

# SECADO DE BACALAO DESALADO A BAJA TEMPERATURA Y EFECTO DE LOS ULTRASONIDOS EN EL SECADO, LA REHIDRATACIÓN, EL COLOR Y LA TEXTURA

M. E. Guerrero, J.V. García-Pérez, J.A. Cárcel<sup>1</sup>

## 1. RESUMEN

El secado por aire caliente es uno de los métodos más antiguos de conservación de alimentos. Las elevadas temperaturas pueden afectar a compuestos termolábiles y por lo tanto modificar propiedades organolépticas y nutricionales. El secado a baja temperatura podría ser una alternativa interesante si no fuera por los largos tiempos de proceso que conlleva. En este sentido, los ultrasonidos de potencia (US) generan una serie de efectos que podrían contribuir a una disminución de dicho tiempo de secado. Así, el principal objetivo de este trabajo fue evaluar la viabilidad de la aplicación de ultrasonidos de potencia en el secado a baja temperatura de bacalao desalado, determinándose su efecto tanto sobre la cinética del proceso como sobre algunos parámetros de calidad.

Para alcanzar este objetivo, láminas (5 x 3 x 0.5 cm) de bacalao desalado (24 h, 4 °C) se secaron (2 m/s y HR < 15 %) a tres temperaturas (10, 0 y -10 °C) con (50 W, 21.7 kHz) y sin la aplicación de US. Posteriormente, se estudió el proceso de rehidratación mediante inmersión de las mismas en agua (25 °C). Se utilizó un modelo difusivo para cuantificar tanto la cinética del proceso de secado como el de rehidratación. En las muestras secadas y en las rehidratadas se determinó el color y la textura.

Los resultados obtenidos mostraron que, en todas las temperaturas ensayadas, la aplicación de US redujo el tiempo de secado y aumentó la difusividad identificada observándose un incremento de la misma de hasta el 123.5% para la temperatura de -10 °C. El efecto de la aplicación de US durante el secado sobre la capacidad de rehidratación, el color y la textura fue menor a la temperatura de -10 °C.

**PALABRAS CLAVE:** Difusividad, modelización, secado convectivo y liofilización.

## 1. RESUM

L'assecat per aire calent és un dels mètodes més antics de conservació d'aliments. Les elevades temperatures poden afectar a compostos termolàbils i modificar propietats organolèptiques i nutricionals. L'assecat a

---

<sup>1</sup> Grupo de Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios (ASPA), Departamento de Tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia, Camí de Vera s/n, E46022, Valencia. Tel.:+34 96 387 93 76

baixa temperatura podria ser una alternativa interessant si no fóra pels llargs temps de procés. En aquest sentit, els ultrasons de potència (US) generen una sèrie d'efectes que podrien contribuir a una disminució del temps d'assecat. Així, el principal objectiu d'aquest treball va ser avaluar la viabilitat de l'aplicació d'ultrasons de potència en l'assecat a baixa temperatura d'abadejo dessalat, i el seu efecte sobre alguns paràmetres de qualitat.

Per arribar a aquest objectiu làmines d'abadejo dessalat (24 h, 4 °C) es van assecat (2 m/s y HR < 15 %) a tres temperatures (10, 0 i -10 °C), amb (50 W, 21.7 kHz) i sense l'aplicació d'US. Posteriorment, es va estudiar el procés de rehidratació mitjançant immersió de les mateixes en aigua (25 °C). Es va utilitzar un model difusiu per a quantificar tant la cinètica del procés d'assecat com el de rehidratació. En les mostres assecades i en les rehidratades es va mesurar el color i la textura.

Els resultats obtinguts van mostrar que, per a totes les temperatures assajades, l'aplicació d'US va reduir el temps d'assecat i va augmentar la difusivitat identificada, observant-se un increment de la mateixa del 123.5% per a la temperatura de -10 °C. L'efecte de l'aplicació d'US durant l'assecat sobre la capacitat de rehidratació, el color y la textura, va ser menor a la temperatura de -10 °C

PARAULES CLAU: Difusivitat, modelització, assecat convectiu, liofilització

## 1. ABSTRACT

Hot air drying is one of the oldest methods for food preservation. The high temperatures used could affect thermosensitive compounds and modify organoleptic and nutritional properties. Low-temperature drying could be an interesting alternative means of dehydration but it requires long drying times. Power ultrasound (US) generates several mechanicals effects that could contribute to shorten the drying time. Therefore, the main objective of this work was to evaluate the feasibility of power ultrasound application in low-temperature drying of desalted cod, not only kinetics but also quality parameters were assessed.

For this purpose, desalted cod (24 h, 4 °C) slices (5 x 3 x 0.5 cm) were dried (2 m / s and RH < 15 %) at three temperatures (10, 0 and -10 °C) with (50 W , 21.7 kHz ) and without US application. The dried samples were rehydrated immersing in water (25 °C). A diffusion model was used to quantify both drying and rehydration kinetics. The color and texture of both rehydrated and dried samples were determined.

The results showed that the US application shortened the drying time for every temperature tested and increased the identified moisture diffusivity (up to 123.5 % at -10 °C). The effect of US application during drying on rehydration, color and texture of cod was less marked at -10 °C.

KEYWORDS: Diffusivity, modelling, convective drying, freeze-drying.

## 2. INTRODUCCIÓN

El bacalao salado es un producto altamente apreciado por su alto valor nutricional (alto contenido en proteína y bajo contenido en grasa) y por sus propiedades sensoriales (color, textura, aroma y gusto característico). Este producto, principalmente producido en Noruega e Islandia, tiene una elevada demanda en países mediterráneos, como España y Portugal (Oliveira et al., 2012). El alto contenido en sal del bacalao salado obliga al desalado previo a su consumo lo que lo convierte en un producto altamente perecedero. Una manera de prolongar la vida útil del bacalao desalado podría ser la deshidratación.

El secado por aire es un método tradicional de conservación de los alimentos (García-Pérez et al., 2009) en el que influyen significativamente variables de proceso como la temperatura o la velocidad del aire. Así, los procesos de deshidratación son más rápidos a temperaturas elevadas, pero estas condiciones pueden provocar cambios importantes en las propiedades organolépticas y nutricionales. Durante los últimos años, ha habido un interés creciente de los consumidores por alimentos de alta calidad que conserven al máximo sus propiedades nutricionales (Soria y Villamiel, 2010). Así, el secado a baja temperatura proporciona productos deshidratados con cambios mínimos en su composición. Sin embargo, en estas condiciones el aumento significativo del tiempo de proceso, encarece mucho el mismo.

La intensificación de un proceso puede suponer una reducción del tiempo del proceso, un aumento en la calidad del producto obtenido o la reducción de ciertos peligros químicos y físicos sobre los alimentos (Chemat y Khan, 2011). En este sentido, los ultrasonidos de potencia producen una serie de efectos cuando atraviesan un medio, que pueden reducir de forma importante el espesor de la capa límite de difusión produciendo un incremento en la velocidad de transferencia de materia (Bantle, 2011). A nivel interno, los ultrasonidos producen en los sólidos ciclos de compresión y descompresión, que generan el denominado efecto esponja (De la fuente et al. 2006, Blanco-Blanco y Gallego Juárez et al. 2007) y que puede facilitar los intercambios de materia con el medio. Además, y como consecuencia de esta compresión-descompresión, pueden aparecer microrroturas en la estructura interna. Esto supone la apertura de microcanales que favorecen la difusión interna del agua (Cárcel et al. 2012). Del mismo modo, la cavitación en el agua interior de la muestra, favorecería la extracción de la misma (García-Pérez et al., 2006a, Bantle, 2011).

