

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA Y DEL MEDIO NATURAL

GRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS ALIMENTOS



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

**INFLUENCIA DE LA APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS
EN LA CINÉTICA DE LIOFILIZACIÓN A PRESIÓN
ATMOSFÉRICA Y EN LA CALIDAD FINAL DE
CHAMPIÑÓN**

CURSO 2016-2017

TRABAJO FIN DE GRADO

Autor: Clara Carrión Balufo

Director: Juan Andrés Cárcel Carrión

Valencia, junio 2017.



Título: Influencia de la aplicación de ultrasonidos en la cinética de liofilización a presión atmosférica y en la calidad final de champiñón.

Resumen:

La liofilización a presión atmosférica es una técnica alternativa a la liofilización a vacío muy interesante para la obtención de productos deshidratados de alta calidad al posibilitar su funcionamiento en continuo. Sin embargo, se trata de un proceso muy lento que la aplicación de ultrasonidos de potencia podría intensificar. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la influencia de la aplicación de ultrasonidos en la cinética de liofilización a presión atmosférica de champiñón y en la calidad del producto deshidratado final.

Para ello, se realizaron experiencias de secado de láminas de champiñón (*Agaricus bisporus*) a -10°C , 2 m/s y con (30W y 60W; 21,9 kHz) y sin aplicación de ultrasonidos, y en un liofilizador a vacío convencional. Las cinéticas de secado fueron modelizadas considerando un modelo difusivo sin resistencia externa y se determinaron distintos parámetros de calidad: color, textura, rehidratación y daño celular.

La aplicación de ultrasonidos influyó significativamente en las cinéticas de secado incrementando la difusividad efectiva hasta un 280,6% y reduciendo el tiempo de secado hasta un 74,2%. Respecto al color, se observó un cambio drástico del color de las láminas de champiñón rehidratadas respecto a las frescas y secas independientemente al tipo de secado realizado. Las muestras deshidratadas con ultrasonidos resultaron un poco más blandas y presentaron valores ligeramente superiores de cohesividad y elasticidad. La aplicación de la mayor potencia ultrasónica ensayada también produjo una ligera ralentización de la rehidratación y disminuyó la cantidad total de agua absorbida. En cuanto al grado de deterioro celular, fue la congelación previa al secado de las muestras el factor que más influyó.

En general se puede establecer que la aplicación de ultrasonidos durante la liofilización a presión atmosférica de champiñón se puede considerar una tecnología interesante puesto que aceleró significativamente el proceso sin afectar prácticamente a la calidad del producto final.

Palabras clave: deshidratación, humedad, difusividad efectiva, tiempo de secado, calidad

Alumna: Clara Carrión Balufo

Profesor: Juan Andrés Cárcel Carrión

Valencia, junio 2017.

Title: Influence of ultrasound application during the atmospheric freeze drying of mushrooms on drying kinetics and final quality.

Abstract:

Atmospheric freeze drying represents an interesting alternative to vacuum freeze drying, since it is able to produce high quality dehydrated products and allows continuous operation. Nevertheless, it is a very slow process which might be intensified by power ultrasound. The main aim of this work was to evaluate the feasibility of using power ultrasound to improve the atmospheric freeze drying of mushroom, considering not only the kinetic effects but also the influence on the quality of the dried mushroom.

For that purpose, mushroom slices (*Agaricus bisporus*) were dried (-10°C and 2 m/s) with (30W and 60W; 21.9 kHz) and without ultrasound application, and in a vacuum freeze dryer. The drying kinetics were modelled by considering a diffusive model without external resistance. Colour, texture, rehydration and cell damage were measured to evaluate the dried mushroom quality.

The application of power ultrasound influenced significantly the drying kinetics increasing the effective diffusivity up to 280.6 % and achieving drying time reductions of up to 74.2 %. Regarding the colour, a drastic change of the rehydrated mushroom slices colour with regard to the fresh samples was observed independently to the drying means. The ultrasonically assisted dried samples turned out to be a bit softer and presented values lightly greater of cohesiveness and elasticity. The higher ultrasonic power tested also produced a light slowing down of the rehydration and decreased the total quantity of absorbed water. As for the cellular deterioration degree, the freezing which precedes drying was the factor that influenced the most.

In general, it is possible to establish that the application of power ultrasound during atmospheric freeze drying of mushroom might be considered as an interesting technology providing that it accelerated significantly the process without concerning significantly the quality of the final product.

Key words: dehydration, moisture, effective diffusivity, drying time, quality

Student: Clara Carrión Balufo

Professor: Juan Andrés Cárcel Carrión

Valencia, June 2017.

Títol: Influència de l'aplicació d'ultrasons a la cinètica de liofilització a pressió atmosfèrica i en la qualitat final de xampinyó.

Resum:

La liofilització a pressió atmosfèrica és una tècnica alternativa a la liofilització a buit molt interessant per a l'obtenció de productes deshidratats d'alta qualitat al possibilitar el seu funcionament en continu. No obstant això, es tracta d'un procés molt lent que l'aplicació d'ultrasons de potència podria intensificar. L'objectiu del present treball va ser avaluar la influència de l'aplicació d'ultrasons en la cinètica de liofilització a pressió atmosfèrica de xampinyó i en la qualitat del producte deshidratat final.

Per a això, es van realitzar experiències d'assecat de làmines de xampinyó (*Agaricus bisporus*) a -10°C , 2 m/s i amb (30W i 60W; 21,9 kHz) i sense aplicació d'ultrasons, i en un liofilitzador a buit convencional. Les cinètiques d'assecat van ser modelitzades considerant un model difusiu sense resistència externa i es van determinar distints paràmetres de qualitat: color, textura, rehidratació i dany cel·lular.

L'aplicació d'ultrasons va influir significativament en les cinètiques d'assecat incrementant la difusivitat efectiva fins a un 280,6% i reduint el temps d'assecat fins a un 74,2%. Respecte del color, es va observar un canvi dràstic del color de les làmines de xampinyó rehidratades respecte a les fresques i seques independentment al tipus d'assecat realitzat. Les mostres deshidratades amb ultrasons van resultar un poc més blanques i van presentar valors lleugerament superiors de cohesivitat i elasticitat. L'aplicació de la major potència ultrasònica assajada també va produir una lleugera ralentització de la rehidratació i va disminuir la quantitat total d'aigua absorbida. Quant al grau de deteriorament cel·lular, va ser la congelació prèvia a l'assecat de les mostres el factor que més va influir.

En general es pot establir que l'aplicació d'ultrasons durant la liofilització a pressió atmosfèrica de xampinyó es pot considerar una tecnologia interessant ja que va accelerar significativament el procés sense afectar pràcticament la qualitat del producte final.

Paraules clau: deshidratació, humitat, difusivitat efectiva, temps d'assecat, qualitat

Alumna: Clara Carrión Balufo

Professor: Juan Andrés Cárcel Carrión

València, juny 2017.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor, Juan Andrés Cárcel, por su ayuda, tiempo y conocimientos.

A Marina, por contestar todas y cada una de mis infinitas preguntas.

A Bea, por acompañarme en el día a día y hacer de este viaje una experiencia increíble.

En especial a mis padres y hermanos, por su incondicional apoyo y eterna paciencia. Gracias por vuestros consejos y por ayudarme a elegir mi camino.

ÍNDICE

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Champiñón deshidratado como producto de interés	1
1.2. Deshidratación de alimentos	3
1.3. Ultrasonidos	5
1.4. Secado asistido con ultrasonidos	6
1.4.1. Influencia de los ultrasonidos sobre la cinética de secado	7
1.4.2. Influencia de los ultrasonidos sobre la calidad del producto final	8
2. OBJETIVOS	9
3. MATERIALES Y MÉTODOS	10
3.1. Materia prima	10
3.2. Determinación de humedad	11
3.3. Equipos de secado	11
3.3.1. Secadero convectivo asistido con ultrasonidos	11
3.3.2. Liofilización convencional	13
3.4. Experiencias de liofilización a presión atmosférica	13
3.5. Parámetros de calidad	14
3.5.1. Color	14
3.5.2. Textura	16
3.5.3. Rehidratación	17
3.5.4. Daño celular	17
3.5.5. Actividad de agua	18
3.6. Modelización de las cinéticas de secado y rehidratación	18
3.7. Análisis estadístico	19
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
4.1. Cinéticas de secado experimentales	20
4.1.1. Influencia de la aplicación de ultrasonidos de potencia	20
4.1.2. Modelización de las cinéticas de secado	22
4.2. Parámetros de calidad	23
4.2.1. Color	23
4.2.2. Textura	26
4.2.3. Rehidratación y su modelización	28
4.2.4. Daño celular	33
5. CONCLUSIONES	35
6. BIBLIOGRAFÍA	36

ÍNDICE DE FIGURAS

1. INTRODUCCIÓN

Figura 1.1. Datos de consumo de champiñón fresco en España. Evolución desde el año 2012 al 2016 (MAPAMA, 2016).....	2
--	---

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Figura 3.1. Mandolina en V utilizada para laminar los champiñones.....	10
Figura 3.2. Portamuestras con láminas de champiñón fresco.....	10
Figura 3.3. Esquema del secadero convectivo asistido con ultrasonidos (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.....	12

Figura 3.4. Pantalla de selección de las variables de la operación de secado de la aplicación de control y monitorización del proceso.....	13
---	----

Figura 3.5. Detalle de lugar de medida de color de la superficie de champiñón.....	15
---	----

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Figura 4.1. Cinéticas de secado por liofilización a presión atmosférica (-10 °C; 2m/s) de láminas de champiñón sin (LPA-0) y con aplicación de ultrasonidos (LPA-30, LPA-60).....	21
--	----

Figura 4.2. Datos experimentales y modelización de cinéticas de liofilización a presión atmosférica (-10 °C; 2m/s) de láminas de champiñón con (LPA-30 y LPA-60) y sin (LPA-0) aplicación de ultrasonidos.....	22
---	----

Figura 4.3. Valores medios de cohesividad e intervalos LSD ($p < 0,05$) de las muestras de champiñón frescas (F), liofilizadas a presión atmosférica con (LPA-30, LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos y liofilizadas a vacío (LV) rehidratadas.....	27
---	----

Figura 4.4. Valores medios de elasticidad e intervalos LSD de las muestras de champiñón frescas (F), liofilizadas a presión atmosférica con (LPA-30, LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos y liofilizadas a vacío (LV) rehidratadas.....	28
--	----

Figura 4.5. Valores medios del tiempo de rehidratación e intervalos LSD de las muestras liofilizadas a presión atmosférica con (LPA-30, LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos y liofilizadas a vacío (LV).....	30
--	----

Figura 4.6. Datos experimentales y modelización de las cinéticas de rehidratación de las muestras liofilizadas a presión atmosférica con (LPA-30, LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos y liofilizadas a vacío (LV).....31

Figura 4.7. Relación entre los datos experimentales de humedad y los calculados por el modelo DSR durante la liofilización a presión atmosférica con (LPA-30, LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos.....32

Figura 4.8. Influencia del tratamiento en el daño celular (C_{et}) e intervalos LSD de las muestras de champiñón frescas (F), descongeladas (D), liofilizadas a presión atmosférica con (LPA-30 y LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos y liofilizadas a vacío (LV).....34

ÍNDICE DE TABLAS

1. INTRODUCCIÓN

Tabla 1.1. Composición nutricional del champiñón (FEN, 2007).....2

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Tabla 3.1. Resumen de los parámetros de calidad estudiados.....14

Tabla 3.2. Parámetros obtenidos a partir del análisis del perfil de textura (Torres *et al*, 2015).....16

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4.1. Valores medios y desviación estándar de las actividades de agua (A_w) de los champiñones liofilizados a presión atmosférica sin aplicación de ultrasonidos (LPA-0), con aplicación de 30 (LPA-30) y 60 (LPA-60) W de potencia ultrasónica, y liofilizados a vacío (LV)..20

Tabla 4.2. Tiempos de secado necesarios para obtener una humedad de 0,75 kg agua/kg materia seca durante la liofilización a presión atmosférica (-10°C ; 2m/s) de láminas de champiñón con (LPA-30 Y LPA-60) y sin aplicación de ultrasonidos (LPA-0). Reducción del mismo en las experiencias LPA-30 y LPA-60 respecto a las LPA-0. Valores medios y desviación estándar.....21

Tabla 4.3. Difusividad efectiva identificada (D_e) en los ajustes del modelo DSR a los datos experimentales de liofilización a presión atmosférica (-10°C ; 2 m/s) de láminas de champiñón con (LPA-30 y LPA-60) y sin (LPA-0) aplicación de ultrasonidos y porcentaje de varianza explicada (%VAR). Valores medios y desviación estándar.....23

Tabla 4.4. Aspecto de las láminas de champiñón fresco (F), liofilizado a presión atmosférica con (LPA-30 y LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos y liofilizado a vacío (LV), y posteriormente rehidratado (RH).....	23
Tabla 4.5. Coordenadas de color en el espacio CIE L*a*b* de láminas de champiñón fresco (F), liofilizadas a presión atmosférica sin (LPA-0) y con ultrasonidos (LPA-30 y LPA-60) y liofilizadas a vacío (LV). Variación de color (ΔE^*) respecto a champiñón fresco. Valores medios y desviación estándar.....	24
Tabla 4.6. Coordenadas de color en el espacio CIE L*a*b* de las láminas de champiñón rehidratado previamente liofilizadas a presión atmosférica sin (LPA-0) y con ultrasonidos (LPA-30 y LPA-60) y liofilizadas a vacío (LV). Variación de color (ΔE^*) respecto a champiñón fresco. Valores medios y desviación estándar.....	25
Tabla 4.7. Valor del croma (C^*) para láminas de champiñón liofilizadas a presión atmosférica sin (LPA-0) y con ultrasonidos (LPA-30 y LPA-60) y liofilizadas a vacío (LV), posteriormente rehidratadas. Valores medios y desviación estándar.....	25
Tabla 4.8. Valores medios y desviación estándar del Índice de Pardeamiento (IP) de las muestras liofilizadas a presión atmosférica con (LPA-30, LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos, liofilizadas a vacío (LV) y posteriormente rehidratadas.....	26
Tabla 4.9. Parámetros texturales obtenidos para muestras de champiñón fresco y rehidratado tras liofilización a presión atmosférica con (LPA-30, LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos y tras liofilización a vacío (LV). Valores medios y desviación estándar.....	27
Tabla 4.10. Humedad en base seca (kg agua/kg materia seca) de las láminas de champiñón liofilizadas a presión atmosférica con (LPA-30, LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos y liofilizadas a vacío (LV) en el punto final del secado e inicial de la rehidratación. Valores medios y desviación estándar.....	29
Tabla 4.11. Humedad final (X_{wf}) alcanzada por las muestras de champiñón liofilizadas a presión atmosférica con (LPA-30, LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos y liofilizadas a vacío (LV) durante la rehidratación y tiempo necesario para alcanzar una humedad de 2,50 kg de agua/kg materia seca (ms). Valores medios y desviación estándar.....	29
Tabla 4.12. Difusividad efectiva identificada (D_{er}) y porcentaje de varianza explicada por el modelo DSR de la rehidratación de muestras de champiñón previamente liofilizadas a presión atmosférica con (LPA-30, LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos y liofilizadas a vacío (LV). Valores medios y desviación estándar.....	32
Tabla 4.13. Porcentaje de pérdida de electrolitos (P_{er}) de láminas de champiñón frescas (F), descongeladas (D) y secadas con los distintos métodos llevados a cabo en este estudio (LPA-0, LPA-30, LPA-60 y LV). Valores medios y desviación estándar.....	33

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Champiñón deshidratado como producto de interés

El champiñón es un hongo basidiomiceto perteneciente a la familia Agaricaceae (Leiva *et al.*, 2015) y del que se distinguen dos importantes especies: *Agaricus campestri* en el caso de que sean silvestres y *Agaricus bisporus* si se trata de champiñón cultivado (EROSKI CONSUMER, 2017). Es en este último en el que se centra el presente estudio.

