas de secado y rehidratación

En un primer lugar se utilizó un modelo difusivo (SRE), que considera únicamente el transporte interno de humedad por difusión como responsable del transporte (Do Nascimento et al. (2016)). Este modelo se utilizó tanto con las cinéticas de secado como con las de rehidratación. Se consideró un comportamiento de lámina infinita y valor constante de difusividad efectiva durante el proceso (ecuación 6). Además, el producto se tomó como un sólido isotrópico y homogéneo, a pesar de que, en procesos de liofilización, el sólido presenta dos secciones claramente diferenciadas: una capa externa deshidratada que va aumentando de espesor y una capa interna congelada que va disminuyendo durante el secado. Esto convierte este modelo teórico en un modelo semiexperimental, que, sin embargo, ha sido utilizado en estudios similares con resultados aceptables (Moreno et al., 2017).

$$\frac{\partial W(x,t)}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 W(x,t)}{\partial x^2} \quad (6)$$

donde  $W$  es el contenido en humedad (kg agua/kg materia seca);  $D_e$  es la difusividad efectiva del agua ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $t$  es el tiempo (s) y  $x$  es la dirección característica de transporte (m). Esta ecuación se resolvió considerando la humedad inicial uniforme y el transporte de humedad simétrico (ecuación 7), así como despreciando la resistencia externa a este transporte (ecuación 8).

$$\frac{\partial W(0,t)}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$W(L, t) = W_{eq} \quad (8)$$

donde  $L$  es el semiespesor de la lámina de champiñón y  $W_{eq}$  es el contenido de humedad en equilibrio (kg agua/kg materia seca), estimada a partir de la isoterma de sorción publicada por Guizani et al. (2013). Tras integrar la solución analítica del modelo para todo el volumen de la muestra, se obtuvo la ecuación 9, que puede predecir la evolución del contenido en humedad medio de las láminas a lo largo del proceso.

$$W = W_{eq} + (W_0 - W_{eq}) \left[ 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n^2 L^2} e^{-D_e \lambda_n^2 t} \right] \quad (9)$$

donde  $W_0$  es la humedad inicial de la muestra y  $\lambda_n$  los valores característicos que cumplen  $\lambda_n L = (2n+1) \cdot \pi/2$ .

Para ajustar el modelo a los datos experimentales, se utilizó el método de optimización del Gradiente Reducido Generalizado con la herramienta Solver de Microsoft Excel™ (Microsoft Corporation, Seattle, USA). Así, se identificó el valor de difusividad efectiva ( $D_e$ ) que minimiza la diferencia entre los datos de humedad experimentales y calculados. Por su parte, para estimar la bondad del ajuste del modelo a los datos experimentales se utilizó el porcentaje de varianza explicada (%VAR; ecuación 10).

$$\%VAR = \left[ 1 - \frac{S_{xy}^2}{S_y^2} \right] \quad (10)$$

donde  $S_{xy}^2$  es la desviación estándar de la estimación y  $S_y^2$  es la desviación estándar de la muestra.

Tras el estudio de los resultados de varianza explicada, se pudo intuir que existían más mecanismos de transporte de humedad que no estaban incluidos en el modelo SRE. Por ello, se introdujo la resistencia externa en la modelización (modelo DSR), cambiando la ecuación 8 por la ecuación 11.

$$-D_e \rho_{ss} \frac{\partial W(L,t)}{\partial x} = k(a_w(L,t) - \varphi_{aire}) \quad (11)$$

En este caso, el modelo se resolvió utilizando un método implícito de diferencias finitas en el software Matlab (The Mathworks, Inc, Natick, USA). El ajuste de este modelo se llevó a cabo mediante la identificación de la difusividad efectiva ( $D_e$ ) y además el coeficiente de transferencia de masa ( $k$ ), que minimizaron la suma de las diferencias cuadráticas entre humedad experimental y calculada utilizando el método SIMPLEX disponible en Matlab. La bondad del ajuste también fue estimada mediante la varianza explicada.

## 2.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos experimentales recogidos se realizó mediante análisis de varianza (ANOVA) y la determinación de las diferencias mínimas significativas (LSD, Least Significant Difference). Para ello se utilizó Statgraphics Plus 5.1. (Statistical Graphics Corporation, Warrenton, USA).