La aplicación de ultrasonidos en sistemas sólido-gas, como es el caso del secado, resulta muy compleja. La gran diferencia de impedancia entre los sistemas de generación (transductores, sólidos) y el medio de aplicación (aire) hace que una parte importante de la energía se refleje. A esto hay que añadirle la alta absorción acústica del aire, que dificulta la propagación de las ondas de alta intensidad (Mulet et al., 2003). Por lo tanto, para estas aplicaciones, es necesario el desarrollo de transductores eficaces que consigan un buen acople con el medio (Gallego-Juárez et al., 2007) para conseguir una transmisión eficaz de la energía acústica.

En este sentido, la aplicación de US durante el proceso de secado supone un aporte adicional de energía al sistema que puede contribuir al secado. Así, el efecto de los US es mayor cuanto menor es la temperatura de secado, es decir cuando menor es la energía del sistema (Cárcel et al., 2012; García-Pérez et al., 2006b), siendo muy significativo cuando los secados se realizan a temperaturas por debajo del punto de congelación del producto (García-Pérez et al., 2012). Por otro lado, la aplicación de US durante el secado también puede afectar a parámetros de calidad como la textura o el color (Ozuna 2013).

El objetivo de este trabajo fue evaluar la influencia de la aplicación de US en el secado a baja temperatura de bacalao desalado, tanto en la cinética de secado como en algunos parámetros de calidad como la capacidad de rehidratación, la textura y el color.

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 Materia Prima**

La materia prima utilizada en este trabajo fue bacalao salado (*Gadus morhua*) de un mismo lote (CARMEN CAMBRA S.L., Ontinyent, Valencia, España). Las piezas de bacalao presentaron un peso medio de ente 1 y 1.5 kg. Se extrajeron muestras en forma laminar (5 x 3 x 0.5 cm) de la zona del lomo. Posteriormente, las muestras se envolvieron en film plástico y se almacenaron en una cámara de refrigeración ( $4 \pm 0.5$  °C) hasta que fueron procesadas.

Cada una de las experiencias de secado se realizaron con 10 láminas de bacalao previamente desalado. Para ello, las muestras saladas se sumergieron en 2 L de agua mineral (Agua de Cortes; Composición media:  $\text{HCO}_3^-$  250 mg/L, Ca 90 mg/L, Na 7.2 mg/L y residuo seco 261 mg/L) a  $4 \pm 0.5$  °C durante 24 h. El tiempo de desalado se fijó a partir de experiencias preliminares y proporcionó bacalao con un contenido de sal próximo al 2% (kg de sal/kg de bacalao desalado). A continuación se eliminó el agua superficial de las muestras y se envolvieron en film hasta la realización de las experiencias de secado.

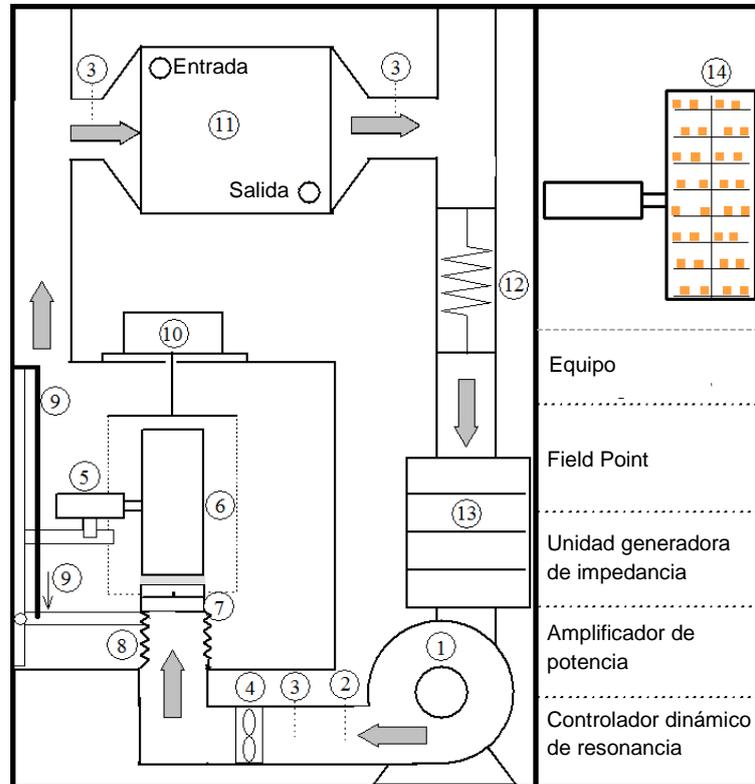
#### **3.2. Determinaciones analíticas: contenido de humedad y NaCl**

La determinación de la humedad de las muestras de bacalao se realizó de acuerdo con el método de la AOAC 950.46 (AOAC, 1997). Para ello, 3 g de muestra triturada se secaron a  $105 \pm 1$  °C hasta alcanzar un peso constante (menos de 24 h). La humedad de la muestra se estimó por diferencia de peso.

Para la determinación del contenido de NaCl, se partió de 0.2-0.5 g de muestra triturada a la que se le añadieron 100 mL de agua destilada. La mezcla se homogenizó (T25, IKA Labortechnik, Alemania) a 9500 r.p.m. durante 5 minutos y se filtró. En el filtrado se determinó la concentración de cloruros (926 L, Ciba Corning, Reino Unido).

### 3.3. Secadero convectivo asistido por ultrasonidos.

Todas las experiencias de secado a baja temperatura se realizaron en un secadero convectivo con recirculación de aire (Figura 1), ya descrito anteriormente (García-Pérez et al., 2012).



**FIGURA 1.** Esquema del secadero convectivo asistido con ultrasonidos (García-Pérez et al., 2012): 1. Soplante; 2. Sensor de temperatura Pt-100; 3. Sensor de temperatura y humedad relativa; 4. Anemómetro; 5. Transductor ultrasónico; 6. Cilindro vibrante; 7. Dispositivo porta muestra; 8. Tubo retráctil; 9. Mecanismo de desplazamiento vertical; 10. Módulo de pesada; 11. Intercambiador de calor; 12. Resistencia eléctrica; 13. Cámara de bandejas desecantes; 14. Detalle de colocación de muestras en árbol portamuestras.

En este sistema, el flujo de aire se controla mediante un algoritmo PID que actúa sobre la frecuencia de alimentación de un soplante. El aire se enfría en un intercambiador de calor de carcasa y tubos por el que circula una solución agua-glicol (45%, v/v) a  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Una resistencia eléctrica colocada posteriormente es la encargada de fijar la temperatura final mediante un algoritmo PID. Un PLC (compact CFP, National Instruments, USA) con módulos RTD, analógicos y digitales de entrada y salida, es el encargado de supervisar y realizar los bucles de control. Por otro lado, la humedad relativa del aire de secado se mantiene en niveles muy bajos mediante una serie de bandejas que contienen sílica gel.

El secadero dispone de un sistema de aplicación de ultrasonidos de alta frecuencia (García-Pérez et al., 2006a). La cámara de secado es un cilindro

(diámetro interno 100 mm, altura 310 mm y 10 mm de espesor) vibrante de aluminio, que permite generar un campo de ultrasonidos de alta frecuencia (21.7 kHz) en el aire. El sistema es capaz de generar un nivel de presión sonora media en el interior de la cámara de secado de 155 dB. El aire circula por el interior del cilindro vibrante donde están colocadas las muestras. Para determinar las cinéticas de secado, las muestras se pesan a tiempos preestablecidos usando un módulo de pesaje industrial conectado al PLC por una interfaz RS-422.