El champiñón cultivado, conocido como bola de nieve o seta de París, es el cuerpo fructífero del hongo y está formado por tres partes claramente diferenciadas: el sombrero, que es la parte más carnosa del hongo, de color blanco y forma redondeada; el pie, es decir, el soporte cilíndrico que sostiene el sombrero; y el himenio, formado por un conjunto de laminillas que se encuentran en la parte inferior del sombrero (FEN, 2007). El sombrero suele medir de 3 a 12 centímetros de diámetro, tiene una altura entre 4 y 10 centímetros y su peso varía entre 10 y 20 gramos.

El color del champiñón es blanco con tonalidades más oscuras conforme aumenta su maduración. Posee un sabor característico y suave conocido como umami que se encuentra en alimentos ricos en un aminoácido natural, el glutamato monosódico. Este aminoácido se encuentra presente especialmente en alimentos proteicos, como los productos lácteos, la carne o el pescado (CTICH, 2015).

Respecto a la composición nutricional de esta seta, es de destacar que se trata de un alimento muy poco calórico cuyo principal componente es agua, seguido de hidratos de carbono y fibra. Su porción comestible es de 80 gramos por cada 100 gramos de producto fresco. Es un alimento que proporciona sensación de saciedad y que mejora el tránsito intestinal debido su importante fuente de fibra, por lo que es muy útil en dietas hipocalóricas. Además, posee propiedades que protegen frente al cáncer de colon y enfermedades cardiovasculares (FEN, 2007).

También es una fuente de aminoácidos esenciales pues, aunque en pequeña cantidad, contiene todos los aminoácidos considerados esenciales para el ser humano. Su perfil proteico es más similar a la proteína animal que a la vegetal. Los champiñones son especialmente ricos en ácido glutámico, ácido aspártico y arginina (CTICH, 2015).

Los champiñones destacan por poseer polisacáridos típicos del reino animal como el glucógeno, y por la ausencia de almidón y celulosa, típicos de los vegetales. Los polisacáridos que se encuentran en mayor proporción en la fibra del champiñón son los beta-glucanos (4-13% de la fibra dietética total) seguidos de la quitina (CTICH, 2015).

En cuanto al contenido en vitaminas del champiñón, destacan principalmente los altos valores de niacina, considerándose así como uno de los vegetales con mayor contenido en esta vitamina. Además, presenta valores interesantes de riboflavina, tiamina y vitamina C. En el

caso de los minerales, contiene importantes cantidades de potasio, fósforo, selenio y hierro (Tabla 1.1.).

Tabla 1.1. Composición nutricional del champiñón (FEN, 2007).

Por cada 100 gramos de porción comestible de champiñón:			
Energía (kcal)	31	Potasio (mg)	470
Agua (g)	91,4	Fósforo (mg)	115
Proteínas (g)	1,8	Selenio (µg)	9
Lípidos totales (g)	0,3	Zinc (mg)	0,1
Hidratos de carbono (g)	4	Equivalentes niacina (mg)	4,6
Fibra (g)	2,5	Riboflavina (mg)	0,41
Calcio (mg)	9	Tiamina (mg)	0,1
Hierro (mg)	1	Vitamina C (mg)	4
Yodo (µg)	3	Folatos (µg)	23
Magnesio (mg)	14	Vitamina B ₆ (mg)	0,1
Sodio (mg)	5	Vitamina E (mg)	0,12

En cuanto a la producción y el consumo de champiñón fresco en España, ambos experimentaron un fuerte crecimiento de entorno al 40% entre los años 2007 y 2013. Sin embargo, a partir del 2013 se ha observado un descenso en la producción que se ha visto frenado en el año 2016 (Figura 1.1.). Por otro lado, se está generando una tendencia importante de consumo de setas deshidratadas. De hecho, actualmente este tipo de productos se pueden encontrar en la mayoría de supermercados y grandes superficies, cosa que no ocurría hace unos años. Por ello, el estudio de la producción de champiñón deshidratado cobra especial importancia.

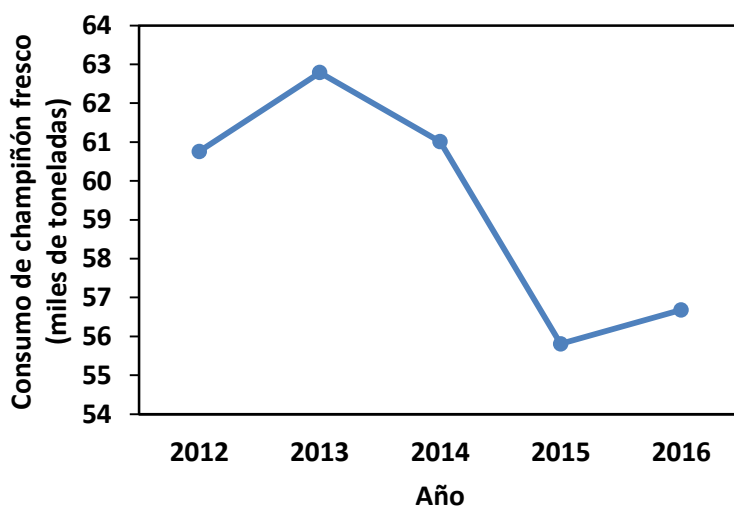


Figura 1.1. Datos de consumo de champiñón fresco en España. Evolución desde el año 2012 al 2016 (MAPAMA, 2016).

Las setas deshidratadas poseen numerosas aplicaciones, como su rehidratación para ser cocinadas como si de setas frescas se tratara, su empleo como condimento o su trituración para obtener productos en forma de harinas de setas que se utilizan en la preparación de cremas y salsas. De hecho, las setas deshidratadas, en especial el champiñón, son muy utilizadas por la industria alimentaria para producir sopa y crema deshidratadas, risotto, arroz, cuscús y pasta precocinados, entre otros. Por ello, es importante estudiar los procesos relacionados con la obtención de este producto.

1.2. Deshidratación de alimentos

El secado es una operación de deshidratación que se encuentra entre los métodos de conservación más antiguos (Alves-Filho *et al.*, 2007). Este proceso consiste en la eliminación parcial del contenido en agua con el objetivo de disminuir la actividad de agua. De esta manera, se puede detener o ralentizar el crecimiento de microorganismos causantes de deterioro y descomposición, así como el desarrollo de reacciones químicas indeseadas (Vega-Mercado *et al.*, 2001) y asegurar la estabilidad. De esta forma, los productos adecuadamente deshidratados pueden ser almacenados en condiciones ambientales durante largos períodos de tiempo (Alves-Filho *et al.*, 2007). Otras ventajas de la deshidratación como método de conservación son los bajos costes de almacenamiento y manejo de los productos secos (Alves-Filho *et al.*, 2007).

Sin embargo, durante el secado se producen importantes cambios, tanto estructurales como fisicoquímicos, que afectan a la calidad del producto final (Sanjuán *et al.*, 1999). El reciente aumento de la preocupación de los consumidores por una alimentación saludable y por unos productos más naturales está generando una intensificación de la demanda de productos de alta calidad (Alves-Filho *et al.*, 2007). Por ello, la deshidratación de alimentos debe realizarse de manera que se minimice el efecto en ciertos parámetros como el color, la composición nutricional, la textura o la forma (Sanjuán *et al.*, 1999).

La eliminación del agua de los alimentos puede realizarse bien por métodos mecánicos (prensado o centrifugación u ósmosis inversa), o bien por métodos físico-químicos (aire caliente, liofilización, atomización, deshidratación osmótica, microondas, etc.) (García-Pérez, 2007). Uno de los métodos más utilizados para el secado de materiales sólidos, como es el caso de vegetales o frutas, es el secado convectivo por aire caliente (Puig *et al.*, 2012). Éste es un método relativamente sencillo que requiere bajas inversiones iniciales. Sin embargo, los productos deshidratados obtenidos se ven considerablemente afectados por las altas temperaturas utilizadas, especialmente sus componentes termolábiles. La deshidratación produce cambios químicos, físicos y biológicos que afectan a la calidad del producto final, como por ejemplo, encogimiento celular, endurecimiento, distorsión de la forma, oxidaciones y pérdida de color y textura (García-Pérez *et al.*, 2007). Además, productos con alta porosidad, como es el caso del champiñón, cuya porosidad se encuentra entre el 25 y 50% según Paudel

et al. (2016), sufren cambios estructurales más intensos (Puig *et al.*, 2012). Por estos motivos surge la necesidad de la utilización de métodos de secado que generen productos deshidratados de alta calidad, como es la liofilización. Este método parte del producto previamente congelado. Normalmente, la congelación se realiza de forma rápida para evitar la formación de grandes cristales de hielo que puedan romper estructuras internas y liberar compuestos con actividad oxidativa y/o enzimática. El proceso de secado en sí incluye un descenso de la presión que genera un gradiente de presiones de vapor que, a su vez, induce la sublimación del hielo (Vega-Mercado *et al.*, 2001). Este proceso es considerado como referencia respecto a la calidad obtenida en el producto final, ya que se obtienen productos deshidratados de muy alto valor añadido que mantienen en gran medida sus características nutricionales, el tamaño, la forma o el color del producto fresco (Claussen *et al.*, 2007). Esto se debe principalmente a la utilización de temperaturas bajas y atmósferas con ausencia de oxígeno. Los productos liofilizados poseen altos valores de porosidad y bajos valores de densidad aparente y además, conservan su aroma y sabor (Claussen *et al.*, 2007). No obstante, los inconvenientes de este método son considerables. En primer lugar, la operación de liofilización requiere una importante inversión inicial debido a la necesidad de un equipo de vacío (Claussen *et al.*, 2007), además de los altos costes fijos y operacionales derivados de su uso. El uso de condiciones de vacío hace muy difícil el funcionamiento en continuo de este proceso lo que añade más costes a su aplicación.

Una manera de reducir costes, tanto energéticos como económicos, es recurrir a la denominada liofilización a presión atmosférica. Se puede considerar que en un material que está siendo deshidratado por sublimación se pueden distinguir dos capas principales, una capa interna que permanece congelada y una capa externa deshidratada. El Dr. Harold Meryman, considerado el inventor de este proceso, demostró experimentalmente que la difusión de vapor de agua desde la interfase entre estas 2 capas hasta la superficie externa del material es facilitada principalmente por el gradiente de presión de vapor y no por la presión absoluta del sistema. Esto hace posible la sublimación del agua del producto congelado a presión atmosférica. El hecho de no requerir vacío hace que esta operación se pueda realizar en continuo y se facilita su aplicación a procesos industriales. Sin embargo, la liofilización a presión atmosférica posee unos tiempos de residencia relativamente largos debido a la resistencia interna a la transferencia de masa (Claussen *et al.*, 2007) que se prolongan todavía más al utilizar bajas temperaturas (García-Pérez *et al.*, 2007). Por tanto, la aplicación de nuevas tecnologías como fuentes adicionales de energía durante el secado podría ser interesante para superar estas limitaciones y así generar una mejora de la calidad del producto final al disminuir su tiempo de secado (Puig *et al.*, 2012). Entre ellas se pueden encontrar tecnologías de microondas, radio frecuencia, radiación infrarroja y ultrasonidos de potencia (García-Pérez *et al.*, 2007).

El aumento en la velocidad de secado generado por la aplicación de tecnologías como microondas, radio frecuencia o irradiación infrarroja se debe al aporte de energía térmica que se puede traducir en un calentamiento del producto. No obstante, ha de tenerse muy en

cuenta que el incremento de la temperatura del producto puede afectar a los componentes termolábiles. En comparación con estas técnicas, la aplicación de ultrasonidos de potencia supone una alternativa interesante ya que sus efectos sobre la cinética de secado se basan principalmente en efectos mecánicos. De esta manera, se puede reducir el tiempo de secado sin generar un calentamiento significativo del producto y evitando así pérdidas de calidad. Por tanto, la utilización de ultrasonidos de potencia en el secado de productos sensibles al calentamiento posee un gran potencial.

1.3. Ultrasonidos

Los ultrasonidos son ondas acústicas de frecuencia superior a 20 kHz (límite de audición humano) generadas por equipos tecnológicos especialmente diseñados y que son aplicadas en numerosos procesos industriales, médicos y medioambientales (Cárcel *et al.*, 2017).

Normalmente, la fuente que produce una onda ultrasónica es un cuerpo vibrante, cuya vibración se comunica a las partículas del medio que le rodea. De esta forma, la energía mecánica se transmite de partícula en partícula. Así como las ondas electromagnéticas no necesitan un medio material para su propagación y pueden transmitirse por el vacío, las ondas acústicas necesitan de un medio material al tratarse de ondas elásticas (García-Pérez, 2007). Según la dirección de propagación de las ondas, éstas pueden dividirse en ondas longitudinales, transversales o de superficie. Las ondas longitudinales vibran paralelas a la dirección de propagación de la onda y pueden viajar a través de líquidos y gases, al contrario que las ondas transversales. En cuanto a las ondas de superficie, únicamente viajan dentro de una distancia muy corta de una superficie (García-Pérez, 2007).

La generación de ultrasonidos se realiza mediante un transductor, que convierte la energía suministrada por la fuente (eléctrica, magnética o mecánica) en energía acústica. El transductor está formado por un elemento principal, responsable de la producción de ultrasonidos al variar su forma y así generar las ondas mecánicas, y distintos elementos pasivos que mejoran la transferencia de la energía acústica (García-Pérez, 2007). Existen distintos tipos de transductores dependiendo de la energía con la que son excitados. Así se pueden distinguir transductores magnetostrictivos, accionados por fluidos o piezoeléctricos. Estos últimos son sin duda los más utilizados (Cárcel *et al.*, 2017). Su funcionamiento se basa en el denominado efecto piezoeléctrico. Éste está constituido por dos efectos contrarios: el efecto piezoeléctrico directo y el inverso. El efecto directo aparece cuando al ejercer una presión sobre el material se crea una carga eléctrica a ambos lados del material, equitativa pero de signo contrario. El efecto inverso ocurre se aplica una carga eléctrica con signo opuesto a ambos lados del material lo que provoca que el material se contraiga o expanda, dependiendo de la polaridad. Si esta última cambia repetidamente, se genera un cambio sucesivo de forma (expansión-contracción) del material que origina una onda mecánica. Si la frecuencia de cambio de

polaridad es superior a 20.000 veces por segundo, la onda que se produce es una onda ultrasónica (Cárcel *et al.*, 2014).