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

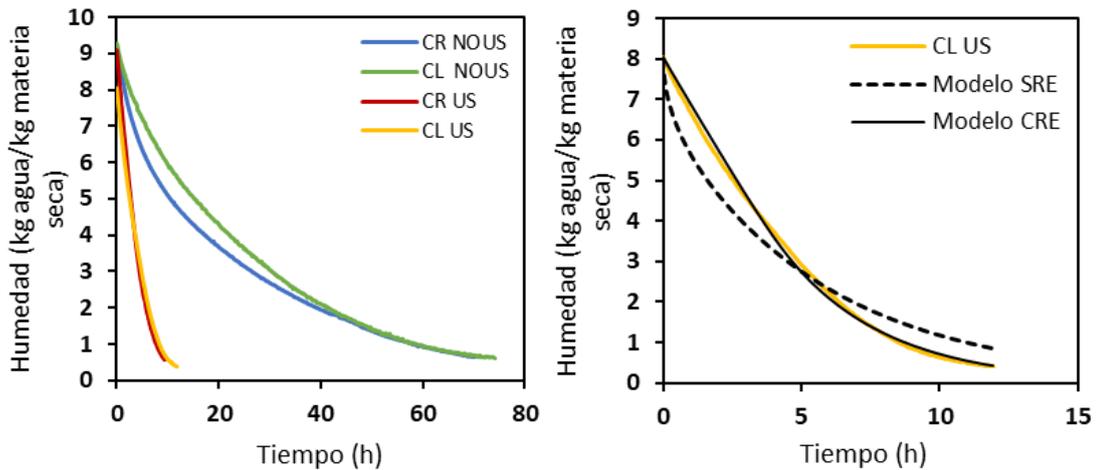
### 3.1. Cinéticas de secado experimentales

La humedad inicial de la materia prima fue de  $11 \pm 1$  kg agua/kg materia seca (ms). Esta humedad se redujo hasta  $8,3 \pm 0,3$  kg agua/kg ms después del escaldado de las muestras. En cuanto a las muestras deshidratadas, su humedad y su actividad de agua fueron inferiores a 0,7 kg agua/kg ms y 0,25, respectivamente, en todos los casos, lo que aseguró su estabilidad y que todas las experiencias fueron comparables.

Las cinéticas experimentales de secado mostraron que, en general, el método de congelación no afectó significativamente al tiempo final de secado. La aplicación de ultrasonidos de potencia sí que produjo una reducción importante del proceso de secado. Así, el tiempo necesario para alcanzar un 82,4 % de pérdida de peso disminuyó un 85,2 % al aplicar ultrasonidos en las experiencias CR y un 82,3 % en CL, pasando de  $64 \pm 3$  y  $60 \pm 11$  a  $9 \pm 2$  y  $10 \pm 1$  horas, respectivamente (figura 4).

### 3.2. Modelización de las cinéticas de secado

Los resultados obtenidos con el modelo sin resistencia externa (modelo SRE), mostraron un ajuste adecuado a los datos experimentales en las experiencias NOUS (tabla 1) como muestran los valores de porcentaje de varianza explicado superiores a 98,8 %. Por el contrario, el porcentaje de varianza explicada en las experiencias US fue del 93 %. Al utilizar el modelo con resistencia externa (modelo CRE) se mejoraron los ajustes de todas las experiencias, especialmente las US (figura 4), y se alcanzó un porcentaje de varianza explicada superior al 99 % en todos los casos. El modelo CRE diferencia entre resistencia interna y externa a la transferencia de materia. Por tanto, el mejor ajuste a las experiencias US indicaría que los ultrasonidos afectan a la relación entre resistencia externa e interna, aspecto que no puede ser descrito mediante un modelo que considere únicamente la resistencia interna a la transferencia de masa.



**FIGURA 4.** Cinéticas de secado CR NOUS, CL NOUS, CR US y CL US (izquierda) y datos experimentales y modelización SRE y CRE de una experiencia CL US (derecha).

En cuanto a la influencia de la aplicación de ultrasonidos sobre los valores de difusividad efectiva y coeficiente de transferencia de materia identificados con el modelo CRE, se observó un importante incremento en ambos casos (tabla 1). Esto podría ser debido a los efectos mecánicos generados por los ultrasonidos en el interior de las muestras, como el “efecto esponja” o a la creación de microcanales, o en el exterior, como la generación de microcorrientes en la interfase sólido-aire, que facilitarían el transporte del líquido, acelerando el proceso de secado. En cambio, no se observan diferencias significativas entre estos valores debidas al método de congelación empleado en la preparación de las muestras.