### **3.4. Experiencias de secado**

Se realizaron experiencias de secado (2 m/s y HR < 5%) de bacalao desalado a 3 temperaturas (-10, 0 y 10 °C) con (CUS; 50 W, 21.7 kHz) y sin la aplicación de ultrasonidos (SUS). Las experiencias se prolongaron hasta que las muestras registraron una pérdida de peso del  $65 \pm 5$  %. Los secados se realizaron al menos por triplicado para cada una de las condiciones planteadas.

Para la realización de las experiencias secado, las muestras se distribuyeron de manera aleatoria en el interior de la cámara de secado utilizando un portamuestras diseñado especialmente para este fin (García-Pérez et al., 2006a). En el caso de las experiencias a -10 °C, las muestras se congelaron previamente 72 h a  $-17 \pm 0.5$  °C.

Las muestras, una vez terminadas las experiencias de secado, se envolvieron en film plástico y se envasaron a vacío para su conservación hasta la realización de las medidas de calidad (rehidratación, color y textura).

### **3.5. Experiencias de rehidratación**

La determinación de las cinéticas de rehidratación del bacalao desalado secado se realizaron colocando las muestras deshidratadas ( $20 \pm 5$  g) en una malla e introduciéndolas en un baño con agua destilada en agitación a  $25 \pm 1$  °C. A intervalos de tiempo establecidos, se extrajeron las muestras, se secaron superficialmente y se pesaron en una balanza de precisión (Mettler Toledo XS 204, Suiza). Después, las muestras se volvieron a introducir en el baño y se continuó el proceso de rehidratación hasta alcanzar un peso constante (diferencia entre pesadas inferior a 0.3 g). Todas las experiencias de rehidratación se realizaron por triplicado.

### **3.6. Medida de textura y color**

Se realizaron medidas de textura, tanto en las muestras secadas como rehidratadas. Para ello, se utilizó un texturómetro (TA-XT2 SMS, Reino Unido) equipado con una célula de carga de 25 kg y una sonda de 2 mm de diámetro. Las pruebas consistieron en la compresión/penetración de las láminas de bacalao hasta el 75 % de su espesor. A partir de la fuerza máxima registrada, se obtuvo una medida de la dureza de la misma. Para asegurar la representatividad de los resultados, se realizó un mínimo de 16 repeticiones en cada una de las muestras analizadas.

También se realizaron medidas de color tanto en muestras secadas como rehidratadas. Las coordenadas de color CIE  $L^*a^*b^*$  se determinaron con un espectrofotómetro (CM-2500d, KONICA – MINOLTA, Japón) provisto de un sistema de referencia de iluminante D65, un ángulo de observación  $10^\circ$  y calibrado con un blanco estándar. Las mediciones se realizaron a temperatura ambiente y directamente sobre la muestra. Se obtuvieron, al menos, tres medidas por muestra y se analizaron un mínimo de 3 láminas de bacalao secadas y 3 láminas de bacalao rehidratadas por cada una de las condiciones de secado consideradas.

Para determinar la influencia de la aplicación de US en el secado, se calculó la variación global de color ( $\Delta E^*$ , ecuación 1) tomando como referencia los valores  $L^*a^*b^*$  de las experiencias SUS correspondiente. También se compararon las muestras desaladas con las desaladas secadas y luego rehidratadas. En este caso, la referencia para el cálculo de  $\Delta E^*$  fueron las coordenadas  $L^*a^*b^*$  del bacalao desalado.

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

donde  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  y  $\Delta b^*$  son las diferencias entre las medidas realizadas y las consideradas como referencia

También se calculó el valor del croma,  $c^*$  (ecuación 2) que se asocia a la pureza de color

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

### 3.7. Análisis estadístico

Con el objetivo de evaluar la influencia del método de secado en la cinética de rehidratación, en el color y la textura de las muestras secadas y rehidratadas, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) ( $p < 0.05$ ) y se estimaron los intervalos LSD (Least Significant Difference). Para ello, se utilizó el programa Statgraphics Centurion XVI (Statistical Graphics Corporation, USA).

### 3.8. Modelización

Para describir matemáticamente las cinéticas de secado y de rehidratación se utilizó un modelo difusivo. La ecuación de gobierno correspondiente para una geometría laminar considerando la difusividad efectiva constante se muestra a continuación (ecuación 3):

$$\frac{\partial W_p(x,t)}{\partial t} = D_e \left( \frac{\partial^2 W_p(x,t)}{\partial x^2} \right) \quad (3)$$

donde  $W_p$  es el contenido de humedad local (kg agua/kg materia seca sin sal);  $t$  es el tiempo (s);  $D_e$  la difusividad efectiva ( $m^2/s$ );  $x$ , dirección característica de transporte (m)

Para abordar la resolución de la ecuación 3 se consideró que el contenido inicial de humedad fue homogéneo en toda la muestra, que el volumen permanece constante, tanto durante el secado (no hay contracción) como durante la rehidratación (no hay hinchamiento), la simetría del sólido y que la resistencia externa a la transferencia de agua fue despreciable frente a la resistencia interna. En la ecuación 4 se muestra la solución analítica integrada para todo el volumen de la muestra y expresada en términos de contenido en humedad adimensional,  $\psi(t)$  (Simal et al. 2005).

$$\psi(t) = \frac{W(t) - W_e}{W_0 - W_e} = \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} e^{\left( \frac{D_e (2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2} \right)} \right] \quad (4)$$

donde  $W$  es el contenido de humedad media (kg agua/ kg materia seca sin sal); con subíndice 0 la del estado inicial; y con subíndice e la del equilibrio;  $L$  es el semiespesor de la lámina (m).

El ajuste del modelo, tanto en el caso de las cinéticas de secado como en las de rehidratación, se realizó mediante la resolución de un problema de optimización que consistió en la búsqueda del valor de la difusividad efectiva que minimizó el promedio de la diferencia cuadrática entre los valores experimentales del contenido de humedad media y los calculados con el modelo. La resolución del problema de optimización se realizó mediante la herramienta Solver de la hoja de cálculo Microsoft Excel™ (Microsoft Corporation, Seattle, USA), que aplica el método del Gradiente Reducido Generalizado (GRG).

La bondad de los ajustes se evaluó a partir del cálculo del porcentaje de la varianza explicada (% var. ecuación 5) (Berthouex y Brown, 1994).

$$\%var. = \left[ 1 - \frac{S_{xy}^2}{S_y^2} \right] \cdot 100 \quad (5)$$

dónde:  $S_{xy}$  es la desviación estándar de la estimación;  $S_y$  es la desviación estándar de la muestra.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