Según su frecuencia e intensidad, las ondas ultrasónicas pueden dividirse en dos grupos, que además definen sus aplicaciones. Así, se encuentran aplicaciones de los llamados ultrasonidos de señal, de baja potencia o de alta frecuencia. En estos casos, los ultrasonidos no afectan a los productos ni a los procesos y su principal uso es el control de procesos y el análisis no destructivo de materiales. Gracias a su capacidad de ser propagados en cualquier medio material y debido a su corta longitud de onda, son capaces de discriminar diferencias muy pequeñas en las características mecano-elásticas que constituyen el material, lo cual establece la base de sus muchas aplicaciones (Cárcel *et al.*, 2012). La frecuencia característica utilizada se encuentra entre 100kHz y 20MHz y la intensidad es inferior a 1 W/cm^2 .

Por otro lado, están los llamados ultrasonidos de potencia o de alta intensidad que se utilizan por ser capaces de afectar al medio sobre el que se propagan, generando interesantes efectos para su aplicación industrial. Su frecuencia se encuentra entre 20 y 100 kHz y su intensidad es superior a 1 W/cm^2 (Cárcel *et al.*, 2012). Los ultrasonidos de potencia se pueden aplicar de forma continua o en forma de pulsos mientras que los ultrasonidos de señal se utilizan normalmente en forma de pulsos (García-Pérez, 2007). Las aplicaciones de los ultrasonidos de potencia se basan en los fenómenos no lineales que generan, como distorsión de ondas, saturación acústica, presión de radiación, transmisión acústica, cavitación en líquidos y formación y movimiento de dislocaciones en sólidos (Cárcel *et al.*, 2017). Las principales aplicaciones de los ultrasonidos de potencia en tecnología de alimentos incluyen procesos de filtración, acción antiespumante, desgasificación, despolimerización, cocinado, desmolde y extrusión, corte, congelado y cristalización, descongelación, tenderización de carne, esterilización/pasteurización, emulsión/homogenización (Chemat *et al.*, 2011), y sobre el que se centra el presente estudio, secado.

1.4. Secado asistido con ultrasonidos

El secado convectivo consiste en una transferencia de materia pero también de energía entre un sólido o un líquido que se desea secar y un medio transportador de la humedad que es un gas, normalmente aire. Por lo tanto, esta operación se lleva a cabo en sistemas sólido-gas. En estos sistemas, la aplicación de ultrasonidos es menos frecuente debido a dos causas principales. La primera es la dificultad de propagación de las ondas ultrasónicas a través de los medios gaseosos. Esto se debe a la absorción de la energía acústica por parte de estos medios a las frecuencias características de los ultrasonidos, lo que dificulta que las ondas alcancen el producto a tratar. La segunda se debe a los problemas de acople entre los transductores (sólidos) y el medio (gas) por la diferencia de impedancia acústica. Esto hace que una parte importante de la energía acústica generada en el transductor no se transmita al medio (García-Pérez *et al.*, 2007). Por estos motivos, las aplicaciones de

ultrasonidos realizadas para sistemas sólido-gaseosos son menos numerosas que las realizadas en medios sólidos o líquidos. Aun así, el secado convectivo de alimentos con aplicación de ultrasonidos ha sido ampliamente estudiado, tanto en aplicaciones con aire caliente (Ortuño *et al.*, 2010) como a bajas temperaturas, ya sea por encima (Ozuna *et al.*, 2014b) o por debajo del punto de congelación, como es el caso de la liofilización a presión atmosférica (Santacatalina *et al.*, 2015).

1.4.1. Influencia de los ultrasonidos sobre la cinética de secado

La aplicación de ultrasonidos al secado convectivo de alimentos genera una serie de efectos que contribuyen al incremento de la velocidad de secado sin afectar de forma significativa a la calidad del producto final. Así, los ultrasonidos de potencia generan una serie de variaciones de presión, velocidades oscilantes y micro-corrientes en la interfase sólido-gas que provocan el incremento de la velocidad de transferencia de agua desde la superficie del sólido al aire (Cárcel *et al.*, 2017). Además, la energía acústica aplicada produce en los sólidos rápidas series de compresiones y expansiones de forma alternativa que crean el denominado “efecto esponja” en el producto. Este estrés mecánico puede ser también responsable de la creación de microcanales que facilitan la salida de agua. A su vez, el fenómeno de cavitación podría aparecer en las moléculas de agua situadas en el interior de la matriz del sólido y podría facilitar la eliminación de la humedad fuertemente ligada a la estructura. Todos estos efectos de los ultrasonidos pueden reducir tanto la resistencia interna como la externa a la transferencia de materia incrementando la velocidad del secado (García-Pérez *et al.*, 2007).

El efecto de la aplicación de ultrasonidos sobre el secado convectivo puede verse afectado por variables de proceso como la temperatura del aire, la velocidad del mismo, la potencia de ultrasonidos aplicada y la estructura del producto.

La temperatura del aire durante el secado convectivo es una variable muy importante, ya que puede afectar a la magnitud de los efectos de los ultrasonidos. Así, García-Pérez (2007) encontró que los efectos de los ultrasonidos son más importantes a temperaturas moderadas de secado. De hecho, este autor no encontró efectos significativos de la aplicación de ultrasonidos sobre la cinética de secado de zanahoria a partir de 70^oC. Por ello, la aplicación de ultrasonidos podría resultar importante en procesos a bajas temperaturas, como es el caso de la liofilización a presión atmosférica.

En cuanto al aire de secado, se ha observado que la energía acústica disminuye conforme se aumenta la velocidad del mismo. Esto se puede atribuir a la rotura del campo acústico producida por las turbulencias (García-Pérez *et al.*, 2007). Por ello, se consiguen aplicaciones más efectivas en procesos de secado a bajas velocidades de aire, que, usualmente, son procesos más lentos y con necesidad de ser intensificados.

Respecto a la potencia de ultrasonidos aplicada, García-Pérez *et al.* (2011) confirmaron que el efecto de los ultrasonidos se incrementó conforme se aumentó la potencia aplicada.

En cuanto a la estructura del producto, es una de las variables que más pueden afectar al efecto de los ultrasonidos. Así, la influencia de la porosidad y la estructura inicial de producto a deshidratar sobre la aplicación de ultrasonidos fue estudiada por Ozuna *et al.* (2014a), que realizó un análisis cuantitativo para ello. Estos autores observaron que la estructura inicial del producto podría afectar a la transmisión de los ultrasonidos en la interfase sólido-gas determinando las pérdidas de energía en la misma. Los productos porosos y ligeros, como sería el caso del champiñón, mostraron una menor impedancia acústica, más parecida a la del aire, lo que mejoraría el acoplamiento con el aire y, por lo tanto, la transmisión de la energía acústica. Por el contrario, aquellos productos más densos, presentaron mayores valores de impedancia acústica y por lo tanto un peor acople con el aire de secado. Este resultado es muy interesante ya que durante la liofilización a presión atmosférica, la sublimación del agua genera en los sólidos una capa externa muy porosa en el producto. Esta estructura porosa favorecería el acople con el aire de secado y facilitaría la transmisión de ultrasonidos y, por lo tanto, sus efectos sobre el secado. En este caso, la estructura inicial pierde algo de su importancia, pues este fenómeno ocurre con cualquier tipo de producto, y el porcentaje de aumento de la velocidad de secado producida por los ultrasonidos es más similar para diferentes productos. Por tanto, la utilización de ultrasonidos en procesos de liofilización a presión atmosférica resulta mucho más interesante.

1.4.2. Influencia de los ultrasonidos sobre la calidad del producto final

La viabilidad de la aplicación de ultrasonidos debe ser evaluada considerando tanto la cinética como la calidad del proceso ya que los ultrasonidos son también capaces de producir modificaciones en parámetros de calidad de los productos como textura, color o nutrientes (Ozuna *et al.*, 2014b). A pesar de que se ha analizado más el efecto de la aplicación de ultrasonidos sobre la cinética de secado que sobre la calidad del producto final, han sido varios los estudios que definen la aplicación de ultrasonidos sobre procesos de secado convectivo como un interesante método para acelerar el proceso sin comprometer la calidad del producto final (Fernandes *et al.*, 2015; Santacatalina *et al.*, 2016a; Santacatalina *et al.*, 2012). Así, el cambio total de color o la textura del producto rehidratado son, desde el punto de vista del consumidor, importantes parámetros de calidad de un producto deshidratado. Ozuna *et al.* (2014b) observaron que el cambio de color generado por la aplicación de ultrasonidos en el secado de bacalao salado a una misma temperatura resultó despreciable. Sin embargo, la aplicación de ultrasonidos produjo una reducción en el tiempo de secado que posibilitó la realización del secado a más baja temperatura donde se obtuvieron tonalidades más luminosas y menos amarillentas en el bacalao, lo que incrementa su calidad. Igualmente, la diferencia global de color entre frambuesas deshidratadas y frescas fue menor cuando se aplicó ultrasonidos durante el secado convectivo (Kowalski *et al.*, 2016). Respecto a la textura, Santacatalina *et al.* (2016b) y Ozuna *et al.* (2014b) obtuvieron un reblandecimiento de los productos deshidratados, berenjena y bacalao respectivamente, debido probablemente a la degradación estructural generada por la aplicación de energía acústica.

OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo fue determinar la influencia de la aplicación de ultrasonidos en la cinética de liofilización a presión atmosférica de champiñón y en la calidad del producto deshidratado. Para alcanzar este objetivo general se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar el proceso de liofilización a presión atmosférica de champiñón.
- Determinar la influencia de la aplicación de ultrasonidos en la cinética de liofilización a presión atmosférica de champiñón.
- Cuantificar la influencia de la potencia acústica aplicada en la magnitud de los efectos de los ultrasonidos sobre la cinética de secado.
- Evaluar la calidad del champiñón deshidratado a partir de algunos parámetros de calidad (color, textura, capacidad de rehidratación y daño celular).
- Cuantificar la influencia de las condiciones de secado, aplicación de ultrasonidos y potencia aplicada, en la calidad del champiñón deshidratado.

MATERIALES Y MÉTODOS

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materia prima

Los champiñones (*Agaricus Bisporus*) empleados como materia prima en el desarrollo del presente trabajo fueron proporcionados por el distribuidor Champinter S.A. a través del supermercado Mercadona (Valencia, España). En todos los caso, fueron envasados el día anterior a su procesado.

Se obtuvieron muestras de champiñón de geometría laminar de 6 mm de espesor utilizando una mandolina de uso doméstico (Mandolina en V, Ibili; Figura 3.1.). Las láminas fueron colocadas aleatoriamente en un portamuestras constituido por 10 varillas de aluminio perpendiculares a un eje central de latón (Figura 3.2.). Una vez colocadas las muestras en el portamuestras se introdujeron en una bolsa de film plástico que se cerró de forma hermética con el objetivo de evitar pérdidas de humedad durante la congelación. A continuación, la bolsa se introdujo en un congelador doméstico (-18 ± 1 °C) 24 horas antes de la realización de las experiencias de deshidratación.



Figura 3.1. Mandolina en V utilizada para laminar los champiñones.

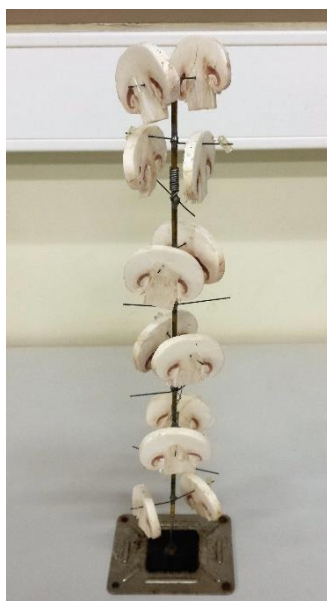


Figura 3.2. Portamuestras con láminas de champiñón fresco.

3.2. Determinación de humedad

La determinación del contenido en humedad de las muestras se realizó por diferencia de peso según el procedimiento de la AOAC número 934.01 (AOAC, 1997). Para ello se colocaron 2-3 gramos de champiñón triturado en un pesasustancias. Éste se introdujo en una estufa a vacío a 70 °C y 0,2 atm hasta alcanzar un peso constante (24 h). El contenido en humedad se determinó por diferencias de peso utilizando una balanza analítica XS204 de Mettler Toledo (USA). Las determinaciones se realizaron en las muestras frescas, en las deshidratadas y también al final del proceso de rehidratación.

3.3. Equipos de secado

3.3.1. Secadero convectivo asistido con ultrasonidos

Todas las experiencias de secado con liofilización a presión atmosférica fueron llevadas a cabo en un secadero convectivo con recirculación del aire, control automático de temperatura y velocidad de aire, que está provisto de una cámara de secado con aplicación de ultrasonidos, descrito y desarrollado por García-Pérez *et al.* (2012). El esquema del equipo se muestra en la Figura 3.3.

El flujo de aire es generado por un ventilador de alta presión (COT-100, Soler & Palau, España; Figura 3.3., A) y se mide mediante un anemómetro de paletas ($\pm 0,1$ m/s; 1468, Wilh. Lambrecht GmbH, Alemania; Figura 3.3., D) previo a su paso por la cámara de secado. El control sobre el flujo de aire se realiza mediante un algoritmo Proporcional-Integral-Derivado (PID) que actúa sobre la velocidad del ventilador.

Para alcanzar valores de humedad relativa por debajo del 15%, el flujo de aire pasa a través de un lecho de material desecante (Drying Beads, 6-8 mm, Rung Rueng Cosulting, Tailandia) colocado en bandejas (Figura 3.3., M). Dichas bandejas se sustituyen por otras periódicamente para evitar que la saturación de humedad de material afecte a la humedad relativa del aire de secado. El material saturado se regeneró mediante su introducción en estufa a 240°C durante 4 horas.

Para bajar la temperatura en el flujo de aire, éste se hace pasar por un intercambiador de calor de tubos por el que circula una solución agua-glicol (45% v/v) a -22°C (Figura 3.3., K). A continuación, la temperatura del aire se ajusta al valor deseado mediante un algoritmo PID que actúa sobre la resistencia eléctrica (Figura 3.3., L).

La temperatura y la humedad relativa del aire son medidas mediante sensores (Figura 3.3., C) localizados en tres puntos diferentes de la conducción del aire: en la entrada y salida del intercambiador de calor y en la entrada de la cámara de secado. La temperatura del aire se mide también con una sonda Pt-100 (Figura 3.3., B) en este último punto.

La cámara de secado está constituida por un cilindro vibrante (Figura 3.3., F), el cual está unido a un transductor ultrasónico (frecuencia 21,9 kHz, impedancia 369 Ω , capacidad de

potencia 90 W; Figura 3.3., E). Éste genera la señal ultrasónica que mediante un controlador dinámico de resistencia se ajusta para minimizar la fase entre el voltaje eléctrico y la intensidad. La señal acústica es transmitida hasta la muestra, situada en el interior de la cámara de secado, previamente congelada y colocada en el portamuestras descrito anteriormente. El portamuestras no introduce perturbaciones significativas en el campo acústico de la cámara, ya que el aluminio es un material con excelentes propiedades elásticas (García-Pérez, 2007).