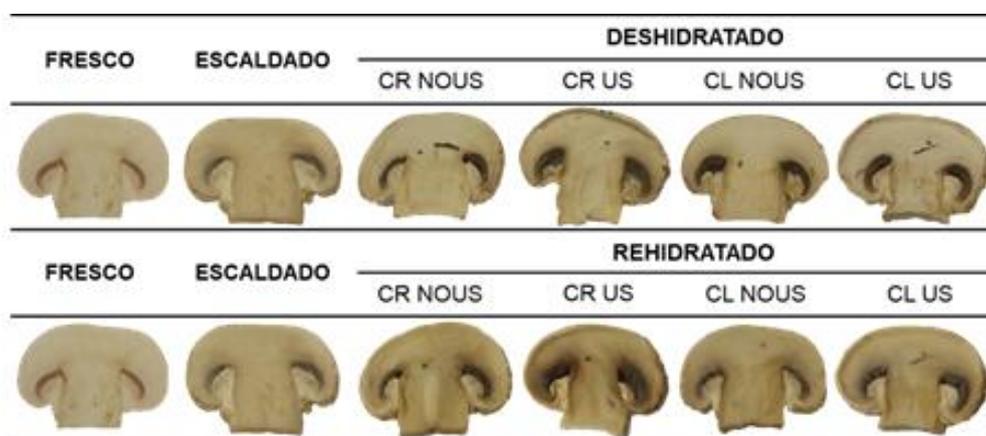
**TABLA 1.** Valores de difusividad efectiva identificada ( $D_e$ ), porcentaje de varianza explicada (%VAR) y coeficiente de transferencia de masa ( $k$ ) obtenidos mediante el modelo SRE y CRE

	Modelo SRE		Modelo CRE		
	$D_e$ ( $10^{-11}$ m <sup>2</sup> /s)	%VAR	$D_e$ ( $10^{-11}$ m <sup>2</sup> /s)	$k$ ( $10^{-4}$ m <sup>2</sup> /s)	%VAR
<b>CR NOUS</b>	3,6±0,4	98,8±0,7	3,7±0,2	3,5±0,6	99,3±0,6
<b>CL NOUS</b>	3,5±0,6	98,8±0,2	3,8±0,7	3,2±0,2	99,80±0,02
<b>CR US</b>	18±2	93±1	28±4	10±1	99,86±0,05
<b>CL US</b>	16,7±0,09	93±1	28±3	8,2±0,2	99,79±0,09

### 3.3. Parámetros de calidad

#### 3.3.1. COLOR

El aspecto general de todas las muestras de champiñón tratadas (escaldado, secado y rehidratación) fue satisfactorio y no se observaron grandes diferencias de color entre los tratamientos (figura 5).



**FIGURA 5.** Aspecto de las láminas de champiñón fresco, escaldado y deshidratado mediante CR NOUS, CR US, CL NOUS y CL US.

En cuanto a las medidas realizadas, las muestras escaldadas presentaron una leve disminución de la luminosidad ( $L^*$ ) y un ligero aumento del índice de pardeamiento (IP) (tabla 2). Sin embargo, este escaldado evitó la coloración parda intensa que puede causar la enzima polifenoloxidasas (Fang *et al.*, 1971). Esta enzima se mantiene inactiva durante la liofilización, debido a las bajas temperaturas, y durante su almacenamiento, por la baja actividad de agua. Sin embargo, se puede activar durante la rehidratación, confiriendo a las muestras un color pardo oscuro (Carrión *et al.*, 2018).

El tipo de congelación no influyó significativamente en la coloración de las muestras después del secado. Se observaron valores ligeramente mayores para  $L^*$  y menores para  $\Delta E^*$ , IP,  $a^*$  y  $b^*$  en las muestras CL NOUS y CL US

respecto a CR NOUS y CR US (tabla 2) aunque estas diferencias apenas se apreciaron a simple vista.

Sin embargo, la aplicación de ultrasonidos sí que generó diferencias significativas, produciendo la disminución de la luminosidad  $L^*$  y el aumento de IP,  $\Delta E^*$  y  $a^*$ . El parámetro  $b^*$ , en cambio, presentó valores similares en las muestras US y NOUS y se observó un comportamiento prácticamente igual del parámetro  $b^*$  y el croma,  $C^*$ , lo que indicaría que la saturación del color de las láminas depende de su coloración amarillenta. Estos resultados indicaron que el tratamiento CR US fue el que más afectó al color resultante de las láminas de champiñón secas.