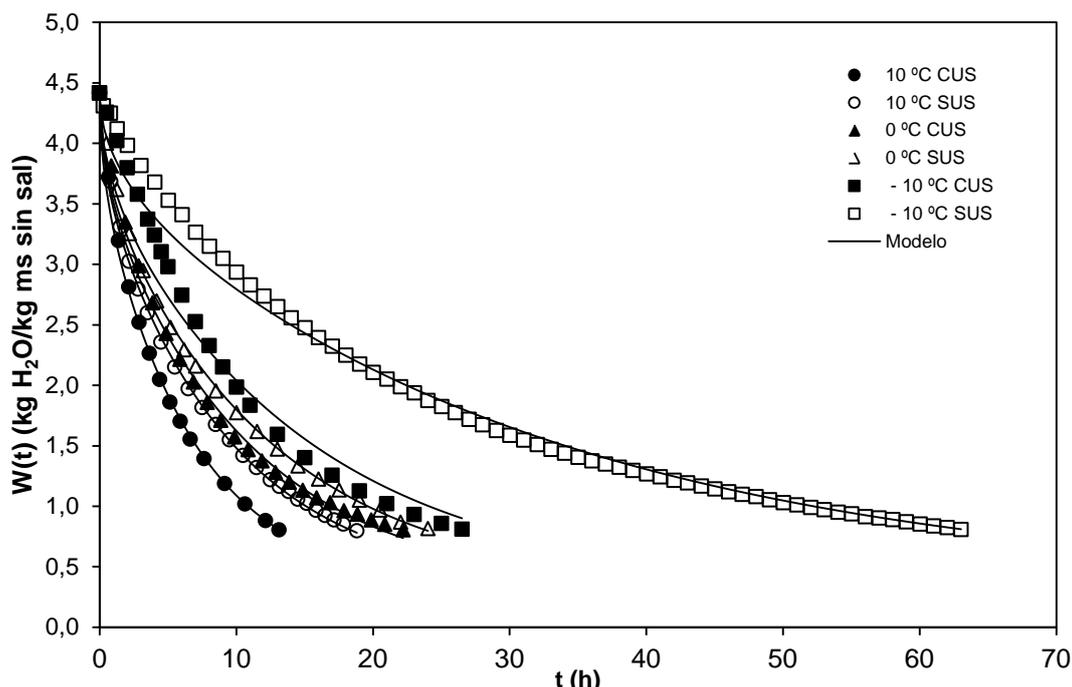
### 4.1 Experiencias de secado y modelización

Las experiencias de secado se realizaron con muestras de bacalao previamente desalado cuyo contenido de humedad y de sal fue de 0.79 kg de agua/kg de bacalao desalado y de 0.023 kg de sal/kg de bacalao desalado, respectivamente. Los resultados obtenidos mostraron que la

velocidad de pérdida de agua fue mayor cuanto mayor fue la temperatura del aire de secado. Así, en las experiencias SUS a 10 °C el tiempo de secado (18 horas) fue un 68.7% menor que el registrado a -10 °C (58 horas) (Figura 2).

Los resultados experimentales también mostraron que la aplicación de US aceleró la cinética de secado (Figura 2) aunque en diferente medida según la temperatura de secado. Así, a -10 °C la reducción del tiempo de secado al aplicar US fue de un 60% mientras que 0 y a 10 °C la reducción fue del 16% y 29% respectivamente. Como se puede observar el efecto de los US fue notablemente mayor en los secados realizados por debajo del punto de congelación (-10 °C). En estudios anteriores García-Pérez et al. (2012) obtuvieron una disminución del tiempo de secado (-14 °C; 2 m/s) al aplicar US del 65 al 70% para zanahoria, manzana y berenjena.

Es de destacar los resultados obtenidos en las experiencias realizadas a 0 °C. Como se ha visto, la aplicación de los US en este caso tuvo una influencia menor que a las otras dos temperaturas ensayadas. Esto podría deberse a que a esa temperatura y dado el bajo contenido en sal, la muestra está próxima al punto de congelación. En esas condiciones, es posible que parte de la energía extra que aportan los US esté contribuyendo a impedir el cambio de fase, y por lo tanto no en producir efectos que pudieran favorecer la difusividad interna del agua.



**FIGURA 2.** Datos experimentales y modelización de las cinéticas de secado de bacalao desalado con (CUS) y sin (SUS) aplicación de ultrasonidos a distintas temperaturas (10, 0 y -10 °C)

Con objeto de cuantificar la influencia de la temperatura de secado y de la aplicación de ultrasonidos, se modelizaron los datos experimentales. Como se puede observar en la Figura 2, el ajuste del modelo resultó

adecuado en el caso de los secados realizados a 0 y 10 °C obteniéndose valores de varianza explicada (%var.) por encima del 99% (Tabla 1). Esto indica que las suposiciones consideradas en el modelo están próximas a las condiciones experimentales.

Sin embargo, el ajuste del modelo a las experiencias a -10 °C y especialmente en las CUS fue menos satisfactorio (%var. de 94,4 % en CUS y 98,5 % en SUS). Por tanto, en este caso, las condiciones experimentales se alejaron de las consideradas por el modelo. Este hecho puede atribuirse en parte a que a -10 °C las muestras se encuentran congeladas y en estas condiciones, otros mecanismos diferentes del difusivo, único mecanismo considerado en la modelización, pueden no ser despreciables. Sin embargo, aunque el ajuste no fue excesivamente satisfactorio, sí que sirvió para obtener una difusividad efectiva de referencia que permitió cuantificar la velocidad del proceso, y permitió la comparación con las otras condiciones ensayadas

Las difusividades efectivas identificadas ( $D_e$ ) se incrementaron con el aumento de temperatura. Así, en las experiencias CUS, al aumentar la temperatura de -10 °C a 10 °C, la  $D_e$  aumentó en un 117% y un 258 % en las experiencias SUS. La menor influencia de los US a temperaturas más altas podría deberse al hecho de que la aplicación de US aporta una energía extra al proceso de secado y ésta es más significativa cuando el nivel energético del sistema es menor, es decir a baja temperatura (Cárcel et al. 2014). En este sentido, García-Pérez et al. (2006b) observaron en cubos de zanahoria que a temperaturas altas, por encima de 60 °C, la influencia de los US dejó de tener un efecto significativo en la velocidad del proceso.

En cuanto a la aplicación de US, para una misma temperatura de secado, el valor de  $D_e$  aumentó significativamente ( $p < 0.05$ ). En las experiencias realizadas a -10 °C (por debajo del punto de congelación) fue donde se obtuvo el mayor incremento (123.5%) en la  $D_e$  al aplicar US (Tabla 1). García-Pérez et al. (2012) obtuvieron un incremento de la  $\Delta D_e$  del orden del 180% cuando aplicaron US durante el secado (-14 °C) de distintos productos vegetales.

**TABLA 1.** Resultados de la modelización de las cinéticas de secado. Difusividad efectiva identificada y porcentaje de varianza explicada (%) por el modelo. %  $\Delta D_e$  indica el incremento de  $D_e$  producido al aplicar US.

T (°C)	CUS		SUS		% $\Delta D_e$
	$D_e$ ( $10^{-11}$ m <sup>2</sup> /s )	% var.	$D_e$ ( $10^{-11}$ m <sup>2</sup> /s )	% var.	
10	10,51 ± 0,33	99,12	7,77 ± 0,62	99,70	35,4
0	6,63 ± 0,09	99,24	5,65 ± 0,35	99,26	17,4
-10	4,84 ± 0,60	94,36	2,17 ± 0,20	98,52	123,5

De acuerdo a la bibliografía previa (Bantle 2011) a -10 °C, el secado se produce por un proceso de liofilización a presión atmosférica, es decir, el agua congelada de la muestra sublima. Esto produce que en la muestra

haya una parte interna congelada, cuyo tamaño disminuye según avanza el secado (García Pérez et al 2012), y una parte externa totalmente deshidratada y muy porosa. La rigidez de esta estructura porosa podría favorecer la absorción de las ondas acústicas en el interior de las muestras y, por tanto, la cantidad de energía que reciben las mismas podría ser mayor, tanto en la parte deshidratada, como en la interfase hielo/gas. Este aporte extra de energía podría favorecer la sublimación y la difusión de las moléculas de agua en estado gas a través de la parte sólida ya deshidratada. La posible apertura de microcanales y el efecto esponja provocado por la propagación de la onda podrían contribuir a facilitar el transporte del gas por el interior de la muestra lo que disminuiría la resistencia interna a la transferencia de materia. Además, los US también podrían reducir el espesor de la capa límite entre el sólido y el aire disminuyendo la resistencia externa. Por otro lado, a baja temperatura, la densidad del aire es mayor, lo que también favorece la transmisión de los US.

