



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA Y DEL MEDIO
NATURAL**

GRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS ALIMENTOS

CURSO 2017-2018

**INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y LA
APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS EN LA CINÉTICA
DE SECADO Y EN LA CALIDAD FINAL DEL
CHAMPIÑÓN.**

TRABAJO FIN DE GRADO

Autor: Alejandro Baeza Boronat

Director: Juan Andrés Cárcel Carrión

Valencia, junio 2018.



Título: Influencia de la temperatura y la aplicación de ultrasonidos en la cinética de secado y en la calidad final del champiñón.

Resumen:

Los alimentos deshidratados son cada vez más habituales en la industria agroalimentaria, tanto para su consumo directo como para su uso como ingredientes. Esto ha generado un gran interés en el desarrollo de nuevas técnicas de secado que, no sólo disminuyan los tiempos y costes de la operación, sino que también conserven las características del producto fresco. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de la temperatura y de la aplicación de ultrasonidos de potencia en la cinética de secado y en la calidad del champiñón (*Agaricus bisporus*).

Para ello, se realizaron una serie de experiencias de secado de muestras de champiñón en forma de láminas en un secadero de aire caliente. Se consideraron dos temperaturas de secado, 30°C y 70°C, con (25W y 50 W) y sin la aplicación de ultrasonidos. Cada una de estas condiciones de secado se ensayó, al menos, por triplicado. La modelización de las cinéticas de secado se realizó mediante dos modelos difusivos, uno en el que no se consideró la resistencia externa (modelo DSR) y otro en el que se incluyó dicha resistencia (modelo RE). Además, se evaluó la influencia del secado sobre la calidad de los productos obtenidos mediante la determinación de color, textura, capacidad de rehidratación y daño celular.

Los resultados mostraron que, tanto el aumento de temperatura de secado como la aplicación de ultrasonidos, redujeron el tiempo de secado. En las condiciones ensayadas, dicha reducción osciló entre un 80 % y un 50%. Al aplicar los resultados de la modelización con el modelo DSR se mostró un aumento de la difusividad efectiva (De) de hasta un 202%, en las experiencias en las que se secó a 70°C en comparación con las que se realizó a 30°C, ambas sin ultrasonidos. Sin embargo, dado que el ajuste del modelo no fue excesivamente preciso (% de varianza explicado por encima de 94%), se abordó la modelización de los datos experimentales con un modelo RE (incluyendo la resistencia externa).

La modelización mostró que, al aumentar la temperatura de secado de 30 a 70 °C, la difusividad efectiva (De) aumentó hasta en un 486% y el coeficiente de transferencia de materia (k) lo hizo hasta en un 73%. En relación a la aplicación de ultrasonidos, a 40 °C, supuso un incremento que causó un aumento en De y en k del 201% y 140%, respectivamente. En cuanto a la calidad del champiñón deshidratado, se observó una reducción de la capacidad de rehidratación en las muestras que se secaron a mayor temperatura. En cambio, la aplicación de ultrasonidos durante el secado incrementó la capacidad de rehidratación. El secado afectó ligeramente al color de las muestras, sin embargo, no se observaron diferencias entre las diferentes condiciones de secado utilizadas. La textura de las muestras no se vio condicionada por la temperatura de secado ni por la potencia de ultrasonidos aplicada. Por último, aunque la aplicación de ultrasonidos consiguió disminuir el daño celular producido durante el secado, las diferencias no resultaron significativas.

En resumen, la aplicación de ultrasonidos resulta una opción interesante en el secado por aire caliente de champiñón, ya que puede implicar tanto una reducción del tiempo de secado como una disminución de los efectos adversos del secado sobre la calidad del producto final.

Palabras clave: ultrasonidos, aire caliente, tiempo de secado, calidad, deshidratación.

Alumno: Alejandro Baeza Boronat

Profesor: Juan Andrés Cárcel Carrión

Valencia, junio 2018.

Title: Influence of temperature and ultrasounds application during drying kinetics and final quality of mushroom.

Abstract:

The presence of dried food in agri-food industry is increasing, both for direct use or such as ingredient. For this reason, a great interest in new techniques development, which not only reduce time and operation cost, but also preserve fresh food characteristics, has been generated. The aim of the study was to evaluate the effect of temperature and ultrasound application on drying kinetic and quality of mushroom (*Agaricus bisporus*).

For this purpose, a series of convective drying experiments were carried out with slice mushrooms samples. The drying runs were carried out at two drying temperatures, 30 °C and 70°C, and with (25W and 50W) and without ultrasound application. Each condition was performed, at least, by triplicate. Drying kinetics modelling was carried out by means of two diffusion models, one of them considering external resistance negligible (DSR model) and other including this external resistance in the model (ER model). In addition, it was assessed the influence of drying condition on final quality of mushroom through colour, texture, rehydration capacity and cell damage measurements.

The results showed that, both the increase in drying temperature and the application of ultrasound, reduced the drying time being this reduction in the range of 80-50 % at the tested conditions. The modelling of experimental results with the DSR model, showed an increase of the effective diffusivity (De) of up to 202% when drying at 70 °C and 30 °C without ultrasound are compared.

However, the fit of this model was not accurate (% variance explained in the close to 94%). For this reason, the modelling of the experimental data with an ER model was considered. In this case, the percentage of explained variance was above 99% showing the goodness of the fit. The increase of drying temperature from 30 to 70 °C and increased 486% the effective diffusivity (De) identified the 73% the mass transfer coefficient (k). As for the application of ultrasound, at 40 °C, De and k increased 201% and 140%, respectively.

As regard the quality of dried mushrooms, a reduction in the rehydration capacity was observed in the samples that were dried at a higher temperature. In contrast, the application of ultrasound during drying increased the rehydration capacity. Drying slightly affected the color of the samples, however, no significant differences were observed between the different drying conditions tested. The texture of the samples was not affected neither the drying temperature nor the ultrasonic power applied. Finally, although the application of ultrasound reduced the cell damage produced during drying, the differences among treatments were not significant

In summary, the application of ultrasound is an interesting option in hot-air drying of mushrooms, since it can involve both a reduction in drying time and a reduction in the adverse effects of drying on the quality of the final product.

Key words: Ultrasound, airborne, drying time, quality, dehydration.

Student: Alejandro Baeza Boronat

Professor: Juan Andrés Cárcel Carrión

Valencia, June 2018.

Títol: Influència de la temperatura i la aplicació d'ultrasons en la cinètica d'assecat i en la qualitat final del xampinyó.

Resum:

Els aliments deshidratats són cada vegada més habituals en la indústria agroalimentària, tant per al seu consum directe com para el seu ús com a ingredients. Això ha generat un gran interès en el desenvolupament de noves tècniques d'assecat que, no només disminueixin els temps i costos de l'operació, sinó que també conservin les característiques del producte fresc. L'objectiu de l'estudi va ser avaluar l'efecte de la temperatura i de l'aplicació d'ultrasons de potència en la cinètica d'assecat i en la qualitat del xampinyó (*Agaricus bisporus*).

Per a això, es van realitzar una sèrie d'experiències d'assecat de mostres de xampinyó en forma de làmines en un assecador d'aire calent. Es van considerar dues temperatures d'assecat, 30°C i 70°C, amb (25W i 50 W) i sense l'aplicació d'ultrasons. Cadascuna d'aquestes condicions d'assecat es va assajar, almenys, per triplicat. La modelització de les cinètiques d'assecat es va realitzar mitjançant dos models difusius, un en el qual no es va considerar la resistència externa (model DSR) i un altre en el qual es va incloure aquesta resistència (model RE). A més, es va avaluar la influència de l'assecat sobre la qualitat dels productes obtinguts mitjançant la determinació de color, textura, capacitat de rehidratació i dany cel·lular.

Els resultats van mostrar que, tant l'augment de temperatura d'assecat com l'aplicació d'ultrasons, van reduir el temps d'assecat. En les condicions assajades, aquesta reducció va oscil·lar entre un 80 % i un 50%. En aplicar els resultats de la modelització amb el model DSR es va mostrar un augment de la difusivitat efectiva (De) de fins a un 202%, en les experiències en les quals es va assecat a 70°C en comparació de les quals es va realitzar a 30°C, ambdues sense ultrasons. No obstant això, atès que l'ajust del model no va anar excessivament precís (% de variància explicat per sobre de 94%), es va abordar la modelització de les dades experimentals amb un model RE (inclouent la resistència externa).

La modelització va mostrar que, en augmentar la temperatura d'assecat de 30 a 70 °C, la difusivitat efectiva (De) va augmentar fins a en un 486% i el coeficient de transferència de matèria (k) ho va fer fins a en un 73%. En relació a l'aplicació d'ultrasons, a 40 °C, va suposar un increment que va causar un augment en De en k del 201% i 140%, respectivament. Quant a la qualitat del xampinyó deshidratat, es va observar una reducció de la capacitat de rehidratació en les mostres que es van assecat a major temperatura. En canvi, l'aplicació d'ultrasons durant l'assecat va incrementar la capacitat de rehidratació. L'assecat va afectar lleugerament al color de les mostres, no obstant això, no es van observar diferències entre les diferents condicions d'assecat utilitzades. La textura de les mostres no es va veure condicionada per la temperatura d'assecat ni per la potència d'ultrasons aplicada. Finalment, encara que l'aplicació d'ultrasons va aconseguir disminuir el dany cel·lular produït durant l'assecat, les diferències no van resultar significatives.

En resum, l'aplicació d'ultrasons resulta una opció interessant en l'assecat per aire calent de xampinyó, ja que pot implicar tant una reducció del temps d'assecat com una disminució dels efectes adversos de l'assecat sobre la qualitat del producte final.

Paraules clau: ultrasons, aire calent, temps d'assecat, qualitat, deshidratació.

Alumne: Alejandro Baeza Boronat

Professor: Juan Andrés Cárcel Carrión

València, juny 2018.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor, Juan Andrés Cárcel, por su dedicación, paciencia y tiempo.

A Inma, por ir a mi lado en este viaje y creer en mi.

A mi familia, gracias a quienes soy quien soy y hacia quienes sólo puedo expresar mi sincero agradecimiento por apoyarme durante mi etapa universitaria.

A Clara, porque sin sus enseñanzas y consejos de laboratorio, nada habría sido posible.