Los resultados obtenidos en las muestras rehidratadas fueron similares a los obtenidos para las muestras secas. Así, tanto el índice de pardeamiento como  $\Delta E^*$ , que unifican el resto de parámetros, no son estadísticamente diferentes para CL NOUS, CR NOUS y CL US, y sólo aparecen diferencias significativas en CR US. Por tanto, el color de las muestras sólo se vio ligeramente afectado por la combinación de una congelación rápida y la aplicación de ultrasonidos.

**TABLA 2.** Coordenadas CIE  $L^*a^*b^*$  de las láminas de champiñón fresco, escaldado, rehidratado y deshidratado mediante CR NOUS, CL NOUS, CR US y CL US. Valores medio y desviación estándar.

	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E^*$	IP	$C^*$
<b>Fresco</b>	89±3	1±1	10±1	-	12±2	10±1
<b>Escaldado</b>	74±4	1±1	17±1	17±4	26±3	17±1
<b>Seco CR NOUS</b>	74±7	1±1	19±5	19±6	30±13	18±5
<b>Seco CL NOUS</b>	77±5	1,0±0,7	15±1	15±4	23±4	15±1
<b>Seco CR US</b>	61±9	3±2	20±4	28±6	43±16	20±4
<b>Seco CL US</b>	65±9	2±2	18±5	23±8	32±14	17±5
<b>RH CR NOUS</b>	67±7	2±2	22±5	24±4	32±4	19±1
<b>RH CL NOUS</b>	66±2	2±1	18±1	26±2	34±4	18±1
<b>RH CR US</b>	56±7	4±2	19±2	33±6	49±14	20±2
<b>RH CL US</b>	61±6	3±2	19±3	26±4	38±8	19±2

### 3.3.2. ENCOGIMIENTO

Los resultados obtenidos mostraron una gran variabilidad (tabla 3) de este parámetro. En general, se pudo observar que el escaldado produjo un mayor encogimiento axial y en espesor que el proceso de secado (con o sin aplicación de ultrasonidos). Entre los distintos tipos de secado se observó una mayor influencia de la aplicación de ultrasonidos en todas las dimensiones, pero especialmente en el espesor. Esto podría ser debido a un efecto más intenso de los ultrasonidos sobre el espesor ya que se aplican en sentido perpendicular al mismo. El tipo de congelación no afectó de forma significativa al encogimiento de las láminas durante el secado.

**TABLA 3.** Porcentaje de reducción de las dimensiones longitudinales, axiales y de espesor causado por el escaldado (escaldado respecto al fresco) y por el secado (deshidratado respecto al escaldado).

	<b>Reducción longitudinal (%)</b>	<b>Reducción axial (%)</b>	<b>Reducción en espesor (%)</b>
<b>Respecto al fresco:</b>			
- <b>Escaldado</b>	22,2±3,5	24,9±3,8	33,1±2,1
<b>Respecto al escaldado:</b>			
- <b>CR NOUS</b>	13,0±17,4	12,2±17,2	2,7±6,7
- <b>CL NOUS</b>	8,5±2,8	5,6±4,3	3,3±8,6
- <b>CR US</b>	19,2±4,7	15,1±4,9	25±6,6
- <b>CL US</b>	22,4±4,5	14,8±5,4	22,5±10,1

### 3.3.3. TEXTURA

El escaldado de las láminas frescas disminuyó significativamente la dureza y masticabilidad de las láminas y aumentó su elasticidad (tabla 4). En cuanto a las muestras rehidratadas, se observó una disminución significativa de la dureza debido probablemente a los efectos de la congelación y el secado sobre la estructura de las láminas que impidieron que recuperasen los valores obtenidos en las muestras frescas.

**TABLA 4.** Parámetros texturales obtenidos para láminas de champiñón fresco, escaldado y rehidratado tras ser deshidratado mediante CR NOUS, CL NOUS, CR US y CL US. Valores medios y desviación estándar.