En cuanto a las otras dos temperaturas ensayadas, 0 y 10 °C, el proceso de secado consiste en una evaporación a baja temperatura. En estos casos, el mecanismo que domina el proceso es la difusión, como se observa por el buen ajuste del modelo (Tabla 1). En este caso, la interacción de los US con las muestras podría ser diferente. Al no estar congeladas las muestras, éstas carecen de la parte externa porosa, manteniendo su densidad durante el secado, lo que afecta negativamente a la energía transmitida desde el aire al interior. Esto podría suponer una mayor absorción de las ondas acústicas al transmitirse por el interior de la muestra. Así pues, la intensidad del efecto esponja y las microrroturas derivadas de éste, podrían ser de menor cuantía que en el caso de las muestras congeladas y, por tanto, menor el efecto sobre la cinética de secado.

Por tanto, el efecto de los US es diferente a temperaturas de secado por debajo o por encima del punto de congelación. Además, a 0 °C, la baja influencia de los US en la cinética de secado se debió probablemente a la proximidad a la temperatura de cambio de fase.

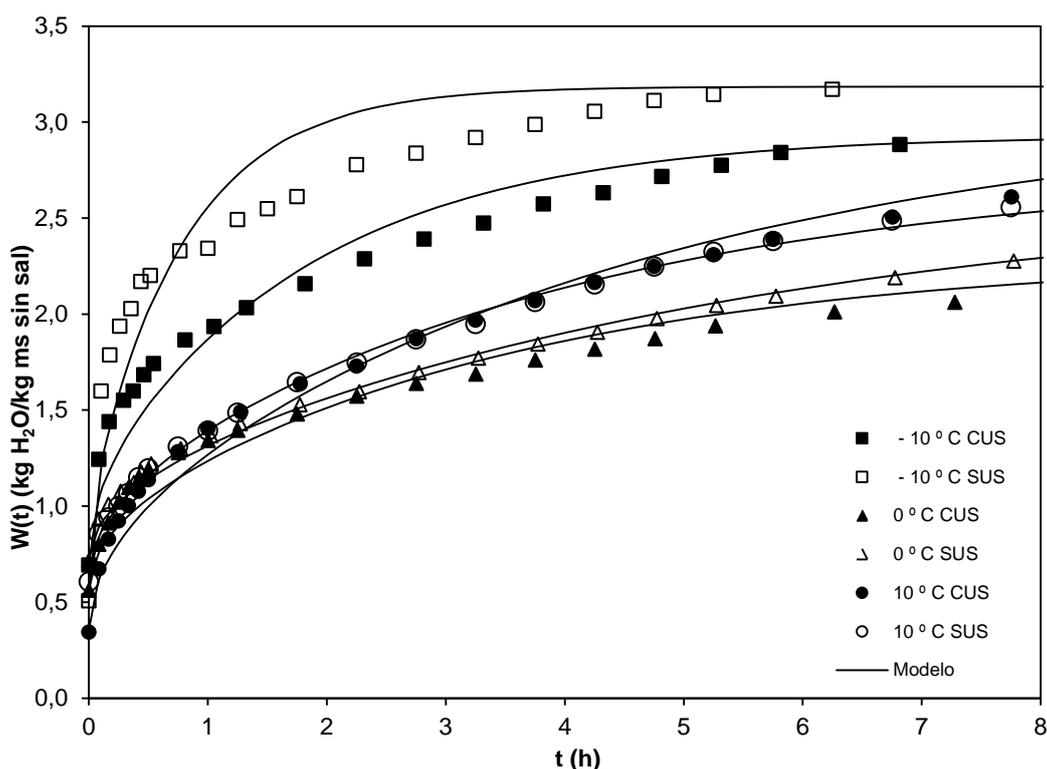
#### **4.2 Rehidratación de las muestras deshidratadas. Modelización**

Las experiencias de rehidratación se realizaron con las muestras obtenidas en las diferentes experiencias de secado. La humedad de las muestras al inicio de las experiencias de rehidratación, aunque no fue exactamente la misma, resultó bastante similar (Tabla 2). Estas pequeñas diferencias se debieron a la dificultad de detener el secado en el mismo nivel de pérdida de peso ( $65 \pm 5\%$ ) debido a la larga duración de las experiencias (de hasta 72 horas). Sin embargo, todas las humedades estuvieron en un rango relativamente estrecho ( $\pm 5\%$ ), lo que contribuye a la representatividad de los resultados obtenidos

**TABLA 2.-** Fracción másica de agua y sal de muestras de bacalao desalado después de las experiencias de secado, (kg de agua ó de sal/kg de producto inicial).

T (°C)	CUS		SUS	
	Xw	Xsal	Xw	Xsal
10	0,24 ± 0,05	0,07 ± 0,03	0,34 ± 0,01	0,05 ± 0,02
0	0,24 ± 0,03	0,08 ± 0,02	0,31 ± 0,02	0,06 ± 0,01
-10	0,31 ± 0,01	0,07 ± 0,01	0,28 ± 0,01	0,09 ± 0,01

En cuanto a los resultados experimentales, la velocidad de rehidratación fue mayor en las muestras secadas a -10 °C que en las secadas a 0 y 10 °C (Figura 3). Así las muestras secadas a -10 °C necesitaron  $8.5 \pm 0.5$  h para alcanzar un peso constante mientras que las muestras secadas a 0 y 10 °C necesitaron  $22 \pm 1$  h.



**FIGURA 3.** Datos experimentales y modelización de cinéticas de rehidratación de las muestras secadas con (CUS) y sin (SUS) ultrasonidos a diferentes temperaturas.

La bibliografía es unánime al reconocer que la liofilización proporciona muestras con una mayor porosidad que los procesos de secado por aire caliente (Krokida y Maroulis, 1997; Bantle, 2011). Esta mayor porosidad puede favorecer la posterior rehidratación de las muestras al facilitar la

entrada de agua al interior de las mismas. En este sentido, García-Pérez et al., (2012) observaron que el secado a -14 °C de zanahoria, manzana y berenjena, convirtió a todos los materiales en productos de alta porosidad con independencia de su estructura inicial.

La aplicación de US durante el secado a -10 °C disminuyó la velocidad de rehidratación (Figura 3). Además, el contenido final de agua de las muestras CUS rehidratadas fue significativamente inferior CUS ( $0.73 \pm 0.01$  kg agua/kg bacalao rehidratado) que la de las muestras SUS ( $0.75 \pm 0.01$  kg agua/kg bacalao rehidratado). En el caso de las muestras secadas a 0 y 10 °C, no se apreció un efecto significativo de la aplicación de US durante el secado sobre la cinética de rehidratación.

La modelización de las cinéticas de rehidratación también se realizó utilizando un modelo difusivo sin resistencia externa. El modelo se ajustó de manera satisfactoria (%var.> 97%) a los datos experimentales en el caso de las muestras secadas a 0 y 10 °C (Tabla 3). En el caso de las muestras secadas a -10 °C, el porcentaje de varianza explicada resultó inferior (86.7%) y se observó una desviación apreciable entre los datos experimentales y calculados. Probablemente, la mayor porosidad del bacalao secado a -10 °C hizo que otros mecanismos, diferentes a la difusión, fueran significativos.