ÍNDICE

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	15
1.1 CHAMPIÑÓN FRESCO Y DESHIDRATADO	15
1.2 MÉTODOS DE DESHIDRATACIÓN	16
1.3 EFECTOS DE LOS ULTRASONIDOS	17
2. OBJETIVOS	20
3. MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1 MATERIA PRIMA	22
3.2 SECADO	23
3.2.1 Secadero	23
3.2.2 Condiciones de secado ensayadas	24
3.3 PARÁMETROS DE CALIDAD.....	24
3.3.1 Rehidratación	25
3.3.2 Color	25
3.3.3 Textura	26
3.3.4 Daño celular.....	27
3.4 MODELIZACIÓN DE SECADO Y REHIDRATACIÓN	28
3.5 ESTUDIO ESTADÍSTICO	29
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
4.1 SECADO	31
4.1.1 Cinética de secado.....	31
4.1.2 Modelización	33
4.2 PARÁMETROS DE CALIDAD.....	37
4.2.1 Rehidratación	37
4.2.2 Color	39
4.2.3 Textura	41
4.2.4 Daño celular.....	42
5. CONCLUSIONES	45
6. BIBLIOGRAFÍA	47

ÍNDICE DE FIGURAS

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Figura 3.1 Portamuestras..... 22

Figura 3.2. Esquema del secadero asistido por ultrasonidos. 1. Ventilador, 2. Unidad de calentamiento, 3. Anemómetro, 4. Válvula de 3 vías, 5. Termopar, 6. Cámara de carga de muestras, 7. Material de acoplamiento, 8. Brazo neumático móvil, 9. Transductor ultrasónico, 10. Cilindro vibratorio, 11. Portamuestras, 12. Balanza, 13. Unidad de adaptación de impedancia, 14. Vatímetro, 15. Generador de ultrasonidos de alta intensidad, 16. Ordenador de control. (Do Nascimento et al., 2016)..... 23

Figura 3.3. Zona de medida de color en la muestra de champiñón 25

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Figura 4.1. Evolución de la humedad adimensional (contenido de humedad a un tiempo de secado en relación al contenido de humedad inicial de las muestras) durante el secado de muestras de champiñón a 30 °C, 1 m/s sin (NOUS) y con aplicación (25 y 50 W) de ultrasonidos..... 32

Figura 4.2. Evolución de la humedad adimensional (contenido de humedad a un tiempo de secado en relación al contenido de humedad inicial de las muestras) durante el secado de muestras de champiñón a 70 °C, 1 m/s sin (NOUS) y con aplicación (25 y 50 W) de ultrasonidos..... 32

Figura 4.3. Relación entre los datos experimentales de humedad adimensional (W_{exp} adimensional) y los calculados (W_{calc} adimensional) por el modelo DSR obtenidos durante el secado a 30°C con (30-25W y 30-50W) y sin ultrasonidos (30-NOUS) 34

Figura 4.4. Relación entre los datos experimentales de humedad adimensional (W_{exp} adimensional) y los calculados (W_{calc} adimensional) por el modelo DSR obtenidos durante el secado a 70°C con (70-25W y 70-50W) y sin ultrasonidos (70-NOUS) 35

Figura 4.5. Valores promedio de P_{re} de las muestras secadas a 30°C y 70°C con (25W y 50W) y sin ultrasonidos (NOUS) 43

ÍNDICE DE TABLAS

1. INTRODUCCIÓN

Tabla 1.1 Composición nutricional de <i>Agaricus bisporus</i> (FEN, 2007)	15
--	----

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Tabla 3.1 Codificación de las condiciones de procesamiento aplicadas en el secado asistido por US de champiñones.....	24
--	----

Tabla 3.2. Parámetros de calidad analizados en los diferentes tipos de muestra de champiñón, fresca, seca y seca y rehidratada.....	25
--	----

Tabla 3.3. Parámetros obtenidos a partir de los datos obtenidos en el análisis de textura (Torres et al, 2015)	27
---	----

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4.1. Valores promedio y desviaciones estándar de la a_w de las láminas de champiñón tras el secado en diferentes condiciones de secado.....	31
--	----

Tabla 4.2. Tiempo de secado necesario para alcanzar una humedad de 0,75 kg agua/kg materia seca para el secado de champiñón a diferentes temperaturas (30 y 70 °C) y con (25 W, 50 W) y sin (NOUS) aplicación de ultrasonidos.....	33
---	----

Tabla 4.3. Promedio de difusividad efectiva (D_e) identificada y desviación estándar tras ajustar el modelo DSR a los datos experimentales de secado de champiñón a 30 y 70°C y con (25W y 50W) y sin aplicación de ultrasonidos (NOUS), y porcentaje de varianza explicada (%VAR) por el modelo.....	34
--	----

Tabla 4.4. Difusividad efectiva (D_e) y coeficiente de transferencia de materia (k) (valores promedio y desviación estándar) identificados mediante el ajuste del modelo RE a los datos experimentales de secado de champiñón a 30°C y 70°C y con (25W y 50W) y sin ultrasonidos (NOUS) y porcentaje de varianza explicada por el modelo (%VAR)..	36
--	----

Tabla 4.5. Valores promedio y desviaciones estándar de la humedad tras la rehidratación (X_{wf}) y del tiempo necesario para alcanzar una humedad de 1,5 kg agua/kg ms ($t_{1,5}$ (s)) de las muestras de champiñón secadas a 30°C y 70°C con (25W y 50W) y sin aplicación de ultrasonidos (NOUS).....	38
--	----

Tabla 4.6. Valores promedio y desviaciones estándar de la difusividad efectiva (D_{eRH}) y porcentaje de varianza explicada (%VAR) de la rehidratación de las muestras secadas a 30°C y 70°C con (25W y 50W) y sin ultrasonidos (NOUS) tras ajustarlas con el modelo DSR..... 39

Tabla 4.7. Valores promedio y desviación estándar de las coordenadas CIE $L^*a^*b^*$ y variación de color respecto a la muestra fresca (ΔE) de las láminas de champiñón secadas a 30°C y 70°C, con (30-25W y 30-50W, 70-25W y 70-50W) y sin ultrasonidos (30-NOUS, 70-NOUS) 40

Tabla 4.8. Valores promedio y desviaciones estándar de C^*_{seco} de las láminas de champiñón secadas a 30°C y 70°C, con (30-25W y 30-50W, 70-25W y 70-50W) y sin ultrasonidos (30-NOUS, 70-NOUS) 40

Tabla 4.9. Valores promedio y desviación estándar de las coordenadas CIE $L^*a^*b^*$ y variación de color respecto a la muestra fresca (ΔE) de las láminas de champiñón rehidratadas a 30°C y 70°C, con (30-25W y 30-50W, 70-25W y 70-50W) y sin ultrasonidos (30-NOUS, 70-NOUS) 41

Tabla 4.10. Valores promedio y desviaciones estándar de C^*_{RH} de las láminas de champiñón secadas a 30°C y 70°C, con (30-25W y 30-50W, 70-25W y 70-50W) y sin ultrasonidos (30-NOUS, 70-NOUS) 41

Tabla 4.11. Valores promedio y desviaciones estándar de los parámetros de textura analizados en el producto fresco y en las muestras rehidratadas a 30°C y 70°C, con (30-25W y 30-50W, 70-25W y 70-50W) y sin ultrasonidos (30-NOUS, 70-NOUS) ... 42

Tabla 4.12. Valores promedio y desviaciones estándar de la pérdida relativa de electrolitos (P_{re}) de las muestras secadas a 30°C y 70°C, con (25W y 50W) y sin ultrasonidos (NOUS) y del producto fresco..... 43

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1 CHAMPIÑÓN FRESCO Y DESHIDRATADO

El champiñón (*Agaricus bisporus*) es un hongo basidiomiceto perteneciente a la familia de las agaricáceas que se reproduce mediante esporas. También es conocido como bola de nieve o seta de París, debido a su origen francés a principios del siglo XX.

Morfológicamente, el cuerpo del champiñón está formado por 3 partes: el sombrero, de color blanco y redondeado; el himenio, que es la parte interior del sombrero y que está compuesto por laminillas; y el pie o soporte, que tiene una forma cilíndrica y que sostiene el sombrero (FEN, 2007).

En relación a su composición nutricional, el champiñón ha sido reconocido como un alimento nutritivo, de poco aporte calórico y como una fuente importante de compuestos biológicamente activos (Guizani et al., 2013). Su componente mayoritario es el agua, seguido por los carbohidratos y la fibra. Además, es fuente de nutrientes y metabolitos secundarios como algunos compuestos fenólicos, conocidos por su acción antioxidante (Mau et al., 2002). Aunque en pequeña cantidad, el champiñón contiene todos los aminoácidos esenciales para el ser humano, por lo que también es considerado como fuente de éstos. Su forma de almacenar energía es mediante glucógeno, compuesto característico del reino animal, y no en forma de almidón o celulosa. Los polisacáridos más abundantes en su composición son los beta-glucanos y la quitina (CTICH, 2015). También es fuente importante de vitaminas, entre las que predomina la niacina, aunque también destacan los valores de riboflavina, tiamina y ácido ascórbico o vitamina C (Tabla 1.1.).

Tabla 1.1. Composición nutricional de *Agaricus bisporus* (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

El continuo incremento de la población ha traído un aumento del consumo de todo tipo de alimentos. El champiñón, junto con otras setas comestibles, está siendo cada vez más utilizado para su consumo directo y como ingrediente de otros productos, por ejemplo, en cremas y salsas, así como en sopas, pastas y otros alimentos deshidratados de preparación

rápida. Esto ha generado un gran interés en el desarrollo de nuevas técnicas de secado que no sólo disminuyan los tiempos y costes de la operación, sino que también conserven las características del producto fresco.

1.2 MÉTODOS DE DESHIDRATACIÓN

El término deshidratación hace referencia a la eliminación parcial o total del contenido de agua de una muestra con el objetivo de disminuir su actividad de agua. El secado, por su parte se utiliza cuando, la deshidratación tiene lugar con cambio de fase (García-Pérez *et al.*, 2007). En ambos casos, la reducción del contenido de agua proporciona una mayor estabilidad a los alimentos ya que se detienen o ralentizan las reacciones químicas y el crecimiento de los microorganismos responsables del deterioro (Vega-Mercado *et al.*, 2001). El aumento de la estabilidad prolonga la vida útil de los productos deshidratados y posibilita mayores tiempos de almacenamiento. Además, el manejo de productos secos abarata los costes de almacenamiento y transporte, ya que se reduce su volumen y peso (Alves-Filho *et al.*, 2007). Sin embargo, el secado puede producir cambios estructurales, como endurecimiento o reducción del tamaño de las células; o fisicoquímicos, como merma de color u oxidación, responsables del descenso de la calidad de los productos tratados. Dicho grado de deterioro depende de la técnica y de las condiciones de secado utilizadas (Garau *et al.*, 2006).