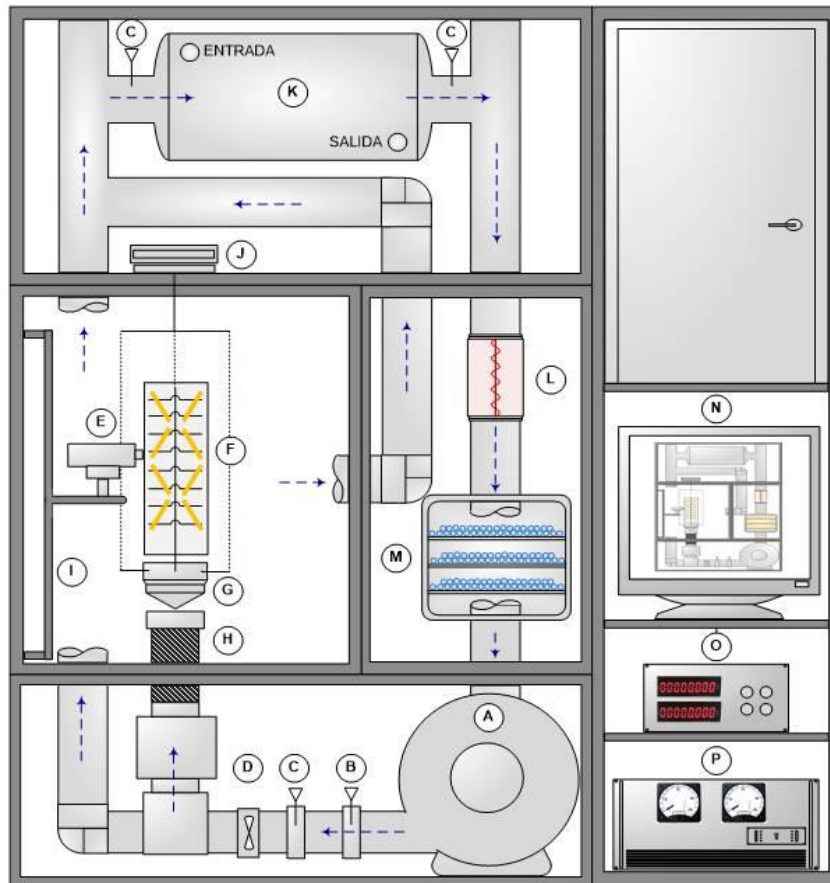


Figura 3.3. Esquema del secadero convectivo asistido con ultrasonidos (Ozuna, 2013): A. Soplante; B. Sensor de temperatura Pt-100; C. Sensor de temperatura y humedad relativa; D. Anemómetro; E. Transductor ultrasónico piezoeléctrico; F. Cilindro vibrante y cámara de secado; G. Dispositivo de carga de 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.

Para determinar la cinética de secado, se realizaron pesadas de la muestra a tiempos determinados (5 minutos durante las primeras 10 horas de secado y 10 minutos hasta el final de la experiencia) mediante la utilización de un módulo de pesada industrial ($6000 \pm 0,01g$, VM6002-W22, Mettler-Toledo, USA; Figura 3.3., J). Para evitar alteraciones durante la pesada producidas por la aplicación de ultrasonidos, un mecanismo de desplazamiento vertical (Figura 3.3., I) sitúa las muestras fuera del cilindro vibrante a la vez que el ventilador se detiene y cesa el flujo de aire.

Durante las experiencias de secado, el control y monitorización del proceso se llevó a cabo mediante una aplicación informática desarrollada en LabVIEW2009™ (National Instruments, USA). De esta forma, se pudieron definir los valores de las variables del proceso de secado (temperatura, velocidad de aire y potencia ultrasónica), así como determinar el intervalo entre pesadas y establecer el final de la experiencia de secado en un valor concreto de pérdida de peso o de tiempo de operación (Figura 3.4.).

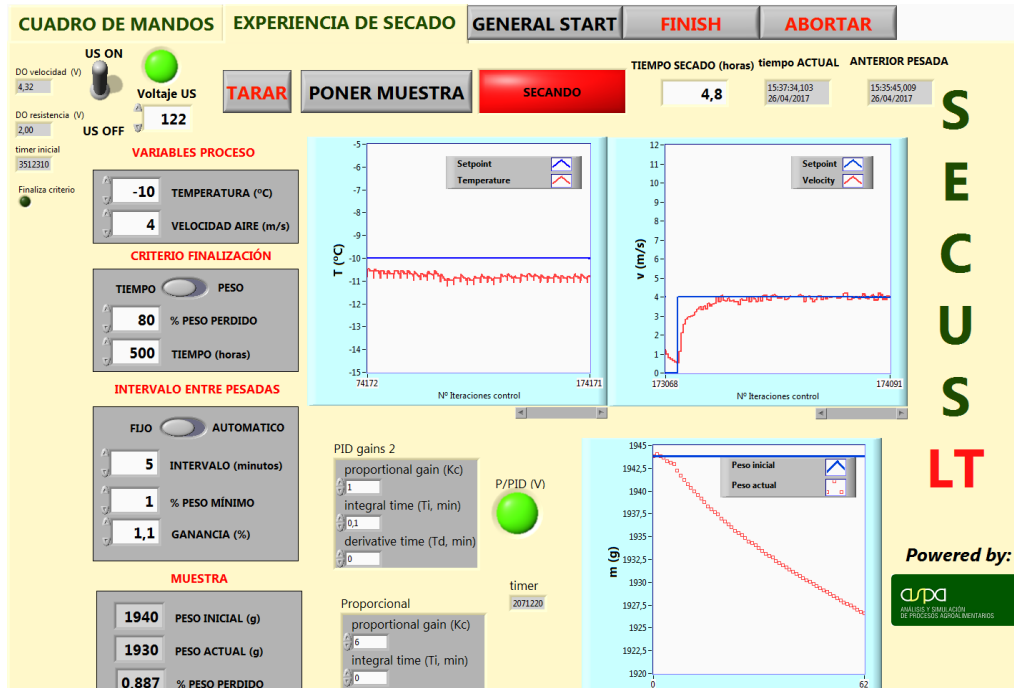


Figura 3.4. Pantalla de selección de las variables de la operación de secado de la aplicación de control y monitorización del proceso.

3.3.2. Liofilización convencional

Por otro lado, se procedió a liofilizar muestras de champiñón utilizando un método convencional (LV). Estas muestras se tomaron como referente de calidad. El proceso tuvo lugar en un liofilizador modelo LYOQUEST-55 (Azbil Telstar Technologies S.L.U, Terrassa, España). Las muestras fueron colocadas en bandejas de aluminio y fueron congeladas 24 horas antes de comenzar la experiencia de secado en un congelador doméstico (-18 ± 1 °C). Las condiciones de liofilización fueron de una temperatura del condensador de -50 ± 1 °C y una presión de 6 Pa. Se liofilizaron un total de 60 láminas de champiñón.

3.4. Experiencias de liofilización a presión atmosférica

En el presente trabajo, se realizaron experiencias de liofilización a presión atmosférica utilizando una temperatura y velocidad de aire constantes, -10 °C y 2 m/s, respectivamente. Durante el secado se aplicaron ultrasonidos de potencia a distintos niveles de potencias, 0 (LPA-0), 30 (LPA-30) y 60 (LPA-60) W, con objeto de determinar su influencia sobre la cinética y

los parámetros de calidad del champiñón deshidratado. Los niveles de potencia acústica aplicados se refieren a la potencia eléctrica suministrada al transductor ultrasónico y, teniendo en cuenta el volumen de la cámara de secado se corresponden con concentraciones de energía de 0, 12,3 y 24,6 kW/m³. Las experiencias de secado se repitieron al menos cuatro veces para cada potencia ultrasónica, aunque debido a la variabilidad de los datos se realizaron un total de 18 experiencias.

Las experiencias de secado se prolongaron hasta que las muestras alcanzaron, al menos, un 84,5% de pérdida de peso respecto al peso inicial, lo que se corresponde con un contenido de humedad de 0,75 kg agua/ kg materia seca. El champiñón deshidratado fue inmediatamente almacenado en recipientes herméticos que contenían un material desecante. De esta manera, se evitaron procesos de rehidratación no deseados durante el almacenamiento hasta la determinación de los parámetros de calidad, lo cual no superó los 3 días en ninguno de los casos.

3.5. Parámetros de calidad

Para determinar la influencia del secado en sí y de la aplicación de ultrasonidos durante el mismo en la calidad del producto final deshidratado se analizaron cuatro parámetros de calidad: color, textura, rehidratación y daño celular. En la Tabla 3.1 se muestra un esquema de las determinaciones realizadas a las diferentes muestras.

Tabla 3.1. Resumen de los parámetros de calidad estudiados.

Champiñón fresco	Champiñón deshidratado
<ul style="list-style-type: none"> • Color • Daño celular • Textura 	<ul style="list-style-type: none"> • Color • Daño celular • Rehidratación <ul style="list-style-type: none"> - Color - Textura

3.5.1. Color

El color de las muestras de champiñón fresco, seco y rehidratado fue determinado mediante la medida en la superficie de las muestras de las coordenadas de color L*, a*, y b* del espacio CIE L*a*b*. Para ello, se utilizó un colorímetro modelo CM-2500d de Konica Minolta (Japón), provisto con un área de medida de 8 mm de diámetro, con un sistema de referencia de iluminante D65 y un ángulo de observación 10⁰ y considerando el componente especular excluido (SCE). El colorímetro fue calibrado al cero y al blanco en todos los casos antes de realizar las mediciones.

En cada muestra laminar de champiñón, se tomaron medidas en dos puntos, tal y como se muestra en la Figura 3.5. En cada uno de ellos, el colorímetro proporcionó el valor medio de tres adquisiciones. Las medidas se obtuvieron en muestras de champiñón fresco, en muestras de champiñón seco en las diferentes condiciones ensayadas y en esas mismas muestras de champiñón seco después de su rehidratación. También se realizaron medidas de color en las muestras liofilizadas a vacío. Para ello, se seleccionaron aleatoriamente 18 láminas a las que se midió el color antes y después del secado.

Todas las medidas se realizaron a temperatura ambiente, sobre un fondo blanco y utilizando una placa de vidrio transparente para evitar el contacto directo de la muestra con el equipo.



Figura 3.5. Detalle de lugar de medida de color de la superficie de champiñón.

Como se ha comentado, la influencia del secado y de la aplicación de ultrasonidos de potencia en el color del champiñón se estimó a partir de los valores de L^* , como medida de la luminosidad ($L^*=0$ para negro y $L^*=100$ para blanco), a^* , como medida de la intensidad de verde ($a^*<0$) y rojo ($a^*>0$) y b^* como medida de la intensidad de azul ($b^*<0$) y amarillo ($b^*>0$).

También se obtuvo el valor de variación global de color (ΔE^* , Ecuación 3.1.) tomando como referencia los valores de los parámetros L^* , a^* y b^* obtenidos en las muestras de champiñón fresco utilizado en cada una de las experiencias de secado. De esta forma se obtuvieron las diferencias de color tras el secado (tanto por liofilización a presión atmosférica como por liofilización a vacío) y la rehidratación respecto al color inicial o fresco de la muestra. Este parámetro resulta muy interesante ya que se pretende que el producto deshidratado conserve el color lo más parecido posible al que presenta el alimento fresco.

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (\text{Ec. 3.1.})$$

Donde ΔE^* es la variación global de color, L^* , a^* y b^* son los valores medidos en las muestras tratadas y L_0^* , a_0^* y b_0^* son los valores de las muestras frescas.

Además, también se calculó el valor del Índice de Pardeamiento (IP; Ecuación 3.2.; Mohapatra *et al.*, 2010) y el valor del croma (C^* ; Ecuación 3.4.; Argyropoulos *et al.*, 2011):

$$IP = 100 \times \frac{X-0,31}{0,17} \quad (\text{Ec. 3.2.})$$

Donde IP es el Índice de Pardeamiento, siendo X el parámetro calculado mediante la Ecuación 3.3.

$$X = \frac{(a^* + 1,75 \times L^*)}{(5,645 \times L^* + a^* - 3,012 \times b^*)} \quad (\text{Ec. 3.3.})$$

Igualmente se calculó el croma (C*) (Ecuación 3.4.).

$$C^* = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})} \quad (\text{Ec. 3.4.})$$

3.5.2. Textura

Para la determinación experimental de la textura de las muestras, se realizaron ensayos de doble compresión utilizando un texturómetro (TA-XT2, SMS, Reino Unido). En los test se aplicó un 50% de deformación tanto para las muestras frescas como para las rehidratadas a una velocidad de bajada de 2 mm/s. A partir de los datos obtenidos, se obtuvieron distintos parámetros considerados como características mecánicas de la textura (Szczeniak, 1963), debido a la simulación de la presión sometida al alimento durante la masticación. Los parámetros que se consideraron se describen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Parámetros obtenidos a partir del análisis del perfil de textura (Torres *et al*, 2015).

Parámetro	Definición	Determinación	Unidades
Dureza	Fuerza necesaria para lograr una deformación determinada	Máxima fuerza durante el primer ciclo de compresión	Newton (N)
Cohesividad	Fuerza de los enlaces internos que mantiene la estructura de una muestra	Relación entre el área positiva del segundo ciclo de compresión y del primer ciclo	Adimensional
Elasticidad	Capacidad que tiene una muestra deformada para recuperar su forma después de que la fuerza haya impactado en ella	Relación entre el tiempo del primer y segundo ciclo de compresión	Adimensional
Masticabilidad	Fuerza necesaria para masticar un alimento sólido hasta un estado tal que permita su ingesta	Producto de la dureza, cohesividad y elasticidad	Newton (N)

3.5.3. Rehidratación

La determinación de las cinéticas de rehidratación del champiñón se realizó colocando 5 láminas de champiñón deshidratado en una malla metálica. Posteriormente, la malla se sumergió en un baño termostataado con agua destilada en agitación a 25 ± 1 °C. A intervalos de 10 segundos, se extrajo la malla, se sacaron las muestras y se retiró la humedad superficial de cada lámina con papel absorbente. Después se registró el peso de las mismas en una balanza analítica XS204 (Mettler Toledo, USA). La operación se repitió hasta que las muestras alcanzaron un peso constante (3 pesadas seguidas con una variación inferior a 0,05 g). Las experiencias de rehidratación se realizaron con muestras obtenidas en cada una de las experiencias de secado programadas. Por lo tanto, se obtuvieron en total cuatro repeticiones para cada potencia ultrasónica ensayada y seis en el caso de la liofilización convencional.