**TABLA 3.** Resultado de la modelización de las cinéticas de rehidratación. Difusividad efectiva identificada y porcentaje de varianza explicado (%var.) por el modelo. Los subíndices (a, b, c) indican grupos homogéneos establecidos a partir de intervalos LSD ( $p < 0.05$ )

T (°C)	CUS		SUS		% $\Delta D_e$
	$D_e$ ( $10^{-10}$ m <sup>2</sup> /s)	% var.	$D_e$ ( $10^{-10}$ m <sup>2</sup> /s)	% var.	
10	2,26 <sub>b,c</sub>	97,5	1,99 <sub>c</sub>	99,1	-
0	2,34 <sub>b,c</sub>	95,5	1,89 <sub>c</sub>	98,3	-
-10	5,60 <sub>b</sub>	94,3	9,93 <sub>a</sub>	86,7	43,6

La difusividad efectiva de rehidratación de las muestras SUS a -10 °C fue un 399% superior ( $p < 0.05$ ) que la identificada en las SUS a las otras dos temperaturas de secado, 0 y 10 °C. Entre estas últimas, 0 y 10 °C, no se observaron diferencias significativas.

En cuanto a la influencia de la aplicación de US durante el secado en la posterior rehidratación, se observó que el mayor efecto se dio a la temperatura de -10 °C. En este caso, la aplicación de US durante el secado provocó una disminución en la difusividad efectiva de rehidratación del 43.6% respecto al secado sin US. También se observó que el contenido de humedad final fue significativamente menor (1.9%) en las muestras CUS. Este hecho se podría atribuir a que la aplicación de ultrasonidos durante el secado podría afectar a la microestructura de la muestra. Así Puig et al. (2012) y Ozuna et al. (2013) observaron cambios en la microestructura de berenjena y bacalao salado, respectivamente, producidos por la aplicación de US durante el secado. En otro estudio Nowacka et al. (2012) observaron

que el pretratamiento con US de alta intensidad influyó sobre la posterior rehidratación de cubos de manzana, y se encontraron cambios en la microestructura final del producto. Por otro lado, los US pueden producir cierta desnaturalización de proteínas (Nowacka et al. 2012), que puede implicar un cambio en las propiedades físicas. Por lo tanto, es posible que la aplicación de US durante el proceso de secado afectara de una forma irreversible a la estructura interna de la muestra y este hecho podría verse reflejado en una mayor resistencia a la entrada y difusión del agua durante la rehidratación.

En cuanto a las muestras secadas a 0 y 10 °C, se observó que hay un ligero incremento en la difusividad efectiva de rehidratación cuando el secado se realizó asistido por US aunque estas diferencias no fueron significativas ( $p < 0.05$ ). Este resultado parece indicar, a estas temperaturas, que la estructura fibrosa del bacalao no se vio afectada significativamente por el tipo de secado. Aunque la aplicación de US podría producir una cierta degradación, por ejemplo mediante la apertura de microcanales en las fibras, este efecto, sin embargo, no sería suficiente para modificar la difusividad efectiva de forma significativa.

#### 4.3 Color

En las muestras de bacalao desalado obtenidas de las experiencias de secado se midieron parámetros de color (CIE  $L^*a^*b^*$ ). A partir de éstos, se calculó la diferencia de color global ( $\Delta E^*$ ) (ecuación 1) entre las muestras CUS y SUS a una misma temperatura de secado, y también se calculó el croma (ecuación 2). En la Tabla 4 y Tabla 5 se muestran los valores obtenidos. El análisis estadístico de los resultados permitió observar la existencia de diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las muestras tanto por efecto de la temperatura como por efecto de la aplicación de US.

**TABLA 4.** Coordenadas de color en el espacio CIE  $L^*a^*b^*$  de muestras secadas a diferentes temperaturas con (CUS) y sin (SUS) aplicación de ultrasonidos.

		-10 °C	0 °C	10 °C
$L^*$	SUS	79,9 ± 4,4	57,9 ± 4,1	54,1 ± 2,3
	CUS	67,0 ± 4,3	55,3 ± 4,2	55,9 ± 5,0
$a^*$	SUS	-1,2 ± 0,4	-1,0 ± 1,3	-0,0 ± 1,2
	CUS	-0,9 ± 0,5	-1,0 ± 0,8	-1,0 ± 1,0
$b^*$	SUS	13,6 ± 3,0	16,1 ± 3,0	16,06 ± 2,9
	CUS	12,6 ± 2,6	15,8 ± 2,6	15,6 ± 3,0

Se observaron diferencias en el color de las muestras secadas a -10 °C con respecto a las secadas a 0 y 10 °C. Estas diferencias se centraron principalmente en el valor de la coordenada L\* (Tabla 4) que fue significativamente superior a -10 °C. En cuanto a los parámetros a\* y b\*, las muestras secadas a -10 °C resultaron algo menos rojizas (menor valor de a\*) y amarillas (menor valor de b\*), si bien estas diferencias no resultaron significativas (p<0.05). Es conocido que el secado genera una coloración amarillenta en el bacalao salado. Lauritzsen et al. (2004a) observaron que la reducción del contenido de agua es suficiente para causar cambios en el color del pescado. Stien et al., (2005) afirmaron que la pérdida de agua reduce la dispersión de la luz y puede causar la pérdida de transparencia, lo que aumenta la luminosidad (valor de L\*). En general, se puede decir que las muestras secadas a temperatura por debajo del punto de congelación fueron más luminosas y más blancas que las secadas a las otras dos temperaturas, 0 y 10 °C

En cuanto a la influencia de la aplicación de US durante el secado sobre el color, se observó que las muestras CUS secadas a de -10 °C mostraron valores de L\* significativamente (p<0.05) inferiores que en las muestras SUS. En cuanto a las otras dos temperaturas ensayadas, 0 y 10 °C, la aplicación de US durante el secado no tuvo un efecto significativo (p<0.05) en el valor de la coordenada L\*.

En relación a las coordenadas a\* y b\*, no se observaron diferencias significativas entre las muestras secadas con y sin US a las diferentes temperaturas ensayadas.

El cálculo de  $\Delta E^*$  permitió evaluar las diferencias globales de color entre muestras secadas con y sin US a una misma temperatura (Tabla 5). Las mayores diferencias de color provocadas por la aplicación de US durante el secado se dieron a -10 °C. Para las otras dos temperaturas de secado las diferencias de color no fueron apreciables ya que el ojo humano no detecta diferencias con valores de  $\Delta E^*$  inferiores a 2 (Francis y Clydesdale, 1975).

**TABLA 5.** Diferencia global de color ( $\Delta E^*$ ) entre muestras CUS y SUS secadas a una misma temperatura y croma.

		-10 °C	0 °C	10 °C
$\Delta E^*$		12,9	2,6	2,1
<b>Croma</b>	<b>SUS</b>	13,6	16,1	16,1
	<b>CUS</b>	12,6	15,8	15,8

Por último, se observó que las muestras secadas a -10 °C presentaron menor pureza de color (croma) que las obtenidas a temperaturas superiores (Tabla 5). Entre estas últimas no se observaron diferencias a pesar de que el tiempo de proceso sí que fue diferente. Al aplicar US durante el secado, el valor del croma disminuyó en las tres temperaturas ensayadas.

La medida de color también se realizó en las muestras de bacalao desalado deshidratadas y luego rehidratadas (Tabla 6). En este caso, no se observaron diferencias significativas (p<0.05) entre las coordenadas de color

(L\*a\*b\*) de las distintas muestras. Se compararon los valores de las coordenadas CIE L\*a\*b\* obtenidos en las muestras rehidratadas con los medidos en muestras de bacalao desaladas antes de realizar la operación de secado. En este último caso, los valores obtenidos fueron  $L^* = 63.67 \pm 1.98$ ,  $a^* = -3.85 \pm 0.52$  y  $b^* = 0.95 \pm 0.78$ . Como se puede observar, en todos los casos el valor de la coordenada L\* fue mayor en las muestras secadas y rehidratadas que en las muestras de bacalao desalado. Por tanto, las muestras de bacalao desalado, secado y rehidratado resultaron más luminosas. Por otro lado, el valor de la coordenada b\* resultó también mayor lo que indica un amarilleamiento de las muestras durante el proceso de secado y rehidratación. Brás y Costa (2010) midieron un aumento de la luminosidad (L\*) y el amarillamiento (b\*) de bacalao durante el secado. Esta tendencia resultó inversamente proporcional al contenido de agua. Este efecto se mantuvo en las muestras después de su rehidratación. Es posible que durante el secado se produzca un efecto irreversible sobre los compuestos responsables del color y dicho efecto sea independiente de la temperatura de secado.