Así, se pueden diferenciar dos grandes grupos de técnicas de secado en función de si la deshidratación tiene una carácter mecánico, como en el caso de las operaciones de prensado u ósmosis inversa, o fisicoquímicos, como en el secado por aire caliente, la atomización o el secado a bajas temperaturas (liofilización) (Vega-Mercado *et al.*, 2001). Uno de los métodos de deshidratación más comunes es el secado por aire caliente debido a su sencillez y bajo coste inicial. Otra ventaja de la técnica es que proporciona productos homogéneos y de larga vida útil. Su principal inconveniente es el elevado tiempo de proceso que se requiere. Es por ello por lo que, para mejorar la velocidad de la operación, se suele trabajar a altas temperaturas. La pérdida de agua en estas condiciones y el calentamiento del producto pueden provocar cambios en la estructura celular, como la formación de poros, el encogimiento celular o la degradación de compuestos termolábiles, como ciertos antioxidantes (Fan *et al.*, 2017). En este sentido, el sector agroalimentario está realizando un notable esfuerzo en la mejora de los procesos existentes o la combinación de técnicas tradicionales con métodos innovadores con el objetivo de reducir los efectos negativos de la deshidratación sobre la calidad del producto final, así como de incrementar el rendimiento energético y reducir impacto sobre el medioambiente (Sanjuán *et al.*, 1999). Entre las tecnologías que se están combinando con métodos tradicionales destacan la aplicación de microondas, la radiación infrarroja o la aplicación de ultrasonidos de potencia (García-Pérez *et al.*, 2007). Así, las microondas son ondas electromagnéticas que, al aplicarse sobre un producto, generan una oscilación de las moléculas de agua que produce una fricción y, por lo tanto, un calentamiento. Esto produce una diferencia de presión entre el interior y la superficie del alimento que hace que la humedad se desplace hasta el exterior (Zhang *et al.*, 2010). Respecto a un secado convencional, la aplicación de microondas produce una reducción

del tiempo de secado. Sin embargo, el producto no se suele calentar homogéneamente y puede presentar zonas con sobrecalentamiento e incluso quemaduras. En cuanto a la radiación de ondas infrarrojas, sus principales ventajas son el fácil acoplamiento a los secaderos convencionales, el control de la dirección de la energía y el descenso de los tiempos de secado (Doymaz, 2015). Sin embargo, al igual que las microondas, utiliza una energía térmica adicional, afectando en gran medida a la calidad final del producto (Riera *et al.*, 2011). Por el contrario, la aplicación de ultrasonidos de potencia o de alta intensidad se basa en que la generación, principalmente, de efectos mecánicos. Esto puede significar una mejor conservación de la calidad de los productos, reducir el coste energético y ser una técnica más respetuosa con el medioambiente (Gallego-Juárez *et al.*, 2010).

1.3 EFECTOS DE LOS ULTRASONIDOS

Los ultrasonidos son ondas acústicas con una frecuencia superior a 20 kHz (Raj *et al.*, 2004). Están caracterizados, como cualquier onda, por parámetros como la frecuencia, la velocidad, la longitud de onda, la potencia o la impedancia. La denominación “ultrasonidos de potencia” hace referencia a aquellas aplicaciones de los ultrasonidos para producir efectos significativos. Así, en el secado de alimentos, los ultrasonidos producen en los sólidos una serie de ciclos de compresiones y relajaciones, conocidos como efecto esponja, que pueden incrementar el transporte de materia y calor. Además, pueden llegar a producir la formación de microcanales internos que facilitan el movimiento de la humedad contenida hacia la superficie (Mulet *et al.*, 2003). En la interfase sólido-gas provocan variaciones de presión y velocidades oscilantes (Cárcel *et al.*, 2017) que disminuyen la capa límite de difusión. Todo esto aumenta la velocidad de eliminación de humedad desde la superficie hasta el ambiente, lo que podría reducir el tiempo de secado y el consumo energético sin necesidad de utilizar altas temperaturas.

Sin embargo, la influencia de los ultrasonidos en el secado depende de las condiciones en las que se realice el proceso. Así, los efectos de los ultrasonidos de potencia son superiores a temperaturas moderadas, (por debajo de 40°C) que a altas temperaturas (por encima de 60°C). Esto se podría explicar a partir de la relación entre la energía mecánica que proporcionan los ultrasonidos, y la energía térmica que proporciona el aire de secado. Así, la gran cantidad de energía disponible a altas temperaturas enmascara la influencia de los ultrasonidos (Sabarez *et al.*, 2012) que sí que resulta significativa a temperaturas moderadas.

La velocidad del aire de secado es también una variable importante que influye en los efectos de los ultrasonidos. Así, a velocidades de aire elevadas, las turbulencias que genera el aire de secado pueden romper el campo acústico (García-Pérez *et al.*, 2007) e impedir que la energía acústica llegue a las muestras con suficiente intensidad como para provocar efectos.

La potencia acústica aplicada es otro factor a tener en cuenta. En general, se puede establecer que, para los rangos estudiados, cuanto mayor es la potencia, mayores son los

efectos provocados por los ultrasonidos, y más se acelera el proceso de secado. (Sabarez *et al.*, 2012).

Por último, la estructura del alimento es otra de las variables a considerar a la hora de aplicar ultrasonidos de potencia. Según Ozuna *et al.* (2014a), los productos con estructuras más porosas, como el champiñón, permiten una mejor transmisión de la energía acústica que hace que los efectos de los ultrasonidos sean más importantes.

OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

El presente estudio tuvo como objetivo principal la evaluación de la influencia de la temperatura de secado y de la aplicación de ultrasonidos tanto en la cinética de secado del champiñón como en los parámetros de calidad del producto una vez deshidratado. Para ello, se propusieron los siguientes objetivos específicos:

- Determinar y cuantificar la influencia de la temperatura en la cinética de secado de champiñón
- Determinar la influencia de la aplicación de ultrasonidos en la cinética de secado de champiñón. Cuantificar el efecto de la potencia acústica aplicada.
- Determinar y cuantificar la influencia de la temperatura de secado y de la potencia de ultrasonidos aplicada sobre la calidad del champiñón deshidratado.

MATERIALES Y MÉTODOS

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIA PRIMA

Las experiencias se realizaron con champiñón fresco (*Agaricus bisporus*) que se adquirió en un supermercado local (Valencia, España). Para estandarizar en la medida de lo posible la materia prima, siempre se utilizó champiñón envasado el día previo a su adquisición en el supermercado. Con ayuda de una mandolina (Mandolina en V, Ibili.), se obtuvieron muestras laminares de 6 mm de espesor. Una vez cortadas, las muestras (12 láminas por experiencia) se colocaron de forma aleatoria en un portamuestras en forma de árbol (Figura 3.1). El sistema aseguró un flujo de aire caliente homogéneo alrededor de cada muestra de champiñón y un tratamiento uniforme de ultrasonidos (Gamboa-Santos et al., 2014).

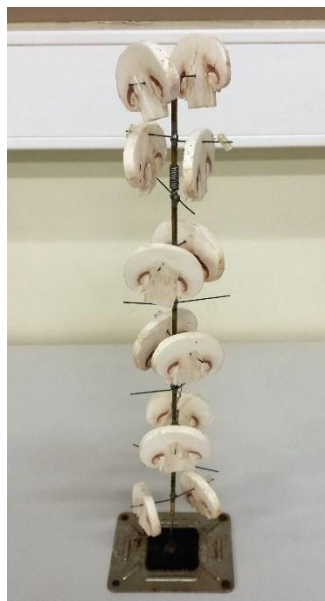


Figura 3.1. Portamuestras.

El contenido de humedad de las muestras, tanto frescas como secas o rehidratadas, se determinó por diferencia de peso, siguiendo el procedimiento de la AOAC número 934.01 (AOAC, 1997). Para ello, se colocaron 3 g de champiñón triturado en un pesasustancias. La muestra fue introducida en una estufa a vacío (0,2 atm) a 70 °C hasta alcanzar peso constante (aproximadamente 24 h). El peso final se registró mediante una balanza analítica XS204 de Mettler Toledo (USA).

3.2 SECADO

3.2.1 Secadero

Todas las experiencias realizadas durante el presente estudio se realizaron en un secadero convectivo de flujo directo de laboratorio. La cámara de secado está diseñada para posibilitar la aplicación de energía ultrasónica directamente al aire. Consiste en un tubo cilíndrico vibrante de aluminio, con un diámetro interno de 100 mm, una altura de 310 mm y un espesor de 10 mm (Figura 3.2.), hacia el cual es conducido el aire caliente. Un transductor de ultrasonidos tipo sándwich produce una vibración (21,8 kHz) que se transmite al cilindro de aluminio, generando así un campo ultrasónico de alta intensidad (presión sonora media de 155,4 dB, medida a 31 kW/m³, su capacidad de potencia máxima). Un adaptador de impedancia asegura el perfecto acople entre el generador de ultrasonidos y el transductor. El secadero consta de un dispositivo neumático que facilita la realización de las pesadas de la muestra en intervalos de tiempo preestablecidos. (Cárcel, J. A et al., 2007)

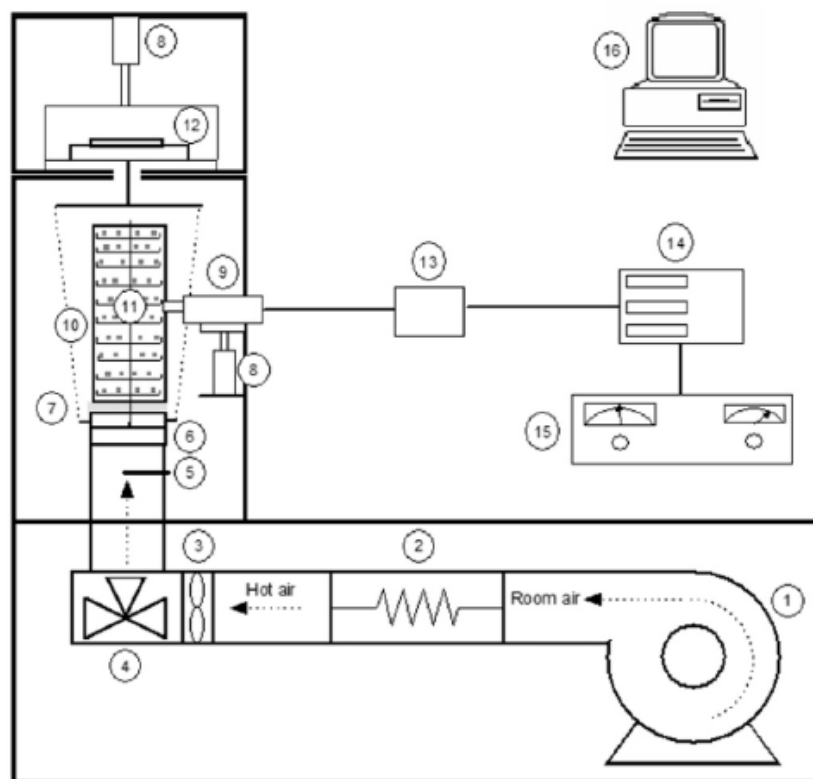


Figura 3.2. Esquema del secadero asistido por ultrasonidos. 1. Ventilador, 2. Unidad de calentamiento, 3. Anemómetro, 4. Válvula de 3 vías, 5. Termopar, 6. Cámara de carga de muestras, 7. Material de acoplamiento, 8. Brazo neumático móvil, 9. Transductor ultrasónico, 10. Cilindro vibratorio, 11. Portamuestras, 12. Balanza, 13. Unidad de adaptación de impedancia, 14. Vatímetro, 15. Generador de ultrasonidos de alta intensidad, 16. Ordenador de control. (Do Nascimento et al., 2016)

La temperatura y la velocidad del aire de secado se controlaron mediante un algoritmo PID. Además, se midió la humedad relativa del aire de secado a temperatura ambiente. Todos estos datos se registraron en un ordenador.