3.5.4. Daño celular

El daño celular generado por el tratamiento de secado se determinó a partir de la medida de la pérdida de electrolitos. Esta determinación se basa en el principio de que el daño a las membranas celulares producido por el tratamiento, en este caso el secado, genera una fuga de solutos en el líquido apoplástico (Lindén *et al.*, 2000). Para ello, se siguió el procedimiento descrito por Gómez-Galindo *et al.* (2005). Así, se introdujeron dos láminas de champiñón, fresco o seco, en un vaso de precipitados de 250 ml (forma alta, Labbox, LBG 3.3.) junto a 25 ml de agua destilada desionizada. Las muestras se mantuvieron en contacto con el agua destilada desionizada a temperatura ambiente (25 ± 1 °C) durante 24 horas. Posteriormente, se midió la conductividad del líquido resultante con un conductímetro (COND 7, LabProcess, España). De esta manera se obtuvo un valor de conductividad (C_{et}) que supone una medida de la fuga de electrolitos que produce el tratamiento aplicado (corte, congelación, secado, aplicación de ultrasonidos,...). A continuación, se destruyó la estructura celular de las láminas de champiñón mediante calentamiento de las muestras en agua hirviendo durante 10 minutos y se enfriaron hasta temperatura ambiente. Después, se volvió a medir la conductividad del líquido resultante para determinar el contenido total de electrolitos de la muestra (C_{em}). La pérdida relativa de electrolitos (P_{re} ; Ecuación 3.5.) es calculada como la proporción entre la conductividad del medio antes y después de la destrucción del tejido celular.

$$P_{re} = \frac{C_{et}}{C_{em}} \cdot 100 \quad \text{Ec. 3.5.}$$

Donde P_{re} es la pérdida relativa de electrolitos, C_{et} es el valor de conductividad de los electrolitos liberados por el tratamiento y C_{em} es el valor de conductividad de los electrolitos liberados al romper la estructura del producto.

3.5.5. Actividad de agua

Con el objetivo de estimar la estabilidad microbiológica de las muestras deshidratadas y determinar el final de las experiencias de secado, se midió la actividad de agua de las láminas de champiñón deshidratado, tanto por liofilización a presión atmosférica con aplicación de distintas potencias ultrasónicas como por liofilización convencional a vacío. Para ello, se utilizó un equipo profesional de laboratorio de medida de valores de actividad de agua (AW SPRINT TH500, Novasina, Suiza). Las mediciones se llevaron a cabo a temperatura ambiente (25 ± 1 °C) tras triturar 5 láminas de champiñón deshidratado correspondientes a cada experiencia de secado.

3.6. Modelización de las cinéticas de secado y rehidratación

Para describir matemáticamente las cinéticas de secado y rehidratación se empleó un modelo difusivo sin resistencia externa (DSR). Este modelo considera al transporte interno de humedad por difusión como el único mecanismo que define a la cinética de secado y rehidratación, despreciando la influencia de la resistencia externa al transporte. Para llevar a cabo la modelización, se consideró que el flujo de humedad durante el proceso se produjo en una única dirección y que la difusividad efectiva fue constante durante toda la operación (Do Nascimento *et al.*, 2016). Igualmente, se asumió que las muestras presentaron un comportamiento de lámina infinita y se consideraron como un sólido isotrópico y homogéneo. Sin embargo, esta última condición, considerada principalmente en procesos de secado con aire caliente, no se cumple bajo las condiciones de liofilización a presión atmosférica. En este caso, el sólido está compuesto principalmente por dos capas: una capa externa deshidratada que aumenta a lo largo del proceso y una capa interna congelada que constituye el núcleo de la muestra y que disminuye durante el secado. Por lo tanto, el sólido no es homogéneo. Esto hace que, en condiciones de liofilización, el modelo teórico difusional se comporte como un modelo semiexperimental. No obstante, este modelo ha sido utilizado previamente bajo dichas condiciones para cuantificar y comparar la influencia de las variables de proceso en la cinética de secado con resultados aceptables (Moreno et al, 2017). De esta forma se obtuvo un modelo de difusión basado en la segunda ley de Fick (Ecuación 3.6.).

$$\frac{\partial W(x,t)}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 W(x,t)}{\partial x^2} \quad (\text{Ec. 3.6.})$$

Donde W es el contenido en humedad local (kg agua/kg materia seca); D_e es la difusividad efectiva del agua (m^2/s); t es el tiempo (s) y x es la dirección característica de transporte (m).

La Ecuación 3.6. fue resuelta considerando que la humedad de las muestras es uniforme al comienzo de la experiencia de secado y que transporte de agua es simétrico respecto al plano de simetría de las láminas de champiñón (Ecuación 3.7).

$$\frac{\partial W(0,t)}{\partial x} = 0 \quad (\text{Ec. 3.7.})$$

Como se ha comentado, se despreció la resistencia externa al transporte de humedad asumiendo que el contenido de humedad de la superficie alcanza el equilibrio al comenzar el secado (Ecuación 3.8.), de forma que la cinética de secado es controlada únicamente por el transporte de humedad interno.

$$W(L, t) = W_{eq} \quad (\text{Ec. 3.8.})$$

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). La humedad de equilibrio (W_{eq}) se estimó a partir de la isoterma de sorción para champiñón publicada por Guizani *et al.* (2013).

La solución analítica del modelo DSR se integró para todo el volumen de las muestras (ecuación 3.9). El modelo resultante se utilizó para predecir la evolución del contenido medio de humedad de las muestras durante la operación de secado.

$$W = W_{eq} + (W_0 - W_{eq}) \left[2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n^2 L^2} e^{-D_e \lambda_n^2 t} \right] \quad (\text{Ec. 3.9.})$$

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

El modelo DSR se ajustó a los datos experimentales mediante la identificación de la difusividad efectiva (D_e) que minimiza la suma de las diferencias cuadráticas entre los valores experimentales de contenido en humedad media y los calculados con el modelo. Para ello, se utilizó el método de optimización del Gradiente Reducido Generalizado disponible en la herramienta Solver de Microsoft Excel™ (Microsoft Corporation, Seattle, USA).

A partir de la varianza explicada (%VAR) (Ecuación 3.10.) se estimó la bondad del ajuste del modelo a los datos experimentales.

$$\%VAR = \left[1 - \frac{S_{xy}^2}{S_y^2} \right] \quad (\text{Ec. 3.10.})$$

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

3.7. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y se determinaron las diferencias mínimas significativas (LSD, Least Significant Difference) mediante el paquete informático Statgraphics Plus 5.1 (Statistical Graphics Corporation, Warrenton, USA) para establecer si las distintas potencias ultrasónicas aplicadas influyeron significativamente tanto sobre la cinética como sobre los parámetros de calidad del champiñón deshidratado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Cinéticas de secado experimentales

La humedad inicial del champiñón utilizado en el presente trabajo fue de $10,48 \pm 0,90$ kg agua/kg materia seca ($91,22 \pm 0,68$ % en base húmeda). Para poder comparar las distintas experiencias de secado llevadas a cabo en este trabajo y obtener conclusiones similares a las de la literatura, en primer lugar se aseguró que todas las muestras secas obtenidas en los procesos de secado demostraran una actividad de agua inferior a 0,6 (Tabla 4.1.). De esta forma, se asegura su estabilidad respecto al desarrollo de contaminación microbiológica de hongos, levaduras y bacterias, a la vez que la actividad enzimática se encuentra a niveles muy bajos (Martínez *et al.*, 1998).

Tabla 4.1. Valores medios y desviación estándar de las actividades de agua (A_w) de los champiñones liofilizados a presión atmosférica sin aplicación de ultrasonidos (LPA-0), con aplicación de 30 (LPA-30) y 60 (LPA-60) W de potencia ultrasónica, y liofilizados a vacío (LV).

	LPA-0	LPA-30	LPA-60	LV
A_w	$0,4 \pm 0,2$	$0,31 \pm 0,08$	$0,6 \pm 0,2$	$0,206 \pm 0,005$

La liofilización a presión atmosférica de las láminas de champiñón resultó un proceso bastante lento. Así para alcanzar una humedad de 0,14 kg agua/kg de materia seca, se necesitó un tiempo medio de 84 ± 10 horas.

4.1.1. Influencia de la aplicación de ultrasonidos de potencia

La aplicación de ultrasonidos incrementó significativamente ($p < 0,05$) la velocidad de secado. Así, los resultados experimentales obtenidos mostraron que el tiempo de secado se redujo en las experiencias realizadas con aplicación de ultrasonidos de potencia en comparación con las experiencias realizadas sin la aplicación de ultrasonidos (Figura 4.1.).

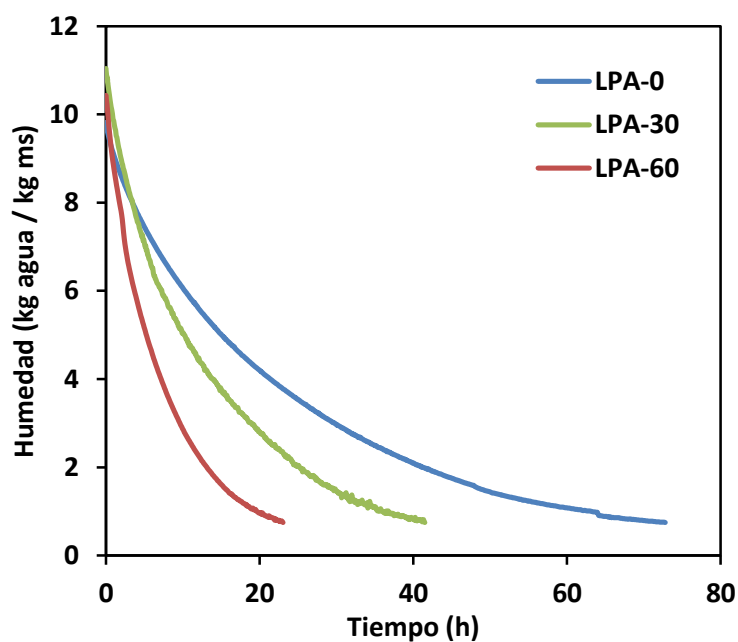


Figura 4.1. Cinéticas de secado por liofilización a presión atmosférica (-10°C ; 2m/s) de láminas de champiñón sin (LPA-0) y con aplicación de ultrasonidos (LPA-30, LPA-60).

Sin embargo, esta reducción del tiempo de secado fue diferente según la potencia ultrasónica aplicada. Así, en las experiencias LPA-30 el tiempo de secado necesario para alcanzar una humedad en las muestras de $0,75\text{ kg de agua/kg materia seca}$ se redujo un $58,5\%$ respecto las experiencias LPA-0, pasando de 84 ± 9 a 35 ± 10 horas. En el caso de las experiencias LPA-60 la reducción fue de un $74,2\%$, necesitando unos tiempos de secado de tan solo 22 ± 4 horas (Tabla 4.2.). Esta reducción drástica del tiempo de secado puede deberse a los efectos asociados a las ondas ultrasónicas que pueden afectar tanto a la resistencia interna como a la externa al transporte de materia (García-Pérez, 2007). La aplicación de ultrasonidos en procesos de liofilización a presión atmosférica ha demostrado en numerosos estudios (Santacatalina *et al.*, 2012; Santacatalina *et al.*, 2014; Ozuna *et al.*, 2014b; Santacatalina *et al.* 2016b) generar reducciones en el tiempo de proceso y aumentos en la difusividad efectiva de las cinéticas de secado.

Tabla 4.2. Tiempos de secado necesarios para obtener una humedad de $0,75\text{ kg agua/kg materia seca}$ durante la liofilización a presión atmosférica (-10°C ; 2m/s) de láminas de champiñón con (LPA-30 Y LPA-60) y sin aplicación de ultrasonidos (LPA-0). Reducción del mismo en las experiencias LPA-30 y LPA-60 respecto a las LPA-0. Valores medios y desviación estándar.

	LPA-0	LPA-30	LPA-60
Tiempo (h)	84 ± 9	35 ± 10	22 ± 4
% Δ		$-58,5\%$	$-74,2\%$

4.1.2. Modelización de las cinéticas de secado

Para poder cuantificar la influencia de la aplicación de ultrasonidos en la cinética de secado, se recurrió a la modelización de los datos experimentales. El ajuste del modelo difusivo a los datos experimentales resultó adecuado en todos los casos, obteniéndose valores de varianza explicada por encima del 98% (Tabla 4.3.). Además, la tendencia de los datos experimentales y los calculados con el modelo resultó muy similar (Figura 4.2). De esta forma, se puede afirmar que la hipótesis considerada sobre los fenómenos de transferencia de masa, en la que se desprecia la resistencia externa de la muestra, resulta adecuada en las condiciones de secado ensayadas. Resulta necesario recordar que el modelo difusivo en condiciones de liofilización a presión atmosférica (-10°C) pasa de ser un modelo teórico a un modelo semiexperimental. Sin embargo, permite cuantificar y comparar la influencia de las variables de proceso en la velocidad de secado.

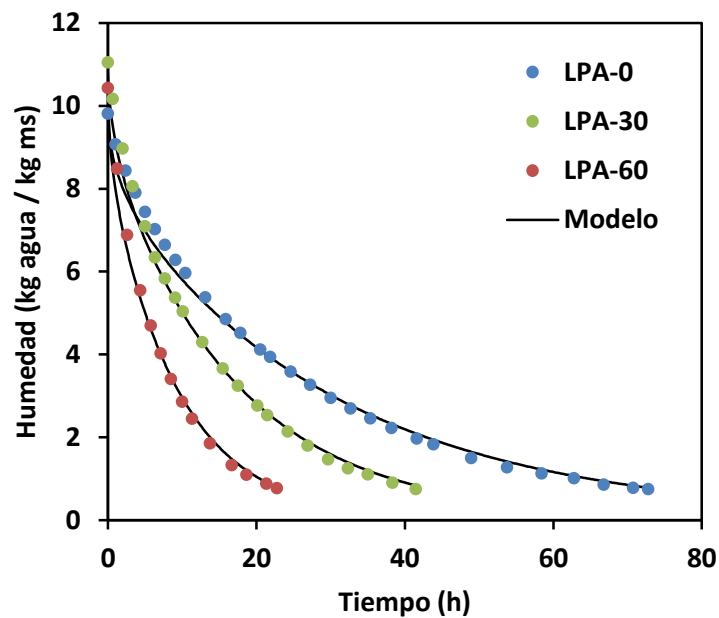


Figura 4.2. Datos experimentales y modelización de cinéticas de liofilización a presión atmosférica (-10°C ; 2m/s) de láminas de champiñón con (LPA-30 y LPA-60) y sin (LPA-0) aplicación de ultrasonidos.

Los resultados de la modelización mostraron que los valores de difusividad efectiva (D_e) identificada con el modelo difusivo sin resistencia externa aumentaron de forma significativa ($p < 0,01$) a medida que se incrementó la potencia ultrasónica aplicada, tal y como se muestra en la Tabla 4.3. Así, en las experiencias LPA-30, la difusividad efectiva se incrementó en un 159,2% respecto a la identificada en las experiencias LPA-0. Por su parte, en las experiencias LPA-60, el aumento fue más importante, del 280,6 %. Estudios previos apuntan a que la influencia de los ultrasonidos sobre la difusividad efectiva se encuentra relacionada con efectos mecánicos. Así, la repetida compresión y expansión en la interfase aire-sólido y en la estructura del propio producto producida por ultrasonidos genera el proceso conocido como “efecto esponja” (García-Pérez *et al.*, 2012). Esto es que, a nivel microscópico,

el producto podría asimilarse a una esponja que se aprieta y se relaja repetidamente. El estrés generado facilita la salida de líquido desde las partes más internas de la muestra hasta su superficie durante la fase de compresión. Las fuerzas involucradas en este proceso pueden ser superiores a la tensión superficial que mantiene las moléculas de agua en el interior de los capilares de la muestra y el estrés mecánico puede crear microcanales que facilitan todavía más el intercambio de materia con el exterior. (Cárcel *et al.*, 2012).