**TABLA 6.** Coordenadas de color en el espacio CIE L\*a\*b\* para muestras de bacalao desalado secadas a diferentes temperaturas y rehidratadas.

		<b>-10 °C</b>	<b>0 °C</b>	<b>10 °C</b>
<b>L*</b>	<b>SUS</b>	71,1 ± 2,2	71,9 ± 2,7	71,3 ± 3,6
	<b>CUS</b>	72,2 ± 3,0	71,4 ± 2,4	71,8 ± 3,4
<b>a*</b>	<b>SUS</b>	- 3,7 + 0,7	- 3,5 + 0,8	- 3,5 + 1,1
	<b>CUS</b>	- 3,7 + 0,5	- 3,5 + 0,7	- 3,6 + 1,2
<b>b*</b>	<b>SUS</b>	5,5 + 3,1	9,2 + 5,1	6,8 + 4,7
	<b>CUS</b>	6,0 + 4,4	7,5 + 4,3	8,1 + 4,0

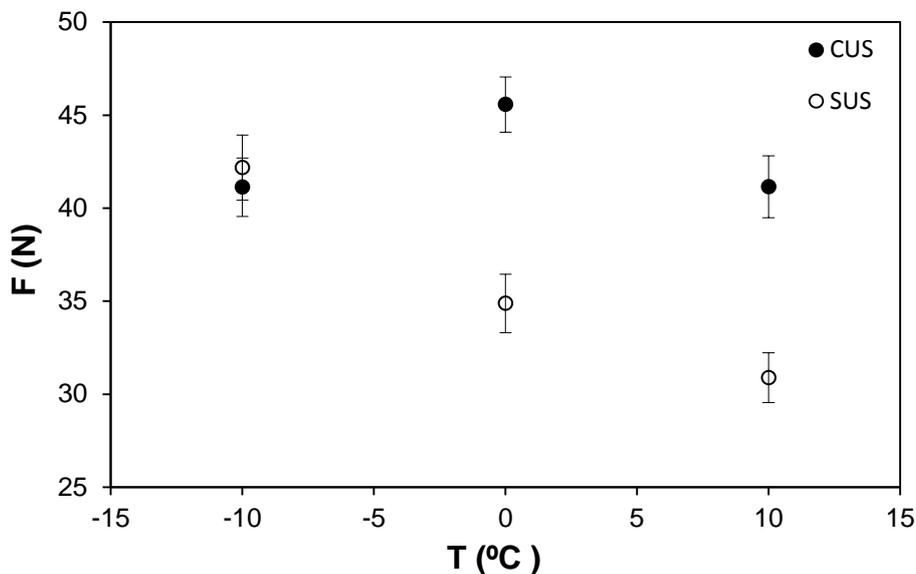
Por último, se evaluó la diferencia global de color entre muestras de bacalao desalado secadas y rehidratadas y la muestra de bacalao desalado (Tabla 7). Se observó que la menor diferencia de color se obtuvo en las muestras secas a -10 °C. Esta diferencia aumentó con la aplicación de US. Así pues, se podría concluir que el proceso de secado que tuvo menor efecto sobre el color del bacalao rehidratado fue a -10 °C sin aplicar US.

**TABLA 7.** Diferencia global de color ( $\Delta E^*$ ) de bacalao desalado y muestras rehidratadas para cada experiencia de secado.

		<b>-10 °C</b>	<b>0 °C</b>	<b>10 °C</b>
<b><math>\Delta E^*</math></b>	<b>SUS</b>	8,8	11,7	9,6
	<b>CUS</b>	9,9	10,2	10,9

#### 4.4 Textura

El efecto de la aplicación de US y la temperatura durante el secado en la estructura interna de las muestras de bacalao desalado se estudió a partir de la determinación de la fuerza máxima mediante ensayos de punción/compresión. Los resultados mostraron que la dureza de las muestras secadas y rehidratadas dependió de ambos factores (Figura 4 y Figura 5). Así, en las muestras secadas SUS, se observaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las tres temperaturas de secado, siendo la dureza menor cuanto mayor fue la temperatura de secado.



**FIGURA 4.** Valores medios de fuerza máxima e intervalos LSD ( $p < 0.05$ ) de muestras de bacalao secado a distintas temperaturas con (CUS) y sin (SUS) la aplicación de US.

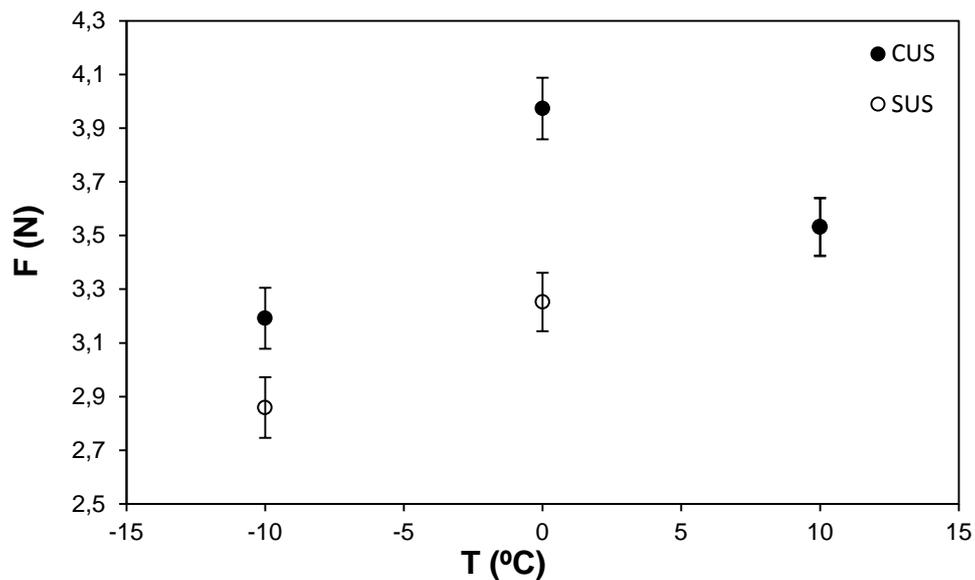
La aplicación de los US a 0 y 10 °C provocó un endurecimiento del bacalao secado. Esto se podría atribuir a que las sucesivas compresión-descompresiones del material producidas por los US podrían afectar a las proteínas (Nowacka et al., 2012). En el caso de las muestras secadas a -10 °C con y sin US, ya que presentaron niveles de dureza similares, se podría afirmar que la congelación provocó cambios en la estructura de la muestra que podrían enmascarar el efecto de los US.

También se realizaron ensayos de textura en las muestras secadas y después rehidratadas (Figura 5). En este caso, se observaron diferencias significativas tanto por el efecto de la temperatura como por la aplicación o no de US durante los procesos de secado. En primer lugar, se observó que las muestras de secadas -10 °C, una vez rehidratadas, fueron las que presentaron valores más bajos de dureza la cual aumentó significativamente ( $p < 0.05$ ) con la temperatura de secado.