	<b>Dureza</b>	<b>Cohesividad</b>	<b>Elasticidad</b>	<b>Masticabilidad</b>
<b>FRESCO</b>	86±15	0,8±0,1	0,49±0,07	34±11
<b>ESCALDADO</b>	56±15	0,6±0,1	0,6±0,02	25±10
<b>RH CR NOUS</b>	27±8	0,80±0,04	0,79±0,09	17±5
<b>RH CL NOUS</b>	29±9	0,78±0,04	0,81±0,08	18±6
<b>RH CR US</b>	6±2	0,77±0,04	1,0±0,2	4±1
<b>RH CL US</b>	9±3	0,74±0,02	1,0±0,2	6±2

La aplicación de ultrasonidos afectó de forma significativa a la textura de las láminas rehidratadas. Estos cambios fueron especialmente importantes en la dureza (pasando de valores de 27-29 N en NOUS a 6-9 N con US) y en la masticabilidad (de 17-18 en NOUS a 4-6 en US). Esto podría ser debido a una degradación de la estructura de las muestras causada por el estrés mecánico que inducen las ondas ultrasónicas. Este efecto podría haber enmascarado la posible influencia del tipo de congelación en los parámetros texturales estudiados, ya que se puede apreciar una tendencia de las muestras CR hacia una menor dureza y masticabilidad.

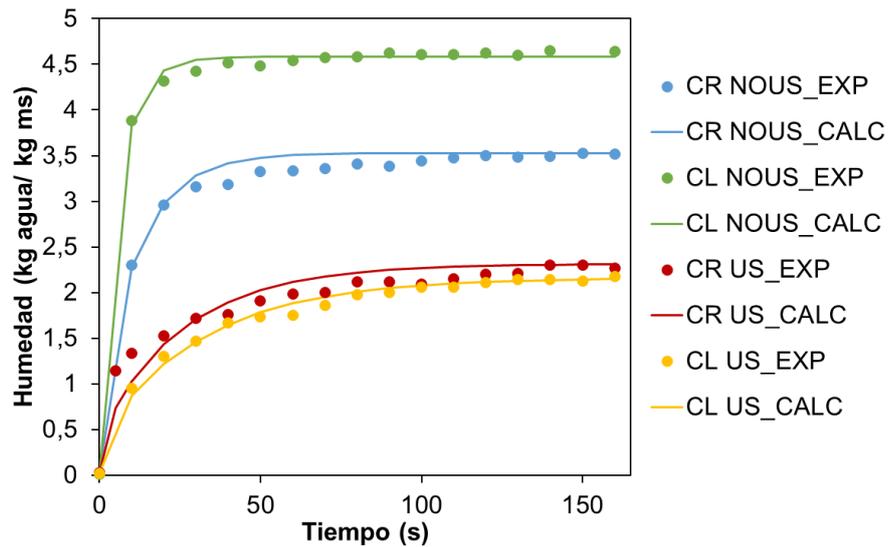
### 3.3.4. CINÉTICA Y CAPACIDAD DE REHIDRATACIÓN

Todas las experiencias de rehidratación se realizaron a partir de las muestras de champiñón deshidratadas, con un contenido de humedad inicial similar (tabla 4). La humedad final alcanzada por las muestras fue ligeramente superior en las muestras con congelación lenta que con congelación rápida (CR NOUS vs CL NOUS). El mayor tamaño de cristales de hielo producido en las muestras CL podría contribuir a generar una estructura más porosa que facilite la entrada de agua durante la rehidratación. Por el contrario, la aplicación de ultrasonidos redujo la humedad final alcanzada por las muestras, independientemente de la velocidad de congelación. El tiempo de rehidratación fue muy corto en todos los casos, aunque superior en las muestras tratadas con ultrasonidos (tabla 5). Estas diferencias podrían atribuirse a los efectos ocasionados por la aplicación de ultrasonidos sobre la estructura interna.

**TABLA 5.** Difusividad efectiva de rehidratación identificada ( $D_{er}$ ), porcentaje de varianza explicada (%VAR), tiempo de rehidratación (tiempo en alcanzar una humedad de 1,8 kg agua/kg m.s.) y humedad antes y tras la rehidratación de muestras de champiñón liofilizadas a presión atmosférica con y sin aplicación de ultrasonidos. Valores medios y desviación estándar.

	$D_{er}$ ( $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ )	%VAR	Tiempo (s)	Humedad inicial (kg agua/kg ms)	Humedad final (kg agua/kg ms)
<b>CR NOUS</b>	4±2	98,6±0,7	<10	0,021±0,006	3,4±0,8
<b>CL NOUS</b>	6±2	98±2	<10	0,019±0,007	4,3±0,5
<b>CR US</b>	1,5±0,7	96±4	>50	0,023±0,002	2,1±0,3
<b>CL US</b>	1,16±0,09	98,8±0,5	>70	0,029±0,009	2,1±0,1

La modelización de las cinéticas de rehidratación se llevó a cabo utilizando el modelo difusivo SRE, que presentó un ajuste adecuado a los datos experimentales con porcentajes de varianza explicada superiores al 96 % en todos los casos (figura 6). Los valores de difusividad efectiva identificada de rehidratación obtenidos mostraron una disminución con la aplicación de ultrasonidos y con congelación rápida (solo en NOUS), aunque éstas no llegaron a ser significativas.