Tabla 4.3. Difusividad efectiva identificada (D_e) en los ajustes del modelo DSR a los datos experimentales de liofilización a presión atmosférica (-10°C ; 2 m/s) de láminas de champiñón con (LPA-30 y LPA-60) y sin (LPA-0) aplicación de ultrasonidos y porcentaje de varianza explicada (%VAR). Valores medios y desviación estándar.

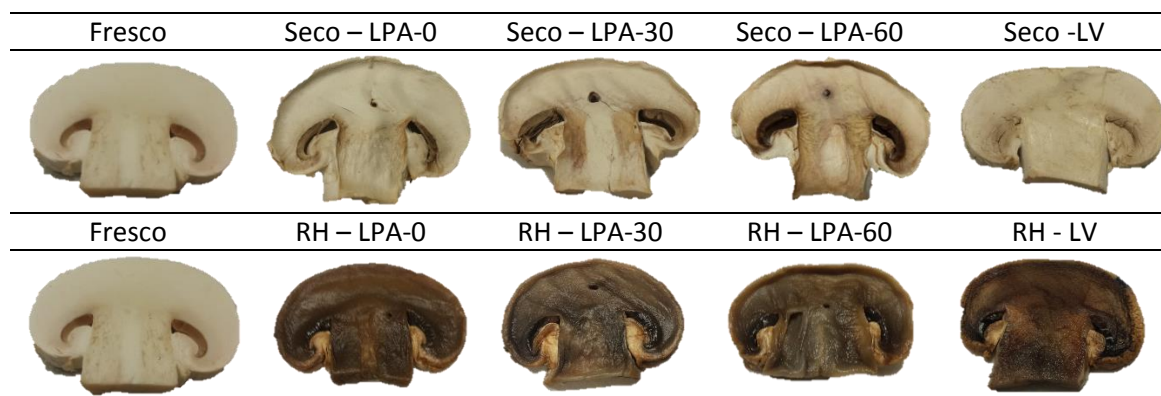
LPA-0		LPA-30		LPA-60	
D_e (10^{-11} m ² /s)	%VAR	D_e (10^{-11} m ² /s)	%VAR	D_e (10^{-11} m ² /s)	%VAR
$2,7 \pm 0,5$	$98,8 \pm 0,3$	7 ± 2	$98,5 \pm 0,6$	$10,3 \pm 0,4$	$98,2 \pm 0,9$

4.2. Parámetros de calidad

4.2.1. Color

Las diferencias entre las distintas muestras obtenidas en cada tipo de experiencia se observaron a simple vista. En la Tabla 4.4 se muestra el cambio de aspecto de las muestras secas y rehidratadas respecto al champiñón fresco. Como se puede observar, mientras que las láminas deshidratadas mantuvieron un color relativamente parecido al champiñón fresco, las muestras rehidratadas presentaron un oscurecimiento importante.

Tabla 4.4. Aspecto de las láminas de champiñón fresco (F), liofilizado a presión atmosférica con (LPA-30 y LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos y liofilizado a vacío (LV), y posteriormente rehidratado (RH).



Respecto a los resultados de las muestras secas, se observó que, en general, el tipo de secado afectó a los valores de L^* , a^* y b^* obtenidos (Tabla 4.5) Así, en relación a la luminosidad de las muestras, no se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los valores obtenidos para las muestras LV y las LPA-0. Sin embargo, la aplicación de ultrasonidos

redujo el valor de L* en un 18 %, tanto en las láminas LPA-30 como en las LPA-60. Por otra parte, se observó la aparición de tonalidades amarillentas simplemente con el procesado de las muestras, independientemente del método de secado utilizado, obteniéndose valores de b* en las muestras deshidratadas superiores a los obtenidos en el caso del champiñón fresco (Tabla 4.5.). A su vez, aparecieron tonalidades rojas en las muestras liofilizadas a presión atmosférica con aplicación de ultrasonidos, independientemente de la potencia aplicada, ya que presentaron valores del parámetro a* ligeramente superiores.

En cuanto a la diferencia global de color (ΔE^*) con respecto al champiñón fresco se observaron diferencias significativas entre las muestras LV y las LPA-0 siendo mayor el valor obtenido de ΔE^* en esta últimas ($p < 0,05$). Estos resultados se podrían atribuir a la temperatura de secado. Así, mientras en la liofilización a vacío la temperatura a la que comienza el proceso es de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el proceso de liofilización a presión atmosférica es de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sería conveniente comprobar esta hipótesis realizando experiencias de liofilización a presión atmosférica a temperaturas inferiores. Sin embargo, para esto sería necesario modificar el secadero experimental utilizado.

La aplicación de ultrasonidos también contribuyó a un mayor valor de ΔE^* . Sin embargo, no se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las dos potencias ultrasónicas utilizadas. En este caso, la influencia de los ultrasonidos a nivel estructural como la generación de microcanales podría ser la razón de este cambio.

Tabla 4.5. Coordenadas de color en el espacio CIE L*a*b* de láminas de champiñón fresco (F), liofilizadas a presión atmosférica sin (LPA-0) y con ultrasonidos (LPA-30 y LPA-60) y liofilizadas a vacío (LV). Variación de color (ΔE^*) respecto a champiñón fresco. Valores medios y desviación estándar.

	F	LPA-0	LPA-30	LPA-60	LV
L*	82 ± 2	69 ± 8	55 ± 4	57 ± 13	71 ± 4
a*	0 ± 1	1 ± 3	5 ± 2	4 ± 2	2,1 ± 0,5
b*	12 ± 1	16 ± 6	17 ± 3	18 ± 5	17 ± 1
ΔE^*		19 ± 10	28 ± 6	28 ± 8	7,8

En cuanto a las muestras rehidratadas, el oscurecimiento brusco de las muestras observado a simple vista se tradujo en una disminución significativa ($p < 0,05$) de los valores obtenidos para el parámetro L* y un incremento de los parámetros a* y b*. En cuanto al valor de ΔE^* , resultó importante en todos los casos y no se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los distintos tipos de secado, tal y como se puede observar en la Tabla 4.6. El cambio brusco de color, por tanto, no depende de los métodos de secado llevados a cabo en el presente estudio. Así, la coloración de las láminas de champiñón rehidratadas resultó ser totalmente diferente a la obtenida para los champiñones secos y frescos. Las muestras deshidratadas poseían un aspecto más atractivo en cuanto al color que las mismas láminas rehidratadas. Este fenómeno podría estar relacionado con la activación de la enzima polifenoloxidasas en el champiñón durante la rehidratación (Fang *et al.*, 1971), por lo que sería

conveniente realizar tratamientos previos como el escaldado que inactiven esta enzima (Lespinard *et al.*, 2013). La coloración se mantiene en las láminas secas debido a la inactivación de las enzimas por las bajas temperaturas durante la liofilización (Mohapatra *et al.*, 2010) y a la disminución de la actividad enzimática conforme la actividad de agua decrece durante el almacenamiento (Martínez *et al.*, 1998).

Tabla 4.6. Coordenadas de color en el espacio CIE L*a*b* de las láminas de champiñón rehidratado previamente liofilizadas a presión atmosférica sin (LPA-0) y con ultrasonidos (LPA-30 y LPA-60) y liofilizadas a vacío (LV). Variación de color (ΔE^*) respecto a champiñón fresco. Valores medios y desviación estándar.

	LPA-0	LPA-30	LPA-60	LV
L*	35 ± 14	18 ± 3	26 ± 9	28 ± 8
a*	7 ± 3	9 ± 1	6 ± 2	16 ± 5
b*	24 ± 2	21 ± 2	21 ± 1	40 ± 10
ΔE^*	52 ± 10	65 ± 7	63 ± 10	59 ± 2

El croma (C*) mide la saturación de un color desde el punto central del espacio de color, donde $a^* = b^* = 0$. Por tanto, un valor bajo de C* indicaría un estímulo acromático sin orientación hacia rojo, verde, azul o amarillo, mientras que valores altos indican colores altamente saturados (Chiralt *et al.*, 2007). Así, los resultados mostraron ligeras diferencias entre las láminas de champiñón deshidratado, encontrándose el valor de mayor saturación en las muestras LPA-60. Sin embargo, en general, estas diferencias no resultaron significativas ($p < 0,05$; Tabla 4.7.).

Respecto a las muestras rehidratadas, el valor del croma indicó que la saturación de las láminas LV fue significativamente superior ($p < 0,05$) a las LPA-0 (Tabla 4.7.). En este último caso, no se encontraron diferencias producidas por la aplicación de ultrasonidos durante el secado.

Tabla 4.7. Valores del croma (C*) para láminas de champiñón liofilizadas a presión atmosférica sin (LPA-0) y con ultrasonidos (LPA-30 y LPA-60) y liofilizadas a vacío (LV), posteriormente rehidratadas. Valores medios y desviación estándar.

	LPA-0	LPA-30	LPA-60	LV
SECO	16 ± 6	17 ± 4	19 ± 6	17
REHIDRATADO	25 ± 3	23 ± 2	22 ± 1	43 ± 5

El Índice de Pardeamiento recoge de una forma más específica el cambio de color hacia tonos pardos o marrones de las láminas y muestra mejor las diferencias entre estas tonalidades que los parámetros anteriores. Así se observó que el valor obtenido en las láminas secas LPA-0 Y LV fue más cercano al valor obtenido para las láminas frescas (15 ± 4) que el obtenido en las láminas LPA-30 y LPA-60, si bien, no se encontraron diferencias significativas

($p < 0,05$) entre los valores obtenidos a ambas potencias ultrasónicas (Tabla 4.8.). Estas diferencias podrían ser debidas al calentamiento parcial producido por las ondas ultrasónicas, que podrían generar un pequeño deshielo de la muestra. Éste facilitaría las reacciones sustrato-enzima del pardeamiento enzimático, resultando en la aparición de tonalidades más rojizas y amarillentas (Pei *et al.*, 2014).

Por otro lado, se observó que el pardeamiento generado tras la rehidratación fue drástico, pasando de los valores de pardeamiento de las láminas secas, que oscilaron entre 21 y 43, a valores de entre 228 y 569 de las muestras rehidratadas. La influencia de la aplicación de ultrasonidos en el secado no fue significativa ($p < 0,05$) en este parámetro, pues no se encontraron diferencias entre los secados con y sin ultrasonidos. Sin embargo, sí se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) con respecto a las muestras LV. Estas últimas obtuvieron valores muy superiores, tal y como se puede ver en la Tabla 4.8. Probablemente, las condiciones de vacío que se producen en este secado podrían contribuir a un efecto sobre la microestructura que ayudase a liberar más compuestos de carácter oxidativo. Mientras la muestra permanece deshidratada, estos compuestos permanecen inactivos pero se activan al rehidratarla. Ahmad-Qasem *et al.*, (2015) obtuvieron un efecto similar en manzana liofilizada a vacío. Estos autores apuntaron a que la liofilización no desactiva estos compuestos que actúan contra elementos oxidables en el momento en el que se recupera el contenido de agua y que incluso inactiva compuestos antioxidantes añadidos al producto.

Tabla 4.8. Valores medios y desviación estándar del Índice de Pardeamiento (IP) de las muestras liofilizadas a presión atmosférica con (LPA-30, LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos, liofilizadas a vacío (LV) y posteriormente rehidratadas.

	LPA-0	LPA-30	LPA-60	LV
SECO	21 ± 8	43 ± 15	33 ± 8	29
REHIDRATADO	228 ± 167	338 ± 99	260 ± 166	569 ± 174

4.2.2. Textura

El efecto de la aplicación de ultrasonidos durante el secado sobre la estructura de las láminas de champiñón se cuantificó mediante la realización del test de doble compresión. A partir de los resultados obtenidos se estimaron cuatro parámetros texturales: dureza, cohesividad, elasticidad y masticabilidad.

La dureza de las muestras rehidratadas resultó muy inferior al valor de la dureza de la muestra fresca (Tabla 4.9). Esto puede ser debido probablemente a la degradación de la estructura generada tanto por la congelación previa de las muestras como por la operación de secado, lo que impide que tras la rehidratación se recupere la textura inicial. Las láminas rehidratadas mostraron una textura mucho más blanda, independientemente del método de secado empleado. Las diferencias que se encontraron entre los diferentes métodos de secado, aunque significativas ($p < 0,05$), son pequeñas en comparación con los grandes cambios

observados respecto a la textura inicial del champiñón en fresco. Aun así, se puede observar que las muestras LPA-60 presentaron una menor dureza que las LPA-30 y LPA-0. Esto podría deberse a una cierta degradación de la estructura producida por las ondas ultrasónicas. En cambio, las muestras LV mostraron una textura más dura, la cual podría atribuirse al mejor mantenimiento de su estructura durante el secado al evitarse el encogimiento del producto.

Tabla 4.9. Parámetros texturales obtenidos para muestras de champiñón fresco y rehidratado tras liofilización a presión atmosférica con (LPA-30, LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos y tras liofilización a vacío (LV). Valores medios y desviación estándar.

	Dureza (N)	Cohesividad	Elasticidad	Masticabilidad (N)
Fresco	242 ± 27	0,66 ± 0,03	0,79 ± 0,06	131 ± 23
LPA-0	12 ± 9	0,64 ± 0,03	0,86 ± 0,06	6 ± 4
LPA-30	13 ± 5	0,65 ± 0,02	0,88 ± 0,02	7 ± 3
LPA-60	5 ± 3	0,70 ± 0,03	0,95 ± 0,03	3 ± 2
LV	25 ± 8	0,59 ± 0,03	0,70 ± 0,06	10 ± 3

La masticabilidad de las láminas siguió el mismo patrón que la dureza de las láminas. Así, se observó una gran diferencia entre las muestras frescas y las rehidratadas. El valor obtenido para las muestras frescas se redujo drásticamente en las muestras secas y luego rehidratadas (Tabla 4.9.). Las pequeñas diferencias que se observaron entre los valores de las muestras secadas con los distintos métodos empleados podrían explicarse de la misma manera que en el caso de la dureza.

En cuanto a la cohesividad, la liofilización produjo una disminución en comparación con el valor de las muestras frescas, especialmente importante en el caso de la liofilización a vacío. Sin embargo, al aplicar ultrasonidos durante el secado, su valor se incrementó. Dicho incremento fue mayor al aumentar la potencia ultrasónica aplicada (Figura 4.3).

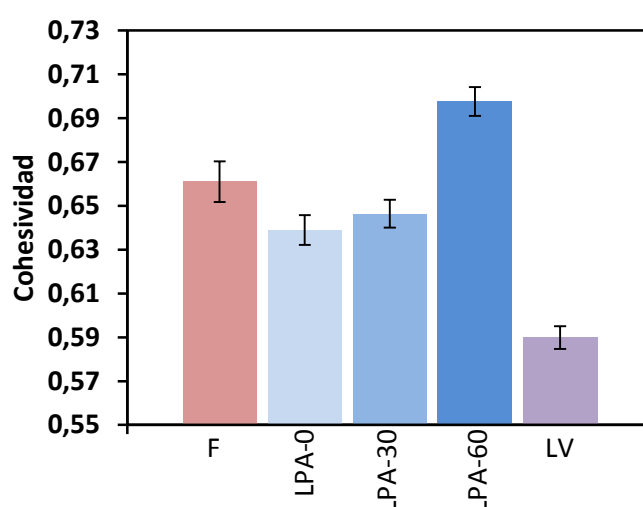


Figura 4.3. Valores medios de cohesividad e intervalos LSD ($p < 0,05$) de las muestras de champiñón frescas (F), liofilizadas a presión atmosférica con (LPA-30, LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos y liofilizadas a vacío (LV) rehidratadas.