3.2.2 Condiciones de secado ensayadas

Las experiencias de secado se realizaron con una velocidad de aire de $1 \pm 0,1$ m/s), a 2 temperaturas diferentes (30 y 70 °C) y sin y con aplicación de ultrasonidos a dos potencias diferentes (25 y 50 W, energía eléctrica aplicada al transductor de ultrasonidos). Estas condiciones se eligieron en función de los resultados obtenidos en estudios previos con otros productos y que han mostrado que la aplicación de ultrasonidos reduce el tiempo de secado (Cárcel et al., 2011). Las muestras de champiñón secado fueron codificadas como muestra la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Codificación de las condiciones de procesamiento aplicadas en el secado asistido por US de champiñones.

Temperatura (°C)	Potencia (W)		
	0	25	50
30	30-NOUS	30-25W	30-50W
70	70-NOUS	70-25W	70-50W

Cada experiencia de secado se realizó por triplicado, aleatorizando su ejecución para estandarizar al máximo el error experimental. Una vez secas, las muestras se retiraron cuidadosamente del portamuestras y se colocaron en recipientes herméticos de cristal para su posterior análisis, evitando así posibles rehidrataciones debidas a efectos higroscópicos.

3.3 PARÁMETROS DE CALIDAD

El análisis de los parámetros de calidad fue realizado con el objetivo de determinar la influencia del secado y de la aplicación o no de ultrasonidos en el producto final deshidratado. Los parámetros escogidos como indicadores de calidad fueron principalmente físicos, concretamente, capacidad de rehidratación, color, textura y daño celular. En la tabla 3.2. se muestra los parámetros estudiados en cada una de las muestras consideradas. Así, en las muestras frescas se realizaron mediciones de color, daño celular y textura. Tras la deshidratación, se midió el color y el daño celular. Posteriormente, se determinó la cinética de rehidratación y se midió el color y de textura de las muestras rehidratadas.

Tabla 3.2. Parámetros de calidad analizados en los diferentes tipos de muestra de champiñón, fresca, seca y seca y rehidratada.

Muestra fresca	Muestra seca	Muestra rehidratada
<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

3.3.1 Rehidratación

La determinación de la cinética de rehidratación de las muestras se realizó colocando 5 láminas de champiñón deshidratado en una red metálica. Ésta se sumergió en un baño de agua destilada en constante agitación y temperatura controlada (25 ± 1 °C). Durante la operación, cada 10 segundos se extrajeron las muestras del agua, se les retiró la humedad superficial con papel secante y se registró su peso en una balanza analítica XS204 (Mettler Toledo, USA). Este proceso se repitió hasta que las láminas alcanzaron un valor constante. Como criterio de finalización se consideró que la rehidratación acabó cuando las muestras presentaron una variación de peso menor de 0,1 g en 3 pesadas consecutivas.

3.3.2 Color

Las medidas de color se realizaron tanto en el producto fresco como en las muestras secas y deshidratadas. Para ello, se determinaron las coordenadas de color L^* , a^* y b^* de la superficie de las muestras con un colorímetro (modelo CM-2500d de Konica Minolta, Japón). L^* indica la medida de luminosidad, variando entre 100, que es el blanco, y 0, que es el negro; a^* , que mide la variación de intensidad de rojo y verde, ($a^* > 0$ y $a^* < 0$, respectivamente); y b^* que indica la intensidad de amarillo y azul, ($b^* > 0$ y $b^* < 0$, respectivamente). El colorímetro se calibró antes de cada experiencia y las medidas se realizaron considerando un área de medida de 8 mm, el sistema iluminante de referencia D65, un ángulo de observación de 10° y el componente especular excluido o SCE. Los análisis fueron llevados a cabo colocando un protector de vidrio transparente sobre la muestra, con el objetivo de evitar que la muestra y la lente del colorímetro entrasen en contacto directo. En cada lámina de champiñón analizada, se realizó una medición en cada extremo horizontal de la base del champiñón (Figura 3.3). Además, en cada una de estas posiciones, se realizaron 3 adquisiciones, permitiendo así obtener un valor promedio.



Figura 3.3. Zona de medida de color en la muestra de champiñón

A partir de los valores experimentales de L^* , a^* y b^* , se obtuvo la variación total de color (ΔE^*), el índice de pardeamiento (IP) y el croma (C^*). Así, el ΔE^* (Ecuación 3.1) permite apreciar las diferencias entre el color de las muestras secas y rehidratadas y el de la muestra fresca.

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

Donde L^* , a^* y b^* son los valores obtenidos de las muestras deshidratadas o rehidratadas y L_0^* , a_0^* y b_0^* son los correspondientes a la muestra fresca que se utilizó como referencia.

El C^* (Ecuación 3.2) mide la saturación de un color desde el punto central del espacio de color, donde $a^* = b^* = 0$, por lo que un valor bajo de C^* equivale a un estímulo sin orientación hacia rojo, verde, azul o amarillo. Por otro lado, un valor alto denota colores saturados (Chiralt *et al.*, 2007).

$$C^* = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})} \quad (\text{Ec. 3.2.})$$

Por último, el IP (Ecuación 3.3), muestra las variaciones de color hacia tonos marrones.

$$IP = 100 \times \frac{X-0,31}{0,17} \quad (\text{Ec. 3.3.})$$

Donde X se calcula mediante la Ecuación 3.4:

$$X = \frac{(a^* + 1,75 \times L^*)}{(5,645 \times L^* + a^* - 3,012 \times b^*)} \quad (\text{Ec. 3.4.})$$

3.3.3 Textura

La determinación de la textura, tanto para muestras frescas como para muestras rehidratadas, se realizó con un texturómetro (TA-XT2, SMS, Reino Unido) mediante un test de doble compresión. Para ello, se aplicó una velocidad de descenso de 2 mm/s y una deformación del 50%. A partir de las curvas de esfuerzo, se estimaron 4 parámetros como características de textura (Szczesniak, 1963), dureza, cohesividad, elasticidad y masticabilidad (Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Parámetros obtenidos a partir de los datos obtenidos en el análisis 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)

3.3.4 Daño celular

La determinación del daño celular ocasionado por la pérdida de agua durante el secado se estimó a partir de medidas de conductividad. Así, el secado afecta a la integridad celular produciendo la pérdida de electrolitos tal y como lo describe Gómez-Galindo *et al.* (2005) ya que el daño que el tratamiento provoca sobre las membranas celulares genera una fuga de solutos en el líquido apoplástico (Lindén *et al.*, 2000). Para la realización de la medida, se colocaron dos muestras (fresca o deshidratada) en un vaso de precipitado de 250 ml (forma alta, Labbox, LBG 3.3.) junto con 25 ml de agua desionizada, durante 24 horas a temperatura ambiente (25 ± 1 °C). Pasado este período de tiempo, se midió la conductividad del líquido obtenido con un conductímetro (COND 7, LabProcess, España).

El valor obtenido (C_{et}) representa la pérdida de electrolitos ocasionada por el tratamiento correspondiente. Seguidamente, se introdujo el vaso de precipitados en agua a 100 °C durante 10 minutos con el objetivo de destruir por completo la membrana celular de las láminas de champiñón. Después, se enfrió hasta temperatura ambiente y se volvió a medir la conductividad. El valor de conductividad obtenido (C_{em}) corresponde a la pérdida total de electrolitos. La pérdida relativa de electrolitos (P_{re} ; Ecuación 3.5.) se calcula como la proporción entre C_{et} y C_{em} .

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

3.4 MODELIZACIÓN DE SECADO Y REHIDRATACIÓN

Para describir matemáticamente las cinéticas, tanto de secado como de rehidratación, se consideró un modelo basado en la segunda Ley de Fick (Ec. 3.6.). Para ambos procesos, se supuso un comportamiento isotrópico de lámina infinita. Por lo tanto, el flujo de agua se produjo solo en una dirección. Además, se asumió una difusividad efectiva constante (D_o Nascimento; et al., 2016).

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

Donde W es el contenido en humedad (kg H₂O/kg materia seca); D_e es la difusividad efectiva (m²/s); t es el tiempo (s) y x es la dirección de transporte (m).

La Ecuación 3.6 se resolvió teniendo en cuenta, como condición inicial, que el contenido de humedad en el instante inicial es homogéneo en toda la muestra (Ec.3.7) y que la muestra es simétrica (Ec. 3.8)).

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

En cuanto a la influencia de la resistencia externa en el transporte, se consideraron dos situaciones diferentes, que dieron lugar a dos modelos diferentes. En el primer caso, se aplicó un modelo difusivo (DSR) que sólo tiene en cuenta el transporte interno de humedad por difusión. Es decir, el modelo considera despreciable la resistencia externa a la transferencia de materia frente a la resistencia interna. Por ello, se asumió que la superficie de la muestra alcanza el equilibrio al inicio del secado (Ec. 3.7.)

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

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). Esta última se estimó a partir de la isoterma de sorción para champiñón publicada por Guizani *et al.* (2013).

La solución del modelo DSR se integró a todo el volumen de la muestra para poder predecir la evolución del contenido medio de humedad durante el secado. (Ec. 3.9.)

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

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 ajuste del modelo DSR a los datos experimentales se realizó identificando la difusividad efectiva (D_e) que minimiza la suma de las diferencias al cuadrado entre el contenido de humedad experimental y el calculado por el modelo. Para esto, se aplicó el método de optimización del gradiente reducido generalizado a través de la herramienta Solver (Microsoft Excel™, Microsoft, EE.UU.).

La precisión con la que el modelo utilizado se ajustó a los datos experimentales se evaluó a partir de la estimación del porcentaje de varianza explicada (%VAR).

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

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

En segundo lugar, se realizó una nueva modelización considerando la resistencia externa en el modelo (modelo RE). Para ello, se sustituyó la ecuación 3.8. por la ecuación 3.11.

$$De \rho_{ss} \frac{\partial W(L,T)}{\partial X} = k(aw(L,t) - \varphi_{aire}) \quad (\text{Ec. 3.11.})$$

Donde ρ_{ss} es la densidad del sólido seco (kg d.m./m^3), k es el coeficiente de transferencia de masa ($\text{kg agua/m}^2\text{s}$), aw es la actividad de agua y φ_{aire} es la humedad relativa del aire de secado. La ecuación 3.11. muestra cómo la humedad que fluye desde el interior de la muestra hacia la superficie del sólido por difusión y pasa al aire de secado por convección. En este caso, el modelo se resolvió usando un método implícito de diferencias finitas y se realizó la identificación simultánea de dos parámetros cinéticos, De y k , que minimizaran las diferencias entre el contenido de humedad experimental y el calculado. La optimización se realizó mediante el método SIMPLEX disponible en Matlab (función fmin) (Matlab 2015™, Inc, Natick, EE. UU). La precisión con la que el modelo se ajustó a los datos experimentales también fue evaluada mediante la estimación del porcentaje de varianza explicada (Ec 3.10.) (Do Nascimento *et al.*, 2016).