En relación con la aplicación de US, se observó que las muestras secadas a -10 °C, presentaron mayor dureza que las SUS. Este

endurecimiento también se observó en las muestras secadas a 0 °C. Sin embargo en las muestras secadas a 10 °C no se observó diferencias entre CUS y SUS. Este hecho se podría atribuir a que a esa temperatura no hubo efectos irreversibles sobre la estructura interna de la muestra al aplicar US durante el secado posiblemente debido a que el tiempo de proceso fue más corto.

Al comparar los valores obtenidos de fuerza máxima con el valor del bacalao desalado, y antes del secado ( $1.55 \pm 0.53$  N), se observa que el proceso que menos influyó en la dureza fue el secado a -10 °C sin la aplicación de US.



**FIGURA 5.** Valores medios de fuerza máxima e intervalos LSD ( $p < 0.05$ ) de las muestras de bacalao desalado secadas a distintas temperaturas con (CUS) y sin (SUS) la aplicación de US y rehidratadas.

Para intentar relacionar los resultados de la textura con las cinéticas de rehidratación hay que volver a distinguir entre las muestras que fueron congeladas previamente y las que no. El secado a -10 °C produjo muestras que rehidrataron más rápido y que después de rehidratar quedaron con características de textura y de color más próximas al producto inicial, el bacalao desalado. Los secados a temperaturas superiores produjeron ciertos cambios irreversibles que generaron muestras que rehidrataron más lentamente y presentaron una textura después de rehidratar más dura que el bacalao desalado. En cuanto a la aplicación de US, aceleraron el proceso de secado, especialmente en las condiciones que es más lento, -10 °C. Sin embargo, los US podrían producir ciertos efectos en el producto que afectaron al color, dando muestras menos luminosas, y a la textura, endureciendo parcialmente el producto. Estos cambios de textura que ocurren por la aplicación de ultrasonidos podrían estar determinados con la desnaturalización de las proteínas (Lee y Feng, 2011), lo que conlleva un endurecimiento de las mismas.

## 5. CONCLUSIONES

La aplicación de US aceleró significativamente el secado del bacalao desalado, especialmente a la menor temperatura ensayada, -10 °C. El secado afectó a la rehidratación y a las características de calidad: color y textura. Las condiciones que proporcionan un producto de mayor calidad fueron el secado convencional a -10 °C. Las muestras secadas con ultrasonidos a esta temperatura presentaron ligeros cambios en capacidad de rehidratación, color y textura, inferiores en todos los casos a las presentadas por las muestras secadas a temperatura superior. Por tanto, se puede concluir que la aplicación de US a temperaturas por debajo del punto de congelación supone una mejora del proceso importante que afecta mínimamente al color y a la textura de las muestras rehidratadas.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Agradecer a todos mis compañeros del grupo ASPA su apoyo durante la realización de este trabajo.

A mis directores Juan Cárcel y José Vicente García por todos sus consejos y por su paciencia y dedicación.

A mi familia por todo su apoyo continuo, constante e incondicional.

Al Ministerio de Economía y Competitividad y FEDER por su financiación para la realización de este trabajo a través del proyecto DPI2012-37466-C03-03.

## 7. REFERENCIAS

- A.O.A.C. 1997. Official method of analysis of the Association of Official Analytical Chemists international. 16th edition, 3rd revision, March.
- Bantle, M. 2011. Study of High Intensity, Airborne Ultrasound in Atmospheric Freeze Drying. Tesis Doctoral. Norwegian University of Science and Technology.
- Berthouex, P.M.; Brown, L.C. 1994. Statistics for environmental engineers. Lewis Publishers Inc., New York, USA.
- Brás, A.; Costa, R. 2010. Influence of brine salting prior to pickle salting in the manufacturing of various salted-dried fish species. *Journal of Food Engineering*, **100(3)**:490-495.
- Chemat, F.; Khan, M.K. 2011. Applications of ultrasound in food technology: processing, preservation and extraction. *Ultrasonics sonochemistry*, **18(4)**: 813-835.
- 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(2)**: 200-207.
- Cárcel, J.A.; García-Pérez, J.V.; Riera, E., Rosselló, C.; Mulet, A. 2014, Drying Assisted by Power Ultrasound. En: Tsotsas, E., Mujundar, A.S. (eds). *Modern Dry Technology. Vol.5 Process Intensification*. Wiley-VCH, In Press
- De la Fuente, S.; Riera, E.; Acosta, V.M.; Blanco, A.; Gallego-Juárez, J.A. 2006 Food drying process by power ultrasound. *Ultrasonics*, **44**: e523–e527
- Francis, F.J.; Clydesdale, F.M. 1975. Food colorimetry: Theory and applications. AVI Publishing Co. Inc..

- Gallego-Juárez, J.A.; Riera, E.; De la Fuente Blanco, S.; Rodríguez-Corral, G.; Acosta-Aparicio, V.M.; Blanco, A. 2007. Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetables: processes and devices. *Drying Technology*, **25(11)**: 1893-1901.
- García-Pérez, J.V.; Cárcel, J.A.; De la Fuente, S.; Riera, E. 2006a Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed. Parametric study. *Ultrasonics*, **44**: e539–e543.
- García-Pérez, J.V.; Rosselló, C.; Cárcel, J.A.; De la Fuente, S.; Mulet, A. 2006b. Effect of air temperature on convective drying assisted by high power ultrasound. *Defect and Diffusion Forum*, **(258-260)**: 563-574
- García-Pérez, J.V.; Cárcel, J.A.; Riera, E.; Mulet, A. 2009. Influence of the applied acoustic energy on the drying of carrots and lemon peel. *Drying Technology*, **27(2)**: 281-287.
- García-Pérez, J.V.; Carcel, J.A.; Riera, E., Rosselló, C.; Mulet, A. 2012. Intensification of low-temperature drying by using ultrasound. *Drying Technology*, **30(11-12)**: 1199-1208.
- Krokida, M.K.; Maroulis, Z.B. 1997. Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technology*, **15(10)**: 2441-2458
- Lauritzen K.; Akse L.; Gundersen B.; Olsen RL. 2004a. Effects of calcium, magnesium and pH during salt-curing of cod (*Gadus morhua L.*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **84(7)**: 683-692.
- Lee, H.; Feng, H. 2011. Effect of Power Ultrasound on Food Quality. In *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*. Springer New York, 559-582
- Mulet, A.; Carcel, J.A.; Sanjuan, N.; Bon, J. 2003. New food drying technologies-Use of ultrasound. *Food Science and Technology International*, **9(3)**: 215-221.
- Nowacka, M.; Wiktor, A.; Śledź, M.; Jurek, N.; Witrowa-Rajchert, D. 2012. Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. *Journal of Food Engineering* **(113)**: 427-433
- Oliveira, H; Pedro, S.; Nunes, M.L.; Costa, R., Vaz-Pires, P. 2012 Processing of salted cod (*Gadus spp.*): A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, **11(6)**: 546-564.
- Ozuna, C 2013. Estudio de la Aplicación de ultrasonidos de alta intensidad en sistemas sólido-líquido y sólido-gas. Influencia en la cinética de transporte de materia y en la estructura de los productos. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Puig, A.; Pérez-Munuera, I.; Carcel, 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(4)**, 624-632.
- Simal, S.; Femenia, A.; Garau, M. C.; Rosselló, C. 2005. Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of food Engineering*, **66(3)**: 323-328.
- Stien, L.H.; Hirmas, E.; Bjørnevik, M.; Karlsen, Ø.; Nortvedt, R.; Røra A.M.B.; Sunde, E., Kiessling, A. 2005. The effects of stress and storage temperature on the color and texture of pre-rigor filleted farmed cod (*Gadus morhua L.*). *Aquaculture Research* **36(12)**:1197–1206.
- Soria, A.C., Villamiel, M. 2010. Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. *Trends in Food Science and Technology*, **21(7)**: 323-331.