Finalmente, la elasticidad de las láminas aumentó tras la operación de liofilización a presión atmosférica. Este incremento fue superior en las muestras tratadas con ultrasonidos y fue mayor cuanto mayor fue la potencia ultrasónica aplicada. Sin embargo, las láminas LV mostraron comportamientos con elasticidad muy inferior a las obtenidas en el resto de casos (Figura 4.4.). Este hecho puede ser debido a la rotura, durante la primera compresión del test, de la estructura que se había logrado mantener durante todo el proceso de secado y rehidratación, de forma que la muestra no recuperó su altura inicial. Las láminas LPA-60 mostraron una gran elasticidad respecto al resto de muestras ($p < 0,05$), lo cual podría relacionarse con los altos valores de cohesividad obtenidos.

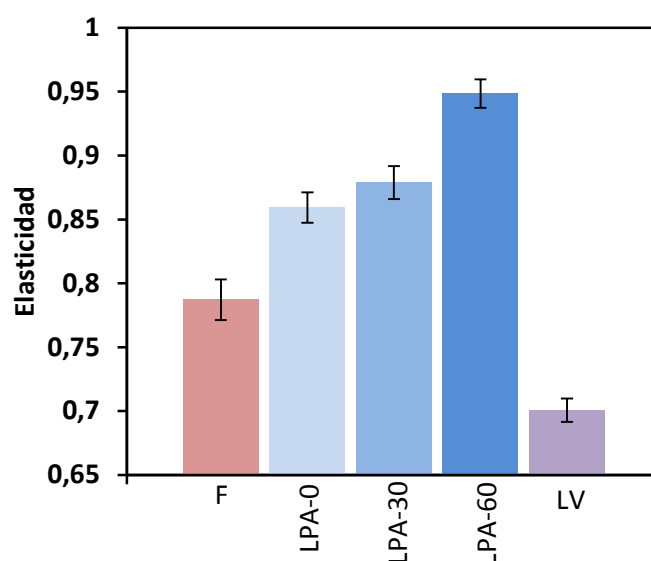


Figura 4.4. Valores medios de elasticidad e intervalos LSD de las muestras de champiñón frescas (F), liofilizadas a presión atmosférica con (LPA-30, LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos y liofilizadas a vacío (LV) rehidratadas.

Los resultados mostraron ligeras diferencias entre las experiencias llevadas a cabo con diferentes potencias ultrasónicas, probablemente debido a la congelación previa y al hecho de que la eliminación de agua se produzca por sublimación, ya que estos fenómenos podrían provocar cambios en la estructura de la muestra que enmascaren los efectos estructurales generados por los ultrasonidos (Santacatalina *et al.*, 2016b).

4.2.3. Rehidratación y su modelización

Las experiencias de rehidratación se realizaron con muestras de champiñón deshidratadas por los distintos métodos de secado ensayados en este estudio. Para que los resultados sean comparables, fue necesario asegurarse de que la humedad final conseguida en todas las muestras secas era similar. Por ello, se realizó un control de este parámetro (Tabla 4.10). Los valores obtenidos fueron relativamente similares. Es necesario destacar que la cierta variabilidad observada se debe a la dificultad de detener el proceso de secado en el mismo valor de humedad para todas las experiencias de secado.

Tabla 4.10. Humedad en base seca (kg agua/kg materia seca) de las láminas de champiñón liofilizadas a presión atmosférica con (LPA-30, LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos y liofilizadas a vacío (LV) en el punto final del secado e inicial de la rehidratación. Valores medios y desviación estándar.

LPA-0	LPA-30	LPA-60	LV
0,14 ± 0,08	0,08 ± 0,02	0,13 ± 0,06	0,07 ± 0,01

La rehidratación no puede ser considerada simplemente como el fenómeno opuesto a la deshidratación. Durante el secado de alimentos se producen cambios estructurales irreversibles que impiden que el producto seco recupere todo el contenido en humedad que poseía en su estado natural, por lo que la capacidad de rehidratación es dependiente del grado de alteración celular y estructural (Krokida y Marinos-Kouris, 2003). De hecho, la agresividad de las operaciones de secado puede ser medida mediante la capacidad de rehidratación del producto deshidratado.

Los resultados obtenidos mostraron que la humedad final alcanzada por las muestras rehidratadas y previamente liofilizadas tanto a vacío como a presión atmosférica (Tabla 4.11) no fue significativamente diferente ($p < 0,05$). Aun así, se observó que el valor medio obtenido en las muestras LV fue superior al obtenido en las LPA-0. Esta diferencia, aunque no significativa, podría atribuirse tanto a la temperatura de secado como a la acción del vacío, que limitarían el colapso de la estructura. Esto facilita la rehidratación posterior.

Sin embargo, el contenido final de agua descendió ligeramente en las muestras liofilizadas con aplicación de ultrasonidos y este descenso fue superior a la mayor potencia ensayada (60 W). Este fenómeno podría ser debido a los cambios estructurales producidos por los ultrasonidos en la microestructura de la muestra durante el secado que disminuyen su porosidad.

Tabla 4.11. Humedad final (X_{wf}) alcanzada por las muestras de champiñón liofilizadas a presión atmosférica con (LPA-30, LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos y liofilizadas a vacío (LV) durante la rehidratación y tiempo necesario para alcanzar una humedad de 2,50 kg de agua/kg materia seca (ms). Valores medios y desviación estándar.

	X_{wf} (kg agua/kg ms)	Tiempo (s)
LPA-0	7 ± 1	67 ± 6
LPA-30	6,6 ± 0,4	132 ± 31
LPA-60	5,7 ± 0,2	183 ± 31
LV	8 ± 2	10 ± 0

Para comparar los tiempos de rehidratación de las distintas muestras se consideró el momento en el que éstas alcanzaron un contenido en humedad de 2,5 kg agua/kg materia seca. Así, en el caso de las muestras LPA-0, el tiempo de rehidratación se incrementó con la potencia ultrasónica aplicada, tal y como se observa en la Figura 4.5. La influencia de los

ultrasonidos en la estructura de las láminas de champiñón podría generar cambios estructurales que dificultarían ligeramente la rehidratación de las muestras. Por el contrario, las muestras LV se rehidrataron casi de forma inmediata.

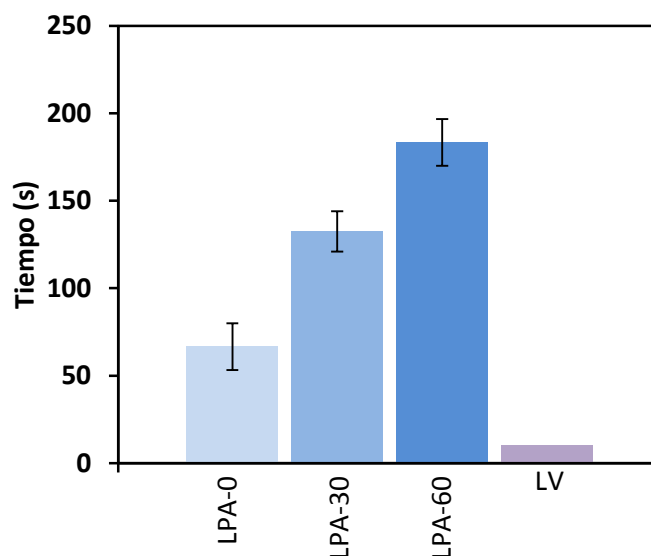


Figura 4.5. Valores medios del tiempo de rehidratación e intervalos LSD de las muestras liofilizadas a presión atmosférica con (LPA-30, LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos y liofilizadas a vacío (LV).

Las experiencias de rehidratación fueron modelizadas utilizando el mismo modelo DSR que se utilizó para modelizar las experiencias de secado. La rehidratación de tejidos vegetales se compone de tres fenómenos simultáneos: la absorción de agua, la hinchazón y la lixiviación de solutos (Krokida y Marinos-Kouris, 2003). Por lo tanto, durante la rehidratación no sólo existe un flujo positivo de agua hacia el interior de la muestra, sino que también se produce un flujo, menos importante y negativo, de sólidos solubles hacia el agua del baño de rehidratación. Esto último no se consideró en el modelo utilizado y se supuso que el incremento de peso de las muestras se debió únicamente al incremento del contenido de agua. Por lo tanto, en este caso, la cinética de rehidratación se determinó a partir del contenido de humedad de las muestras al inicio de la rehidratación y de la variación del peso de las mismas durante el proceso. La difusividad efectiva identificada de rehidratación (D_{er}) se obtuvo a partir de la modelización de las cinéticas de rehidratación, las cuales se muestran junto a su modelización en la Figura 4.6.

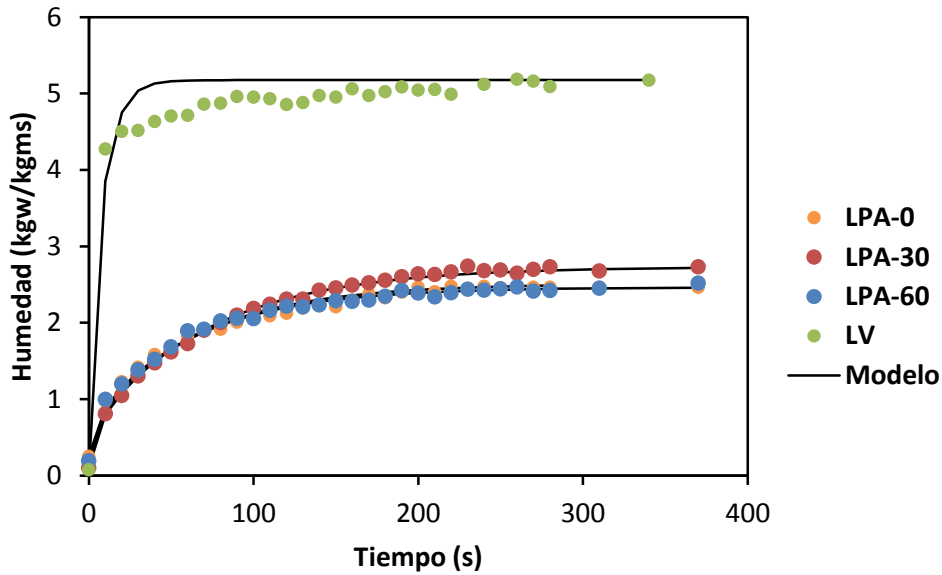


Figura 4.6. Datos experimentales y modelización de las cinéticas de rehidratación de las muestras liofilizadas a presión atmosférica con (LPA-30, LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos y liofilizadas a vacío (LV).

La bondad del ajuste a los datos experimentales de las muestras liofilizadas a presión atmosférica resultó, en general, muy satisfactoria como se puede observar en el elevado valor de varianza explicada conseguido (Tabla 4.12) y en la tendencia similar de los datos experimentales y calculados (Figura 4.7). Por tanto, para estas muestras, se podría explicar el transporte de agua hacia la muestra como un fenómeno totalmente difusivo y sin resistencia externa.

Sin embargo, en el caso de la liofilización convencional a vacío se obtuvieron porcentajes de varianza explicada relativamente bajos (Tabla 4.12.). Este hecho se debió a que, en este caso, la rehidratación resultó prácticamente inmediata. De hecho, el tiempo de rehidratación de estas muestras se encontró por debajo de 10 segundos (Tabla 4.11.). Esto podría indicar que la rehidratación de este tipo de muestras no responde únicamente a fenómenos de difusión.

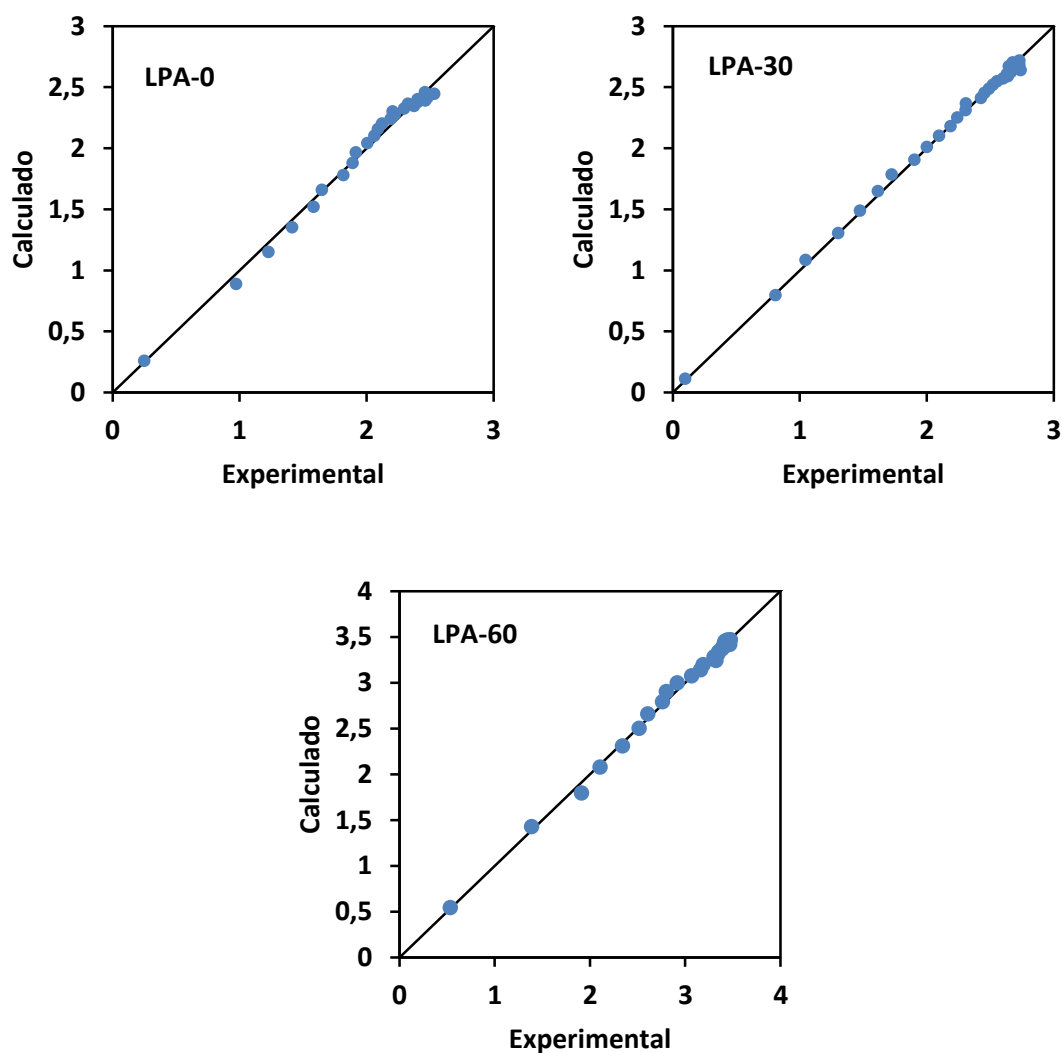


Figura 4.7. Relación entre los datos experimentales de humedad y los calculados por el modelo DSR durante la liofilización a presión atmosférica con (LPA-30, LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos.