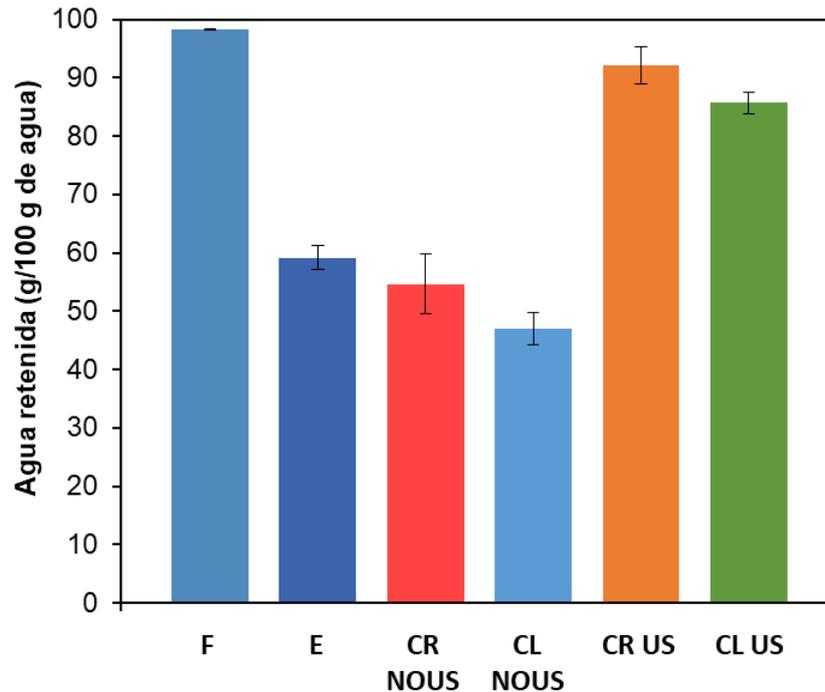


**FIGURA 6.** Cinéticas de rehidratación experimentales (EXP) y calculadas con el modelo SRE (CALC) de las muestras de champiñón CR NOUS, CL NOUS, CR US y CL US.

### 3.3.5. CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA

Los valores de capacidad de retención de agua obtenidos de las muestras frescas, escaldadas y rehidratadas mostraron diferencias significativas entre ellas. El tipo de congelación afectó de forma significativa a la capacidad de retención de agua de las láminas de champiñón. Las muestras CR mostraron una mayor capacidad de retención que las CL. Esto se podría explicar por el desarrollo de cristales de hielo de mayor tamaño y extracelulares en CL mientras que en CR estos cristales serían más pequeños y de forma intracelular (Li et al., 2018). El crecimiento de cristales de hielo provoca la rotura y compresión de las células en función del tamaño (Voda et al., 2012) que dificultaría la retención de agua.

Sin embargo, la variable que más afectó a la capacidad de retención de agua fue la aplicación de US. Así, se pasó de 55 y 47 % de agua retenida en las muestras CR NOUS y CL NOUS a 92 y 86 % en CR US y CL US (figura 7). Esto podría ser debido a los cambios estructurales que inducirían los ultrasonidos, que por un lado reducen ligeramente la capacidad total de rehidratación, pero hacen que el agua se retenga mejor por la estructura.



**FIGURA 7.** Porcentaje de agua retenida respecto al agua contenida en la muestra de las láminas frescas (F), escaldadas (E) y rehidratadas CR NOUS, CL NOUS, CR US y CL US.