3.5 ESTUDIO ESTADÍSTICO

Con el objetivo de comprobar si las diferentes temperaturas de secado y las diferentes potencias de ultrasonidos de alta intensidad aplicadas causaron diferencias significativas en los resultados de cinética y de parámetros de calidad obtenidos, se realizaron diferentes análisis de la varianza (ANOVA). Para ello se utilizó el software Statgraphics Centurion XVII.II (Statistical Graphics Corporation, Warrenton, USA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 SECADO

4.1.1 Cinética de secado

Todos los secados se realizaron con una carga másica inicial de 48 ± 2 g. El contenido inicial de humedad de las muestras fue de $8,09 \pm 0,4$ kg H₂O/kg materia seca (m.s.). El criterio de finalización de las experiencias de secado fue alcanzar una pérdida del $87,02 \pm 0,05\%$ de peso inicial. Así, el peso medio de las muestras al terminar el secado (t_f) fue de $5,8 \pm 0,7$ g y el contenido de humedad final de $0,42 \pm 0,02$ kg H₂O/kg m.s.). Todas las muestras secadas mostraron una actividad de agua (a_w) por debajo de 0.6 (Tabla 4. 1.). Este valor aseguró una estabilidad de las muestras desde el punto de vista de actividad enzimática, así como del desarrollo de bacterias y hongos (Martínez *et al.*, 1998).

Tabla 4.1. Valores promedio y desviaciones estándar de la a_w de las láminas de champiñón tras el secado en diferentes condiciones de secado.

Temperatura (°C)	Potencia (W)		
	0	25	50
30	$0,48 \pm 0,04$	$0,39 \pm 0,03$	$0,43 \pm 0,01$
70	$0,60 \pm 0,05$	$0,47 \pm 0,01$	$0,47 \pm 0,07$

A partir de la medida de la masa de la muestra en intervalos de 5 minutos y del contenido de humedad inicial, se calculó la variación de humedad de la muestra durante el proceso de deshidratación.

El tiempo de secado osciló entre 2,3 y 25 h, dependiendo de las condiciones aplicadas. La utilización de diferentes temperaturas de secado causó diferencias significativas ($p < 0,05$) en el tiempo de deshidratación de las muestras. Así el tiempo de secado se redujo un 84% cuando la temperatura de secado se incrementó de 30 a 70 °C (Tabla 4.2). Según Strumillo y Kudra (1986), el incremento de temperatura reduce la humedad relativa del aire de secado, aumentando así el gradiente de humedad entre la muestra y el aire. Además, las altas temperaturas mejoran la movilidad del agua dentro del producto e incrementa la cantidad de energía disponible, facilitando el proceso de secado. En las figuras 4.1. y 4.2. se muestran las cinéticas experimentales de secado de champiñón a diferentes temperaturas y potencias acústicas.

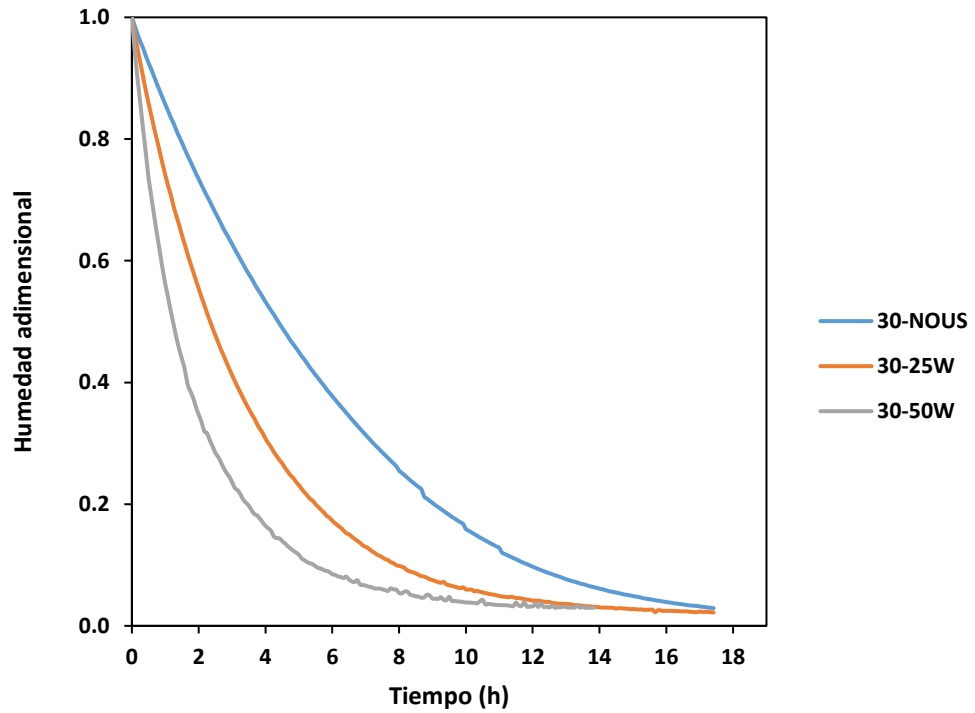


Figura 4.1. Evolución de la humedad adimensional (contenido de humedad a un tiempo de secado en relación al contenido de humedad inicial de las muestras) durante el secado de muestras de champiñón a 30 °C, 1 m/s sin (NOUS) y con aplicación (25 y 50 W) de ultrasonidos..

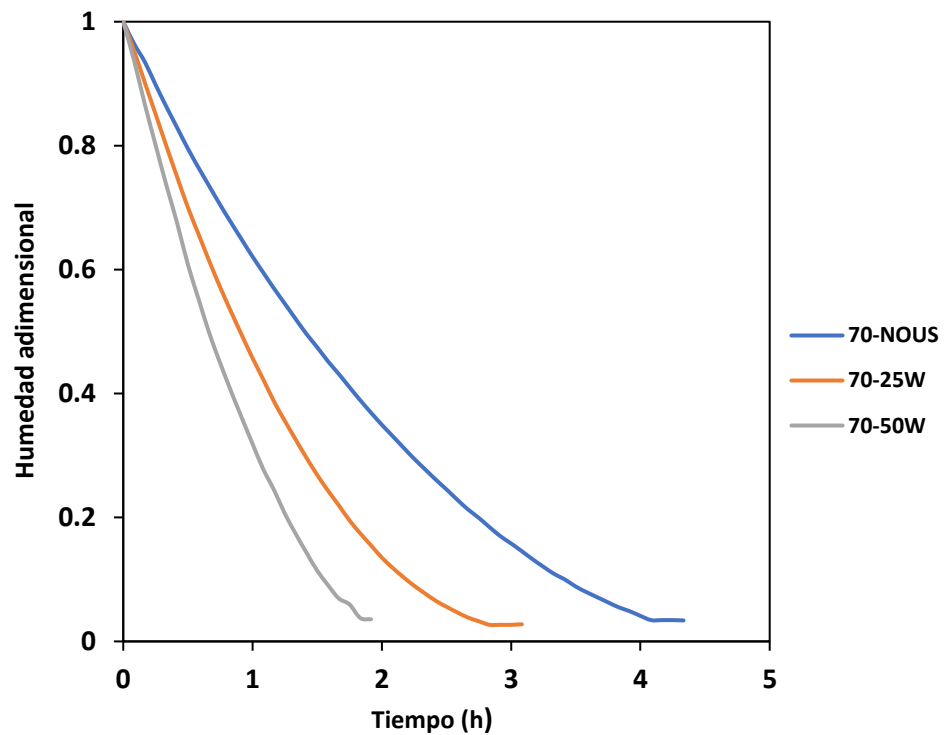


Figura 4.2. Evolución de la humedad adimensional (contenido de humedad a un tiempo de secado en relación al contenido de humedad inicial de las muestras) durante el secado de muestras de champiñón a 70 °C, 1 m/s sin (NOUS) y con aplicación (25 y 50 W) de ultrasonidos.

La aplicación de ultrasonidos durante el secado ($p < 0.05$) aumentó la velocidad de secado. Así, en comparación con los secados realizados sin ultrasonidos, la aplicación de una potencia de 50 W supuso una reducción del tiempo de secado de más del 50%, tanto a 30 °C como a 70°C (Tabla 4.2). Esto puede ser atribuido a la alternancia de compresiones y expansiones que generan los ultrasonidos y que incluso podrían crear microcanales internos que aumenten la velocidad de transferencia de agua (Cárcel *et al.*, 2012).

Tabla 4.2. Tiempo de secado necesario para alcanzar una humedad de 0,75 kg agua/kg materia seca para el secado de champiñón a diferentes temperaturas (30 y 70 °C) y con (25 W, 50 W) y sin (NOUS) aplicación de ultrasonidos.

	$t_{\text{secado}} \text{ (h)}$		
	NOUS	25 W	50 W
30°C	24 ± 1	17,8 ± 0,4	12 ± 2
70°C	4,8 ± 0,2	2,8 ± 0,3	2,3 ± 0,2

La potencia de ultrasonidos aplicada también influyó en la velocidad de secado. Como se puede observar en la tabla 4.2, a mayor potencia de ultrasonidos aplicada, mayor fue la reducción del tiempo de secado. Este efecto fue mayor a 30°C. Así, mientras a esta temperatura, la aplicación de ultrasonidos redujo el tiempo de secado un 27% a 25 a 70°C, dicha reducción fue del 41%. En términos absolutos, en las muestras tratadas a 70°C, el aumento de 25W a 50W solo redujo el tiempo de secado 0,5 h; mientras que en el caso de las muestras deshidratadas a 30°C la reducción fue de más de 5 h (Tabla 4.2.). Como se ha comentado, dicha reducción del tiempo de secado puede deberse a los efectos mecánicos que los ultrasonidos producen sobre las muestras. Así, los ciclos continuos de expansiones y compresiones pueden afectar a la interfase sólido-aire. Esto se conoce como efecto esponja debido a su semejanza con una esponja que se comprime y relaja continuamente, y generando microcanales que aumentan la transmisión de agua desde el interior hasta el exterior de la muestra. (Cárcel *et al.*, 2012).

4.1.2 Modelización

Como ya ha sido mencionado previamente en el presente estudio, se recurrió a la modelización de los datos experimentales para poder cuantificar la influencia de las variables estudiadas, la temperatura de secado y la aplicación de ultrasonidos, sobre la cinética de secado.

4.1.2.1 Modelo DSR

En primer lugar, se modelizaron las cinéticas de secado de champiñón considerando que el transporte de agua se vio limitado exclusivamente por la resistencia interna de las muestras (modelo DSR). Así, el ajuste conseguido en todas las experiencias realizadas a 30°C fue relativamente bueno, alcanzando valores de varianza explicada por encima del 96% (Tabla 4.3.).

La similitud entre los datos experimentales a 30°C y los calculados por el modelo (Figura 4.3.) confirman que éste último resultaría adecuado para modelizar las cinéticas. Sin embargo, el ajuste del modelo a las cinéticas obtenidas a 70°C no resultó tan adecuado. Así, la varianza explicada obtenida fue inferior al 95 % (Tabla 4.3.) y la tendencia de datos experimental y calculados no fue tan similar (Figura 4.4).

Tabla 4.3. Promedio de difusividad efectiva (D_e) identificada y desviación estándar tras ajustar el modelo DSR a los datos experimentales de secado de champiñón a 30 y 70°C y con (25W y 50W) y sin aplicación de ultrasonidos (NOUS), y porcentaje de varianza explicada (%VAR) por el modelo.