En cuanto a las experiencias de liofilización a presión atmosférica, aunque las diferencias en los tiempos de rehidratación fueron significativas, las difusividades efectivas identificadas de rehidratación para LPA-0, LPA-30 y LPA-60 no resultaron significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Tabla 4.12. Difusividad efectiva identificada (D_{er}) y porcentaje de varianza explicada por el modelo DSR de la rehidratación de muestras de champiñón previamente liofilizadas a presión atmosférica con (LPA-30, LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos y liofilizadas a vacío (LV). Valores medios y desviación estándar.

LPA-0		LPA-30		LPA-60		LV	
D_{er} (10^{-8} m^2/s)	%VAR	D_{er} (10^{-8} m^2/s)	%VAR	D_{er} (10^{-8} m^2/s)	%VAR	D_{er} (10^{-8} m^2/s)	%VAR
7 ± 1	98 ± 1	$5,0 \pm 0,8$	$99,5 \pm 0,2$	6 ± 1	99 ± 1	32 ± 8	82 ± 7

4.2.4. Daño celular

Otro de los parámetros utilizados para cuantificar la influencia de los procesos de secado ensayados en la calidad de champiñón deshidratado obtenido fue el daño celular. Como se ha comentado en el apartado de “Materiales y Métodos”, su estimación se realizó a partir de la medida de la conductividad de agua destilada y desionizada en la que se mantuvieron dos láminas de champiñón (C_{et} y C_{em}). Estas medidas se realizaron con láminas de champiñón en fresco (F), congeladas y descongeladas (D) y deshidratadas (LPA-0, LPA-30, LPA-60 y LV).

En primer lugar, se determinó el porcentaje de pérdida de electrolitos (P_{er}), calculado como la proporción entre los electrolitos liberados tras el procesado (C_{et}) y los liberados tras la destrucción total del tejido celular (C_{em}). Excepto para la muestra de champiñón fresco, los resultados de P_{er} no mostraron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre el resto de muestras analizadas (Tabla 4.13). Sin embargo, las medidas de C_{et} sí que parecían indicar la existencia de diferencias entre las mismas (Figura 4.8). Una posible explicación de estos resultados podría ser que, para la determinación de C_{em} , no se alcanzó la destrucción total del tejido celular de las muestras. De hecho, los valores de C_{et} y C_{em} obtenidos resultaron muy similares en cada uno de los tipos de muestra. Por lo tanto, es de suponer que el tratamiento térmico utilizado para determinar C_{em} (baño en agua hirviendo durante 10 minutos) no consiguió liberar todos los electrolitos de la estructura. Esto hace que, al calcular la proporción entre ambas, el resultado sea similar en todos los casos.

Tabla 4.13. Porcentaje de pérdida de electrolitos (P_{er}) de láminas de champiñón frescas (F), descongeladas (D) y secadas con los distintos métodos llevados a cabo en este estudio (LPA-0, LPA-30, LPA-60 y LV). Valores medios y desviación estándar.

F	D	LPA-0	LPA-30	LPA-60	LV
$0,46 \pm 0,07$	$0,81 \pm 0,04$	$0,82 \pm 0,04$	$0,87 \pm 0,06$	$0,83 \pm 0,05$	$0,89 \pm 0,06$

Por estos motivos, se decidió considerar únicamente el C_{et} como indicador del daño celular (Figura 4.8). En este caso, los resultados sí que mostraron diferencias en el daño celular en función del tratamiento recibido.

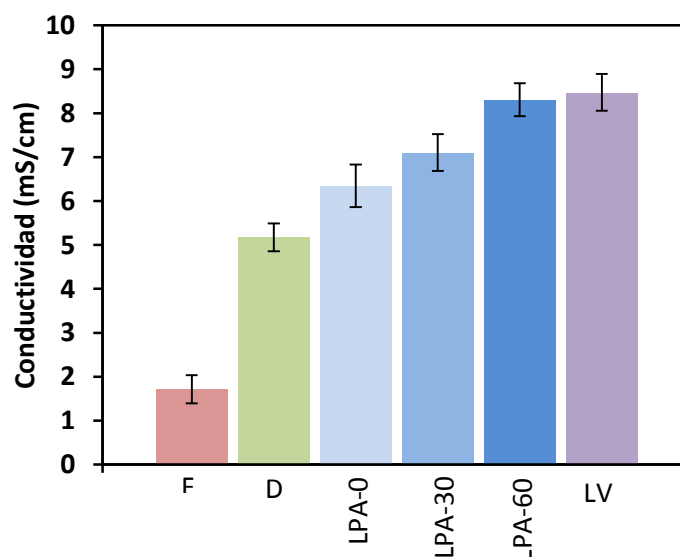


Figura 4.8. Influencia del tratamiento en el daño celular (C_{et}) e intervalos LSD de las muestras de champiñón frescas (F), descongeladas (D), liofilizadas a presión atmosférica con (LPA-30 y LPA-60) y sin (LPA-0) ultrasonidos y liofilizadas a vacío (LV).

Una parte importante del daño celular generado tras los procesos de liofilización a presión atmosférica o a vacío se puede explicar por la congelación previa al secado de las láminas de champiñón. Como se puede observar en la Figura 4.8., en comparación con las muestras F, el valor de C_{em} se incrementó significativamente ($p < 0,05$) en las muestras D. De hecho, el valor obtenido para las muestras D supone el 82% del total del daño celular generado por la liofilización a presión atmosférica sin aplicación de ultrasonidos (LPA-0) y un valor del 60% en el caso de las muestras liofilizadas convencionalmente (LV). Este daño celular podría ser explicado por el crecimiento de los cristales de hielo que rompen, empujan y comprimen las células. Estos efectos se ven intensificados al realizar la congelación de forma lenta ya que permite la formación de cristales de hielo más grandes (Voda *et al.*, 2012).

La influencia de la aplicación de ultrasonidos se observó únicamente en las muestras LPA-60, pues no se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las muestras LPA-0 y LPA-30. El daño celular presente en las láminas LPA-60 fue muy similar al obtenido en las LV (Tabla 4.13.) debido probablemente a los efectos estructurales de las ondas ultrasónicas. Por tanto, se puede concluir que, respecto al daño celular generado, la aplicación de ultrasonidos de 30W de potencia sería la mejor opción, pues genera un daño celular similar al obtenido sin esta aplicación, del cual cerca de un 75% es generado por la congelación.

CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se pueden obtener del presente trabajo se incluyen a continuación:

- La aplicación de ultrasonidos de potencia redujo de manera significativa el tiempo de secado de champiñón deshidratado mediante liofilización a presión atmosférica.
- El modelo difusivo resultó adecuado para describir las cinéticas de liofilización a presión atmosférica con y sin aplicación de ultrasonidos.
- La mejora cinética debida a la aplicación de ultrasonidos fue dependiente de la potencia acústica aplicada, ya que a mayor potencia ultrasónica aplicada, mayor reducción del tiempo de proceso y mayor aumento de la difusividad efectiva identificada.
- La aplicación de ultrasonidos tuvo una ligera influencia en el color de las muestras secas. No se encontraron diferencias significativas entre las dos potencias aplicadas.
- La rehidratación de las muestras produjo un pardeamiento intenso de las muestras de champiñón, independientemente del tipo de secado realizado.
- Los ultrasonidos sólo afectaron significativamente a la textura a la mayor potencia acústica ensayada, generando un reblandecimiento de las láminas rehidratadas, así como el incremento de su cohesividad y elasticidad.
- Los ultrasonidos no afectaron de forma significativa a la capacidad de rehidratación. Sí que se observó un ligero aumento significativo del tiempo de rehidratación de las láminas deshidratadas.
- En comparación con la liofilización a presión atmosférica convencional, la aplicación de ultrasonidos a una potencia baja no influyó significativamente en el daño celular. A potencia más elevada, el daño celular se incrementó hasta los valores observados en la liofilización a vacío.
- En vista de los resultados obtenidos, se puede considerar que la liofilización a presión atmosférica con aplicación de ultrasonidos de potencia es una tecnología interesante para la intensificación de la liofilización a presión atmosférica ya que aceleró la cinética del proceso de forma significativa sin prácticamente afectar a la calidad del producto final.

BIBLIOGRAFÍA

6. BIBLIOGRAFÍA

AHMAD-QASEM, M.H.; SANTACATALINA, J.V.; BARRAJÓN-CATALÁN, E.; MICOL, V.; CÁRCEL, J.A.; GARCÍA-PÉREZ, J.V. (2015). Influence of drying on the retention of olive leaf polyphenols infused into dried apple. *Food Bioprocess Technology*, 8: 120-133.

ALVES-FILHO, O.; EIKEVIK, T.; MULET, A.; GARAU, C.; ROSSELLO, C. (2007). Kinetics and mass transfer during atmospheric freeze drying of red pepper. *Drying Technology*, 25: 1155-1161.

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: *Ultrasound in Food Processing*. Ed. 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: *Modern Drying Technology Volume 5: Process intensification*. 1ª Ed., WILEY-VCH. Alemania, 237-273.

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.

CHIRALT, A.; MARTÍNEZ, N.; GONZÁLEZ, C.; TALENS, P.; MORAGA, G. (2007). *Propiedades físicas de los alimentos*. Ed. Universitat Politècnica de València, Valencia. 203pp.

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, visto el 28 de junio de 2017. <http://www.adenyd.es/wp-content/uploads/2015/02/Informe-sobre-champi%C3%B1%C3%B3n-y-setas.pdf>

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.

EROSKI CONSUMER, 2017. *Guía Práctica CONSUMER: Verduras y hortalizas*, visto el 27 de mayo de 2017. <http://verduras.consumer.es/setas/introduccion>

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.

FEN, Fundación Española de la Nutrición (2007). *La alimentación española. Características nutricionales de los principales alimentos de nuestra dieta*, Madrid, visto el 26 de mayo de 2017. <http://www.fen.org.es/mercadoFen/pdfs/champinon.pdf>

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. Universitat Politècnica de València. Valencia. 375pp.

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.

GARCÍA-PÉREZ, J.V.; OZUNA, C.; ORTUÑO, C.; CÁRCEL, J.A.; MULET, A. (2011). Modelling ultrasonically assisted convective drying of eggplant. *Drying Technology*, 29: 1499-1509.

GÓMEZ-GALINDO, F.; TOLEDO, R.T.; SJÖHOLM, I. (2005). Tissue damage in heated carrot slices. Comparing mild hot water blanching and infrared heating. *Journal of Food Engineering*, 67: 381-385.

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.

KOWALSKI, S.J.; PAWLOWSKI, A.; SZADZINSKA, J.; LECHTANSKA, J.; STASIAK, M. (2016). High power airborne ultrasound assist in combined drying of raspberries. *Innovative Food Science and Engineering Technologies*, 34: 225-233.

KROKIDA, M.K.; MARINOS-KOURIS, D. (2003). Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering*, 57: 1-7.

LEIVA, F.J.; SAENZ-DIEZ, J.C.; MARTÍNEZ, E.; JIMÉNEZ, E.; BLANCO, J. (2015). Environmental impact of *Agaricus bisporus* cultivation process. *European Journal Agronomy* 71: 141-148.

LESPINARD, A.R.; BON, J.; CÁRCEL, J.A.; BENEDITO, J.; MASCHERONI, R.H. (2013). Modelado de la transferencia de calor e índices de calidad durante el escaldado convencional y asistido por ultrasonidos de champiñones. *Mecánica Computacional*, 32: 3181-3192.

LINDÉN, L.; PALONEN, P.; LINDÉN, M. (2000). Relating freeze-induced electrolyte leakage measurements to lethal temperature in red raspberry. *Journal of the American Society of Horticultural Science*, 125: 429-435.

MAPAMA, Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (2016). *Base de datos de consumo en hogares*, España, visto el 30 de mayo de 2017. <http://www.mapama.gob.es/es/alimentacion/temas/consumo-y-comercializacion-y-distribucion-alimentaria/panel-de-consumo-alimentario/base-de-datos-de-consumo-en-hogares/consulta11.asp>

MARTÍNEZ, N.; ANDRÉS, A.M.; CHIRALT, A.; FITO, P. (1998). *Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno*. Ed. Universitat Politècnica de València. Valencia. 371 pp.

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. Universitat Politècnica de València. Valencia. 318pp.

OZUNA, C.; ÁLVAREZ-ARENAS, T.; RIERA, E.; CÁRCEL, J.A.; GARCÍA-PÉREZ, J.V. (2014a). Influence of material structure on air-borne ultrasonic application in drying. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21: 1235-1243.

OZUNA, C.; CÁRCEL, J.A.; WALDEB, P.M.; GARCÍA-PÉREZ, J.V. (2014b). Low temperature drying of salted cod (*Gadus morhua*) assisted by high power ultrasound: kinetics and physical properties. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 23: 146-155.

PAUDEL, E.; BOOM, R.M.; VAN DER SMAN, R.G.M. (2016). Effects of porosity and thermal treatment on hydration of mushrooms. *Food Bioprocess Technology*, 9: 511-519.

PEI, F.; YANG, W.; SHI, Y.; SUN, Y.; MUGAMBI-MARIGA, A.; ZHAO, L.; FANG, Y.; MA, N.; AN, X.; HU, Q. (2014). Comparison of freeze-drying with three different combinations of drying

methods and their influence on colour, texture, microstructure and nutrient retention of button mushroom (*Agaricus bisporus*) slices. *Food Bioprocess Technology*, 7: 702-710.

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.

SANJUÁN, N.; SIMAL, S.; BON, J.; MULET, A. (1999). Modelling of broccoli stems rehydration process. *Journal of Food Engineering*, 42: 27-31.

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. (2016a). Ultrasonically assisted low-temperature drying of desalted codfish. *LWT-Food Science and Technology*, 65: 444-450.

SANTACATALINA, J.V.; RODRIGUEZ, O.; SIMAL, S.; CÁRCEL, J.A.; MULET, A.; GARCÍA-PÉREZ, J.V. (2014). Ultrasonically enhanced low-temperature drying of Apple: influence on drying kinetics and antioxidant potential. *Journal of Food Engineering*, 138: 35-44.

SANTACATALINA, J.V.; SORIANO, J.R.; CÁRCEL, J.A.; GARCÍA-PÉREZ, J.V. (2016b). Influence of air velocity and temperature on ultrasonically assisted low temperature drying of eggplant. *Food and Bioprocess Technology*, 100: 282-291.

SZCZESNIAK, A.S. (1963). Classification of textural characteristics. *Journal of Food Science*, 28: 385-389.

TORRES, J.D.; GONZÁLEZ, K.J.; ACEVEDO, D. (2015). Análisis de perfil de textura en frutas, productos cárnicos y quesos. *Revista ReCiTela*, 14: 64-75.

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.; NIJSSE, 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.