#### 4. CONCLUSIONES

La aplicación de ultrasonidos de potencia redujo el tiempo de secado por liofilización a presión atmosférica de láminas de champiñón e incrementó la difusividad efectiva y el coeficiente de transferencia de materia. El modelo difusivo CRE permitió un mejor ajuste a los datos experimentales que el modelo SRE, lo que indicó que la aplicación de ultrasonidos afecta tanto a la resistencia interna a la transferencia de masa como a la externa. Respecto a la influencia de la aplicación de ultrasonidos en los distintos parámetros de calidad del producto final, se apreciaron ligeros efectos sobre el color de las láminas deshidratadas. Sin embargo, el escaldado evitó una coloración parda intensa de las láminas rehidratadas que mantuvieron el color de las láminas secas. Las láminas deshidratadas no se encogieron de forma importante durante el secado, aunque esta reducción de tamaño fue ligeramente superior con la aplicación de ultrasonidos. Así mismo, los ultrasonidos no afectaron de forma importante a la capacidad de rehidratación, aunque se observaron valores de difusividad efectiva de rehidratación ligeramente inferiores. La capacidad de retención de agua de las láminas tratadas con ultrasonidos fue superior a las no tratadas a pesar de alcanzar una menor humedad final durante la rehidratación. El tipo de congelación no afectó a la cinética de secado ni a los parámetros de color, encogimiento y textura de las láminas, probablemente debido a que sus efectos fueron enmascarados. Sin embargo, la rehidratación de las láminas secas mostró ligeras diferencias causadas por la velocidad de congelación utilizada. Las muestras congeladas rápidamente

alcanzaron un valor ligeramente inferior de humedad final durante la rehidratación, si bien el agua fue mejor retenida que en las muestras congeladas lentamente, debido probablemente a la formación de cristales de hielo de menor tamaño. La cinética de rehidratación mostró, además, valores inferiores en la difusividad efectiva de rehidratación.

En vista de los resultados obtenidos se puede concluir que la liofilización a presión atmosférica con aplicación de ultrasonidos de potencia puede ser considerada una tecnología de interés pues se aceleró la cinética de secado sin generar grandes efectos en la calidad de las muestras de champiñón deshidratadas. Además, se observó que la influencia de la velocidad de congelación en la cinética de proceso y calidad del producto final fue apenas perceptible.

## 5. REFERENCIAS

- AOAC, Association of Official Analytical Chemist (1997). Official methods of analysis, Arlington, Virginia, EEUU.
- Argyropoulos, D.; Tahir Khan, M.; Muller, J. 2011. Effect of air temperature and pretreatment on color changes and texture of dried *Boletus edulis* mushroom. *Drying Technology*, 29: 1890-1900.
- Cárcel, J.A.; García-Pérez, J.V.; Benedito, J.; Mulet, A. 2012. Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound. *Journal of Food Engineering*, 110: 200-207.
- Cárcel, J.A.; García-Pérez, J.V.; Riera, E.; Rosselló, C.; Mulet, A. 2017. Ultrasonically assisted drying, en: Villamiel, M., García-Pérez, J. V., Montilla, A., Cárcel, J. A., Benedito, J. (eds) *Ultrasound in Food Processing*. John Wiley & Sons Ltd. Reino Unido, 371-391.
- Cárcel, J.A.; García-Pérez, J.V.; Riera, E.; Rosselló, C.; Mulet, A. 2014. Drying assisted by power ultrasound, en: Tsotsas, E.; Mujumdar, A. (eds) *Modern Drying Technology Volume 5: Process intensification. 1ª Ed.* WILEY-VCH. Alemania, 237-273.
- Carrión, C.; Mulet, A.; García-Pérez, J.V.; Cárcel, J.A. 2018. Ultrasonically assisted atmospheric freeze-drying of button mushroom. Drying kinetics and product quality. *Drying Technology*, 36: 1814-1823.
- Chemat, F.; Huma, Z.; Kamran Khan, M. 2011. Applications of ultrasound in food technology: processing, preservation and extraction. *Journal of Food Engineering*, 110: 200-207.
- Claussen, I.C.; Ustad, T.S.; Strommen, I.; Walde, P.M. 2007. Atmospheric freeze-drying – A review. *Drying Technology*, 25: 947-957.
- CTICH, Centro Tecnológico de Investigación del Champiñón de La Rioja (2015). Propiedades nutricionales y saludables de los hongos, La Rioja. Dirección URL: <http://www.adenyd.es/wp-content/uploads/2015/02/Informe-sobre-champi%C3%B1n-y-setas.pdf>. [Consulta: 11 de noviembre de 2018].
- Do Nascimento, E.M.G.C; Mulet, A.; Ramírez-Ascherí, J.L.; Piler De Carvalho, C.W.; Cárcel, J.A. 2016. Effects of high-intensity ultrasound on drying kinetics and antioxidant properties of passion fruit peel. *Journal of Food Engineering*, 170: 108-118.
- Fang, T.T.; Footrakul, P.; Luh, B.S. 1971. Effects of blanching, chemical treatments and freezing methods on quality of freeze-dried mushrooms. *Journal of Food Science*, 36: 1044-1048.
- Fernandes, F.A.N.; Rodrigues, S.; Cárcel, J.A.; García-Pérez, J.V. 2015. Ultrasound-assisted air-drying of Apple (*Malus domestica* L.) and its effects on the vitamin of the dried product. *Food Bioprocess Technology*, 8: 1503-1511.
- García-Pérez, J.V. 2007. Contribución al estudio de la aplicación de ultrasonidos de potencia en el secado convectivo de alimentos. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- García-Pérez, J.V.; Cárcel, J.A.; Benedito, J.; Mulet, A. 2007. Power ultrasound enhancement in food drying. *Food and Bioprocess Technology*, 85: 247–254.
- García-Pérez, J.V.; Cárcel, J.A.; Riera, E.; Rosselló, C.; Mulet, A. 2012. Intensification of low-temperature drying by using ultrasound. *Drying Technology*, 30: 1199-1208.