	30°C		70°C	
	De (10^{-10} m ² /s)	%VAR	De (10^{-10} m ² /s)	%VAR
NOUS	1,39 ± 0,09	98,1 ± 0,5	4,2 ± 0,4	94,3 ± 0,5
25W	2,2 ± 0,4	98,9 ± 0,4	7,7 ± 0,5	94,8 ± 0,2
50W	3,9 ± 0,6	98,9 ± 0,7	9,9 ± 0,3	93,1 ± 0,6

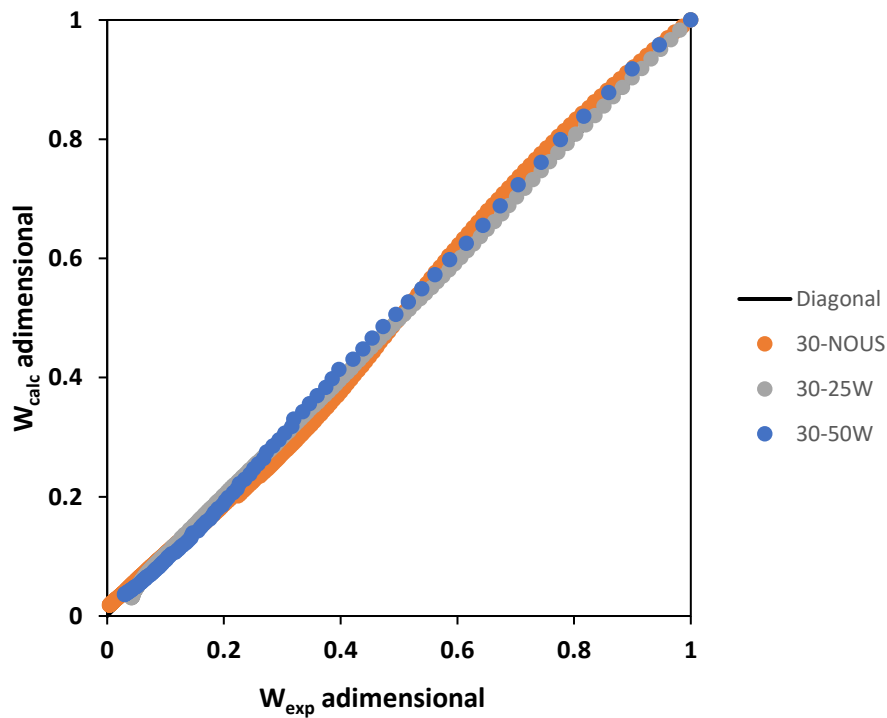


Figura 4.3. Relación entre los datos experimentales de humedad adimensional (W_{exp} adimensional) y los calculados (W_{calc} adimensional) por el modelo DSR obtenidos durante el secado a 30°C con (30-25W y 30-50W) y sin ultrasonidos (30-NOUS)

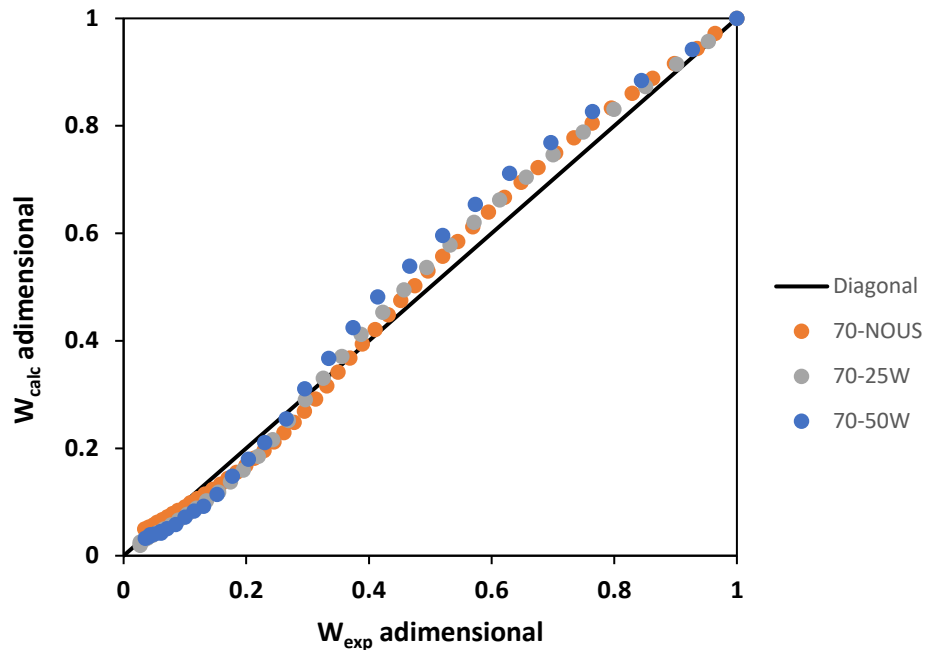


Figura 4.4. Relación entre los datos experimentales de humedad adimensional (W_{exp} adimensional) y los calculados (W_{calc} adimensional) por el modelo DSR obtenidos durante el secado a 70°C con (70-25W y 70-50W) y sin ultrasonidos (70-NOUS)

Como cabría esperar, valores de difusividad obtenidos a 70°C fueron significativamente ($p < 0.05$) superiores a los obtenidos a 30°C (Tabla 4.3). El aumento de la temperatura de secado supuso una mayor cantidad de energía disponible para la movilización de las moléculas de agua lo que disminuyó la resistencia al transporte de la misma.

Por otro lado, para una misma temperatura, la aplicación de ultrasonidos también incrementó la difusividad identificada, siendo esta más elevada cuanto mayor fue la intensidad de ultrasonidos aplicada. Al aumentar la potencia aplicado, la intensidad de los efectos de los ultrasonidos, como la continua compresión y expansión que las muestras sufren como consecuencia del efecto esponja (Cárcel *et al.*, 2012), sería mayor, lo que causó un aumento significativo de los valores de D_e .

Sin embargo, el efecto de los ultrasonidos sobre la D_e fue mayor a la menor temperatura ensayada. Así, a 30 °C, la aplicación de ultrasonidos a 50 W incrementó el valor identificado un 180 % respecto al secado sin ultrasonidos. Este incremento fue solo del 136% a 70 °C. Esto indicaría que la influencia de los ultrasonidos en la cinética de secado es mayor a temperaturas más bajas.

4.1.2.2 Modelo RE

Dado que la velocidad del aire de secado utilizada, 1 m/s, es relativamente moderada, es lógico plantear que, en la cinética de secado, no sólo influyó la resistencia externa a la transferencia de materia sino también la resistencia interna. Por eso, y con el objetivo de mejorar el ajuste del modelo a los datos experimentales, también se realizó la modelización de la cinética de secado considerando dicha resistencia externa (modelo RE) Esto permitió identificar dos coeficientes de transporte diferentes, D_e , como medida de la resistencia interna, y k , como medida de la resistencia externa.

Tabla 4.4. Difusividad efectiva (D_e) y coeficiente de transferencia de materia (k) (valores promedio y desviación estándar) identificados mediante el ajuste del modelo RE a los datos experimentales de secado de champiñón a 30°C y 70°C y con (25W y 50W) y sin ultrasonidos (NOUS) y porcentaje de varianza explicada por el modelo (%VAR).

	D_e ($\times 10^{-10}$ m ² /s)	k ($\times 10^{-10}$ m ² /s)	VAR (%)
30-NOUS	1,69 ± 0,08	1,37 ± 0,03	98,2 ± 0,3
70-NOUS	9,9 ± 0,1	2,36 ± 0,02	99,21 ± 0,01
30-25W	3,08 ± 0,03	2,7 ± 0,4	97,8 ± 0,2
70-25W	20,1 ± 0,6	3,8 ± 0,5	98,5 ± 0,2
30-50W	5,1 ± 0,1	3,3 ± 0,7	96 ± 1
70-50W	27,2 ± 0,3	4,8 ± 0,3	98,4 ± 0,2
Promedio %	491 ± 58	54 ± 16	

Al igual que en el caso del modelo DSE, la temperatura afectó significativamente a la D_e ($p < 0,05$) identificada, siendo los valores correspondientes a las experiencias realizadas a 70°C un 486 % mayores que las realizadas a 30°C (experiencias sin aplicación de ultrasonidos). Además, para una misma temperatura, la aplicación de diferentes intensidades de ultrasonidos también produjo un aumento significativo en los valores de difusividad identificada, siendo ésta más elevada cuanto mayor fue la potencia aplicada. En términos relativos, la aplicación de ultrasonidos con una potencia de 25W produjo un aumento mayor en las muestras tratadas a 70°C de 103 % mientras que cuando se aplicó una potencia de 50 W fue del 175 % (Tabla 4.4). Como ya ha sido mencionado previamente, esto es debido a los efectos mecánicos producidos por el efecto esponja.

Por otra parte, tanto la temperatura como la potencia de ultrasonidos utilizada causaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en los valores de k identificados. Así, en las muestras secadas sin ultrasonidos, la k identificada a 70 °C fue un 73 % superior a la identificada a 30 °C. La aplicación de ultrasonidos redujo la resistencia externa a la transferencia de materia.

Esta reducción fue mayor cuanto mayor la potencia aplicada. Así, a 30°C, el valor identificado en las experiencias realizadas con aplicación de ultrasonidos a 25 W fue un 97% mayor que el identificado en las experiencias sin ultrasonidos (NOUS). Al aplicar 50 W, esta diferencia creció hasta un 141%. (Tabla 4.5). Estas diferencias pueden ser debidas a las variaciones de presión, las velocidades oscilantes y las microcorrientes que los ultrasonidos generan en la interfase sólido-gas, lo cual se traduce en una reducción de la capa límite y, por consiguiente, en una mejora del movimiento del agua desde la superficie del producto al aire (Cárcel *et al.*, 2012).

4.2 PARÁMETROS DE CALIDAD

4.2.1 Rehidratación

Muchos de los productos secos se deben rehidratar para su consumo. Por lo tanto, la capacidad de rehidratación es un parámetro de calidad muy importante para un producto deshidratado. Dado que durante el secado se producen cambios estructurales irreversibles en las muestras, la rehidratación no puede ser estudiada simplemente como un proceso opuesto. Dichos cambios internos no permiten la recuperación total de la humedad que contenía la muestra inicialmente; por lo tanto, la capacidad de rehidratación de un producto depende tanto de su estructura como de los daños que la deshidratación pueda causarle (Krokida y Marinos-Kouris, 2003). Es por ello, que se estudió la influencia de las variables de secado consideradas, temperatura y aplicación de ultrasonidos, en la capacidad de rehidratación del champiñón deshidratado.

Los resultados experimentales obtenidos mostraron que la temperatura de secado afectó significativamente ($p < 0,05$) tanto al tiempo de rehidratación como a la humedad final de las muestras (Tabla 4.5). Las muestras secadas a 30°C mostraron una humedad final mayor y un tiempo de rehidratación menor que las secadas a 70°C. Esto puede ser debido a los cambios estructurales irreversibles que se producen en el interior de las muestras al trabajar a altas temperaturas, que reducirían su capacidad de rehidratación (Fan *et al.*, 2017).

Por su parte, la aplicación de ultrasonidos durante el secado también causó diferencias significativas ($p < 0,05$) en la humedad final de las muestras tras la rehidratación. Así, se observó un incremento de ésta al incrementar la potencia de ultrasonidos aplicada durante el secado (Tabla 4.5). El aumento de X_{WF} apreciable en 70-25W con respecto a 70-NOUS podría ser debido a la amortiguación de los efectos de la temperatura gracias a la reducción del tiempo de secado que supuso la aplicación de ultrasonidos (Chemat *et al.*, 2011)

Tabla 4.5. Valores promedio y desviaciones estándar de la humedad tras la rehidratación (X_{wf}) y del tiempo necesario para alcanzar una humedad de 1,5 kg agua/kg ms ($t_{1,5}$ (s)) de las muestras de champiñón secadas a 30°C y 70°C con (25W y 50W) y sin aplicación de ultrasonidos (NOUS).

	X_{wf} (kg agua/kg ms)	t (s)
30-NOUS	2,13 ± 0,08	128 ± 15
70-NOUS	1,7 ± 0,1	197 ± 12
30-25W	2,24 ± 0,06	117 ± 16
70-25W	2,14 ± 0,07	128 ± 6
30-50W	2,5 ± 0,1	100 ± 18
70-50W	2,24 ± 0,03	123 ± 6

Con el objetivo de poder cuantificar la influencia de la temperatura de secado y de la aplicación de ultrasonidos sobre la cinética de rehidratación, se ajustó el modelo DSR a los datos experimentales mediante el modelo DSR. En este caso, se identificó la difusividad efectiva del agua durante el proceso de rehidratación (D_{eRH}). Como se ha comentado antes, este modelo no considera la resistencia externa a la transferencia de materia y atribuye todos los cambios de componente en un material a los debidos a fenómenos de difusión. El ajuste logrado en todas las experiencias fue relativamente bueno, ya que los valores de varianza explicada se situaron por encima del 97% en todos los casos (Tabla 4.6). Esto confirmaría la validez de dicho modelo para la modelización de las cinéticas de rehidratación.

La difusividad de rehidratación identificada, D_{eRH} , resultó ser significativamente mayor en las muestras secadas a 70°C que en las secadas a 30 °C (Tabla 4.6). En este caso, el efecto sobre la estructura de la mayor temperatura del proceso de secado a 70 °C podría acelerar el proceso de rehidratación, aunque, como se ha visto antes, las muestras tuvieran un menor contenido de agua final.

En cuanto a la aplicación de ultrasonidos durante el secado, en general, produjo un ligero incremento en la cinética de rehidratación. Esto, probablemente sea debido a la formación de microcanales en la estructura interna de la muestra debido al estrés mecánico producido por los ultrasonidos (Mulet et al, 2003). Según Schössler et al. (2012), los efectos sobre el tejido celular por parte de los ultrasonidos se centran principalmente en la capa externa, mientras que los daños internos son atribuidos a las modificaciones estructurales inducidas por la eliminación de agua. Además, dicha eliminación puede verse incrementada por la absorción de las ondas ultrasónicas en forma de calor, afectando así a los cambios en el tejido interno.

Tabla 4.6. Valores promedio y desviaciones estándar de la difusividad efectiva (D_{eRH}) y porcentaje de varianza explicada (%VAR) de la rehidratación de las muestras secadas a 30°C y 70°C con (25W y 50W) y sin ultrasonidos (NOUS) tras ajustarlos con el modelo DSR.

	D_{eRH} ($\times 10^8$ m ² /s)	%VAR
30-NOUS	2,3 ± 0,5	98,71 ± 0,02
70-NOUS	3,34 ± 0,07	98,16 ± 0,01
30-25W	2,8 ± 0,2	97,98 ± 0,04
70-25W	2,97 ± 0,04	97,79 ± 0,09
30-50W	2,9 ± 0,3	97,58 ± 0,04
70-50W	3,4 ± 0,6	97,08 ± 0,03

Por lo tanto, la aplicación de ultrasonidos durante el secado generó muestras que rehidrataron más rápido y que presentaron un contenido final de humedad mayor que las muestras secadas convencionalmente.

4.2.2 Color

El análisis de la influencia de las condiciones de secado sobre el color se realizó tanto en las muestras secas como en las posteriormente rehidratadas.

En cuanto a las muestras secas, los resultados obtenidos mostraron que el proceso de deshidratación causó diferencias significativas ($p < 0,05$) en el color de las muestras (Tabla 4.8). Así, el valor de L^* disminuyó al secar la muestra, lo que indica un oscurecimiento de ésta que podría ser debido a la activación de la enzima polifenoloxidasasa (Kantrong *et al.*, 2014). Por el contrario, los valores de a^* aumentaron, aproximándose a tonalidades rojas. En el caso del valor de b^* , no se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) (Tabla 4.8).

Por su parte, aunque se pudo observar un pequeño incremento en el valor de b^* al secar a 70°C en comparación al correspondiente a las experiencias a 30°C, se puede establecer que, en general, la temperatura de secado no generó diferencias significativas ($p > 0,05$) en el color. La aplicación de ultrasonidos tampoco causó diferencias significativas en el color de las muestras secas (Tabla 4.8). La variación global de color de las muestras secas en relación con las muestras frescas (ΔE), aunque ligeramente superior en las muestras secadas a 70 °C, fue similar en todas ellas, independientemente de las condiciones de secado consideradas.

Tabla 4.7. Valores promedio y desviación estándar de las coordenadas CIE L*a*b* y variación de color respecto a la muestra fresca (ΔE) de las láminas de champiñón secadas a 30°C y 70°C, con (30-25W y 30-50W, 70-25W y 70-50W) y sin ultrasonidos (30-NOUS, 70-NOUS).

	L*	a*	b*	ΔE^*_{Seco}
30-NOUS	66 ± 7	3 ± 1	17 ± 1	34 ± 5
30-25W	67 ± 3	1,2 ± 0,3	17 ± 1	36 ± 2
30-50W	65 ± 3	2,5 ± 0,7	17 ± 1	36 ± 2
70-NOUS	59 ± 3	3,8 ± 0,7	20 ± 1	42 ± 3
70-25W	67 ± 5	2,5 ± 0,2	17,5 ± 0,5	34 ± 5
70-50W	63 ± 6	2,1 ± 0,6	18 ± 3	41 ± 4
Fresco	80 ± 2	1,6 ± 0,5	16 ± 2	

Tampoco se apreciaron diferencias significativas ($p > 0,05$) en los valores de C^*_{seco} obtenidos al variar la temperatura de secado ni con la aplicación de ultrasonidos (Tabla 4.8).

Tabla 4.8. Valores promedio y desviaciones estándar de C^*_{seco} de las láminas de champiñón secadas a 30°C y 70°C, con (30-25W y 30-50W, 70-25W y 70-50W) y sin ultrasonidos (30-NOUS, 70-NOUS).

C^*_{seco}	30°C	70°C
NOUS	18 ± 1	21 ± 2
25W	17 ± 1	17,6 ± 0,5
50W	18 ± 1	19 ± 3

Por otro lado, también se determinó el color de las muestras después de su rehidratación. En este caso, al comparar con las muestras frescas, sí que se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$). Así, el valor de L* resultó todavía menor que el observado en muestra seca. Esto, como ya se ha mencionado, podría deberse a un oscurecimiento a causa de la activación de la enzima polifenoloxidasas. Por el contrario, los valores de a* y b* se incrementaron, lo que indicaría un cambio de color hacia tonalidades rojas y amarillas, respectivamente (Tabla 4.9).

Por su parte, el cambio global de color de las muestras no resultó significativo ($p > 0,05$) ni con la utilización de diferentes temperaturas de secado ni con la aplicación de ultrasonidos.

Tabla 4.9. Valores promedio y desviación estándar de las coordenadas CIE L*a*b* y variación de color respecto a la muestra fresca (ΔE) de las láminas de champiñón rehidratadas a 30°C y 70°C, con (30-25W y 30-50W, 70-25W y 70-50W) y sin ultrasonidos (30-NOUS, 70-NOUS).

	L*	a*	b*	ΔE^*_{RH}
30-NOUS	38 ± 7	11 ± 1	33 ± 4	63 ± 2
30-25W	42 ± 5	8,5 ± 0,3	31 ± 5	61 ± 4
30-50W	44 ± 11	9 ± 3	28 ± 2	57 ± 9
70-NOUS	37 ± 9	8,6 ± 0,8	26,7 ± 0,8	61 ± 7
70-25W	44 ± 13	8 ± 2	28 ± 4	56 ± 13
70-50W	42 ± 8	7 ± 3	26 ± 5	60 ± 8
Fresco	80 ± 2	1,6 ± 0,5	16 ± 2	

Igualmente, no se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) en los valores de C^*_{RH} al utilizar diferentes temperaturas de secado ni aplicar ultrasonidos. Sin embargo, sí se observó un incremento, en todos los casos, del valor de C^* tras la rehidratación si se compara con el valor del producto seco, C^*_{seco} (Tabla 4.10), lo que puede deberse a una mayor saturación color (Chiralt *et al.*, 2007).

Tabla 4.10. Valores promedio y desviaciones estándar de C^*_{RH} de las láminas de champiñón secadas a 30°C y 70°C, con (30-25W y 30-50W, 70-25W y 70-50W) y sin ultrasonidos (30-NOUS, 70-NOUS).

C^*_{RH}	30°C	70°C
NOUS	35 ± 4	28,1 ± 0,8
25W	32 ± 5	29 ± 4
50W	30 ± 2	27 ± 5

4.2.3 Textura

Para determinar y valorar el efecto de las condiciones de secado (temperatura y aplicación de ultrasonidos) sobre la textura de las muestras rehidratadas, se realizaron medidas de doble compresión en un texturómetro y se determinaron 4 parámetros texturales: dureza, cohesividad, elasticidad y masticabilidad. También se realizaron estas medidas sobre muestras secas. Sin embargo, algunas de estas muestras se fracturaban al ser comprimidas debido al alto grado de deshidratación. Esto impidió obtener valores de dureza o masticabilidad comparables.

En primer lugar, es de destacar que la dureza del producto fresco fue muy superior a la de las muestras rehidratadas. Esto podría estar originado por el deterioro de la estructura interna de la muestra durante el proceso de deshidratación (García-Pérez et al., 2012). Además, no existen diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los valores de dureza de las muestras secadas a diferente temperatura y potencia de ultrasonidos aplicada (Tabla 4.11). solamente las muestras secadas a 30 °C y con aplicación de ultrasonidos a 20 W muestra valores de dureza significativamente superiores al resto. Esto podría indicar que el uso de una temperatura y una potencia de ultrasonidos moderadas podría tener un ligero efecto protector de la estructura inicial.

Tabla 4.11. Valores promedio y desviaciones estándar de los parámetros de textura analizados en el producto fresco y en las muestras rehidratadas a 30°C y 70°C, con (30-25W y 30-50W, 70-25W y 70-50W) y sin ultrasonidos (30-NOUS, 70-NOUS).