- Guizani, N.; Rahman, M.S.; Klibi, M.; Al-Rawahi, A.; Bornaz, S. 2013. Thermal characteristics of *Agaricus bisporus* mushroom: freezing point, glass transition and maximal freeze-concentration condition. *International Food Research Journal*, 20: 1945-1952.
- Haiying, W.; Shaozhi, Z.; Guangming, C. 2007. Experimental study on the freezing characteristics of four kinds of vegetables. *LWT-Food Science and Technology*, 40:1112-1116.
- Li, T.; Lee, J.W.; Luo, L.; Kim, J. 2018. Evaluation of the effects of different freezing and thawing methods on the quality preservation of *Pleurotus eryngii*. *Applied Biological Chemistry*, 61(3): 257-265.
- Lidhoo, C.K.; Agrawal, Y.C. 2008. Optimizing temperature in mushroom drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 32: 881-897.
- Mohapatra, D.; Bira, Z.M.; Kerry, J.P.; Frías, J.M.; Rodrigues, F.A. 2010. Postharvest hardness and color evolution of white button mushrooms (*Agaricus bisporus*). *Journal of Food Science*, 75: 146-152.
- Moreno, C.; Brines, C.; Mulet, A.; Rosselló, C.; Cárcel, J.A. 2017. Antioxidant potential of atmospheric freeze-dried apples as affected by ultrasound application and sample surface. *Drying Technology*, 35: 957-968.
- Ortuño, C.; Pérez-Munuera, I.; Puig, A.; Riera, E.; García-Pérez, J.V. 2010. Influence of power ultrasound application on mass transport and microstructure of orange peel during hot air drying. *Physics Procedia*, 3: 153-159.
- Ozuna, C. 2013. Estudio de la aplicación de ultrasonidos de alta intensidad en sistemas sólido-líquido y sólido-gas. Influencia en la cinética de transporte de materia y en la estructura de los productos. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Puig, A.; Pérez-Munuera, I.; Cárcel, J.A.; Hernando, I.; García-Pérez, J.V. 2012. Moisture loss kinetics and microstructural changes in eggplant (*Solanum melongena* L.) during conventional and ultrasonically assisted convective drying. *Food and Bioprocess Technology*, 90: 624-632.
- Santacatalina, J.V.; Cárcel, J.A.; Simal, S.; García-Pérez, J.V.; Mulet, A. 2012. Atmospheric freeze drying assisted by power ultrasound. *Materials Science and Engineering*, 42: 012021.
- Santacatalina, J.V.; Fissore, D.; Cárcel, J.A.; Mulet, A.; García-Pérez, J.V. 2015. Model-based investigation into atmospheric freeze drying assisted by power ultrasound. *Journal of Food Engineering*, 151: 7-15.
- Santacatalina, J.V.; Guerrero, M.E.; García-Pérez, J.V.; Mulet, A.; Cárcel, J.A. 2016. Ultrasonically assisted low-temperature drying of desalted codfish. *LWT-Food Science and Technology*, 65: 444-450.
- Szczesniak, A.S. 1963. Classification of textural characteristics. *Journal of Food Science*, 28: 385-389.
- Vega-Mercado, H.; Góngora-Nieto, M.M.; Barbosa-Cánovas, G.V. 2001. Advances in dehydration of foods. *Journal of Food Engineering*, 49:271-289.
- Voda, A.; Homan, N.; Witek, M.; Duijster, A.; Van Dalen, G.; Van Der Sman, R.; Nijssse, J.; Van Vliet, L.; Van As, H.; Van Duynhoven, J. 2012. The impact of freeze-drying on microstructure and rehydration properties of carrot. *Food Research International*, 49: 687-693.