	Dureza (N)	Cohesividad	Elasticidad	Masticabilidad (N)
Fresco	240 ± 44	0,65 ± 0,04	0,79 ± 0,06	125 ± 30
30-NOUS	6,6 ± 0,8	0,77 ± 0,01	0,9 ± 0,1	4 ± 1
30-25W	12 ± 2	0,73 ± 0,02	0,99 ± 0,03	7 ± 3
30-50W	8,3 ± 0,1	0,73 ± 0,02	0,971 ± 0,001	5,8 ± 0,2
70-NOUS	7,7 ± 0,3	0,70 ± 0,07	0,97 ± 0,04	4,8 ± 0,3
70-25W	7,3 ± 0,9	0,717 ± 0,005	0,98 ± 0,01	5,1 ± 0,6
70-50W	7,1 ± 0,3	0,76 ± 0,03	0,98 ± 0,01	5,4 ± 0,3

En cuanto a la cohesividad de las muestras rehidratadas, se observó un ligero incremento en comparación con las muestras frescas, pero no se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre las muestras secadas a diferentes temperaturas de secado ni potencias de ultrasonidos. Esto mismo se repitió en el caso de la elasticidad.

Por último, la masticabilidad del producto fresco fue muy superior a la de las muestras rehidratadas. Además, ni la temperatura de secado ni la potencia de ultrasonidos aplicada mostraron diferencias significativas ($p > 0,05$).

En definitiva, se puede establecer que la influencia en la textura del champiñón rehidratado de las variables estudiadas durante el secado resultó ser poco importante.

4.2.4 Daño celular

El daño celular inducido por el proceso de secado se estimó a partir de la pérdida relativa de electrolitos (Pre) (Lindén et al., 2000).

Tabla 4.12. Valores promedio y desviaciones estándar de la pérdida relativa de electrolitos (P_{re}) de las muestras secadas a 30°C y 70°C, con (25W y 50W) y sin ultrasonidos (NOUS) y del producto fresco.

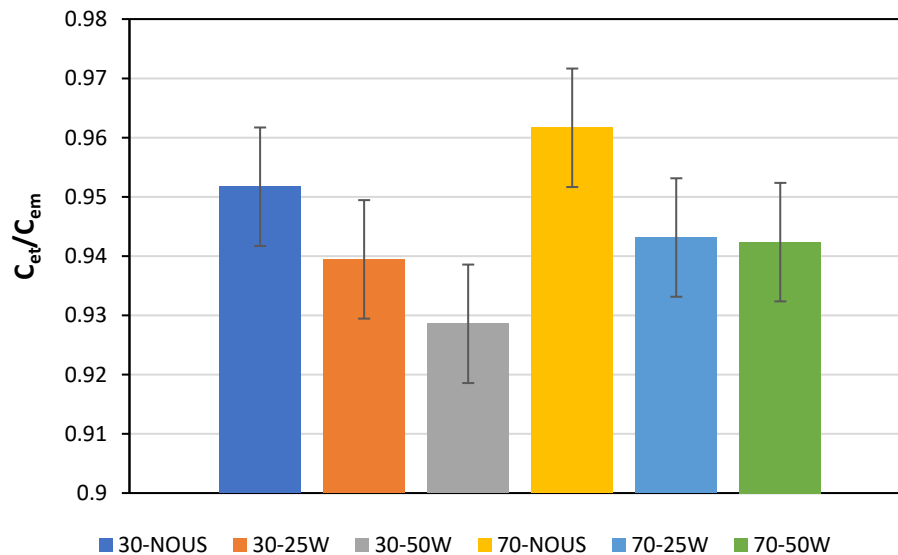
	NOUS	25W	50W
30°C	0,952 ± 0,005	0,939 ± 0,003	0,929 ± 0,004
70°C	0,962 ± 0,002	0,943 ± 0,005	0,942 ± 0,003
Fresco	0,63 ± 0,06		

Como se puede observar, el secado produjo un importante daño celular incrementando significativamente ($p < 0,05$) la pérdida de electrolitos en las muestras de champiñón (Tabla 4.12).

En cuanto a la influencia de la temperatura de secado, las muestras secadas a 30 °C mostraron un daño celular ligeramente inferior al observado a 70 °C, aunque las diferencias no resultaron muy importantes. En este sentido, los valores de P_{re} mientras obtenidos en las muestras secadas con aplicación de ultrasonidos. Esto podría deberse a que el tiempo de proceso se redujo por acción de las ondas ultrasónicas limitando los daños sobre la estructura del proceso.

En todo caso, todas las muestras presentaron valores de P_{re} muy superiores a los obtenidos en el producto fresco, lo que sugiere un daño celular muy importante durante secado independientemente de las condiciones aplicadas.

Figura 4.5. Valores promedio de P_{re} de las muestras secadas a 30°C y 70°C con (25W y 50W) y sin ultrasonidos (NOUS).



CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas del presente trabajo son:

- Como cabía esperar, el incremento de la temperatura de 30 a 70 °C disminuyó el tiempo de secado de champiñón.
- Por otra parte, la aplicación de ultrasonidos de potencia aceleró el secado reduciendo significativamente el tiempo de proceso en ambas temperaturas ensayadas.
- Los efectos de los ultrasonidos sobre la cinética fueron mayores cuanto mayor fue la potencia de ultrasonidos utilizada y menor la temperatura de secado.
- La aplicación de ultrasonidos durante el secado produjo un aumento significativo en la capacidad de rehidratación de las muestras.
- No se observaron diferencias significativas en el color de las muestras deshidratadas con aplicación de ultrasonidos en comparación con las secadas convencionalmente.
- Ni la temperatura de secado ni la aplicación de ultrasonidos durante el secado en las condiciones ensayadas afectaron significativamente a la textura de las muestras de champiñón.
- La utilización de ultrasonidos de potencia disminuyó significativamente el daño celular medido a partir de la pérdida relativa de electrolitos (P_{RE}). Sin embargo, estas diferencias resultan despreciables en comparación con el gran daño celular que produjo el propio proceso de secado.
- En resumen, la aplicación de ultrasonidos supone una alternativa a tener en cuenta en el secado por aire caliente de champiñones debido tanto a la reducción del tiempo de secado como a la atenuación de los efectos negativos que el secado tiene en su calidad final.

BIBLIOGRAFÍA

6. BIBLIOGRAFÍA

- 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
- Cárcel, J. A.; García-Pérez, J. V.; Riera, E.; Mulet, A. (2007). Influence of high-intensity ultrasound on drying kinetics of persimmon. *Drying Technology*, 25(1): 185-193.
- Cárcel, J. A.; García-Pérez, J. V.; Riera E.; Mulet, A. (2011). Improvement of convective drying of carrot by applying power ultrasound. Influence of mass load density. *Drying Technology*, 29: 174–182.
- 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: Ultrasound in Food Processing. Ed. John Wiley & Sons Ltd. Reino Unido, 371-391.
- Chiralt, A.; Martínez, N.; González, C.; Talens, P.; Moraga, G. (2007). *Propiedades físicas de los alimentos*. Ed. Universitat Politècnica de València, Valencia. 203pp.
- CTICH, Centro Tecnológico de Investigación del Champiñón de La Rioja (2015). *Propiedades nutricionales y saludables de los hongos, La Rioja, visto el 29 de diciembre 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.
- Doymaz, I. (2015). Infrared Drying Kinetics and Quality Characteristics of Carrot Slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, Article in Press. DOI: 10.1111/jfpp.12524.
- F. Chemat, M.K.; Zill-e-Huma, Khan (2011). Applications of ultrasound in food technology: processing, preservation and extraction, *Ultrasonics Sonochemistry*. 18: 813–835.

Fan, K.; Zhang, M.; Mujumdar, A. S. (2017). Application of airborne ultrasound in the convective drying of fruits and vegetables: A review. *Ultrasonics sonochemistry*, 39: 47-57

FEN, Fundación Española de la Nutrición (2007). *La alimentación española. Características nutricionales de los principales alimentos de nuestra dieta*, Madrid, visto el 2 de enero de 2018. (<http://www.fen.org.es/mercadoFen/pdfs/champinon.pdf>)

Gallego-Juárez, J.A. (2010). High-power ultrasonic processing: Recent developments and prospective advances. *Physics Procedia*, 3: 35-47.

Gamboa-Santos, J.; Montilla, A.; Soria, A. C.; Cárcel, J. A.; García-Pérez, J. V.; Villamiel, M. (2014). Impact of power ultrasound on chemical and physicochemical quality indicators of strawberries dried by convection. *Food chemistry*, 161: 40-46.

Garau, M.C.; Simal, S.; Femenia, A.; Rosselló, C. (2006). Drying of orange skin: drying kinetics modelling and functional properties. *Journal of Food Engineering*, 75: 288-295.

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.

Garcia-Perez, J.V.; Cárcel, J.A.; Benedito, J.; Mulet, A. (2007). Power ultrasound mass transfer enhancement in food drying. *Food and Bioproducts Processing*, 85: 247-254.

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.

Kantrong, H.; Tansakul, A.; Mittal, G. S. (2014). Drying characteristics and quality of shiitake mushroom undergoing microwave-vacuum drying and microwave-vacuum combined with infrared drying. *Journal of food science and technology*, 51(12): 3594-3608.

Krokida, M.K.; Marinos-Kouris, D. (2003). Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering*, 57: 1-7.

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.

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.

- Mau, J. L.; Lin, H. C.; Song, S. F. (2002). Antioxidant properties of several specialty mushrooms. *Food Research International* 35: 519–526.
- McMinn, W. A. M.; Magee, T. R. A. (1997). Kinetics of ascorbic acid degradation and non-enzymic browning in potatoes. *Food and Bioproducts Processing*, 75(4): 223-231.
- Mulet, A.; Cárcel, J. A.; Sanjuan, N.; Bon, J. (2003). New food drying technologies—Use of ultrasound. *Food Science and Technology International*, 9: 215–221.
- Sanjuan, N.; Lozano, M.; García-Pascual, P.; Mulet, A. (2003). Dehydration kinetics of red pepper (*Capsicum annuum* L var Jaranda). *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 83: 697-701.
- 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.
- 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 Bioproducts Processing*, 90: 624-632.
- Raj, B.; Rajendran, V.; Palanichamy, P. (2004). *Science and Technology of Ultrasonics*. Alpha Science International, Oxford, Reino Unido.
- Sabarez, H. T.; Gallego-Juarez, J. A.; Riera, E. (2012). Ultrasonic-assisted convective drying of apple slices. *Drying technology*, 30(9): 989-997.
- Sanjuán, N.; Simal, S.; Bon, J.; Mulet, A. (1999). Modelling of broccoli stems rehydration process. *Journal of Food Engineering*, 42: 27-31.
- Schössler, K.; Thomas, T.; Knorr, D. (2012). Modification of cell structure and mass transfer in potato tissue by contact ultrasound. *Food Research International*, 49: 425–431.
- Strumillo, C.; Kudra, T. (1986). *Drying: Principles, Applications, and Design*. CRC Press.
- 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.

Zhang, M.; Jiang, H.; Lim, R.X. (2010). Recent developments in microwave-assisted drying of vegetables, fruits, and aquatic products-drying kinetics and quality considerations. *Drying Technology*, 28: 1307-1316.