

INFLUENCIA DE LA APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS DE POTENCIA EN LAS CINÉTICAS DE SECADO, EL CONTENIDO POLIFENÓLICO Y LA CAPACIDAD ANTIOXIDANTE DE MANZANA (CV. GRANNY SMITH)

J.V. Santacatalina¹, O. Rodríguez², E. Riera³, S. Simal², J.V. Garcia-Perez¹

¹Grupo ASPA, Departamento de Tecnología de Alimentos, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, Valencia, E46022, España. E-mail: jogarpe4@tal.upv.es

²Grupo de Ingeniería de Alimentos, Departamento de Química, Universitat de les Illes Balears. Crta. Valldemosa, km. 7.5, E07122, Palma de Mallorca, España.

³Grupo de Ultrasonidos de Potencia, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Serrano 144, E28006, Madrid, España.

Resumen

El principal objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de ultrasonidos de potencia en las cinéticas de secado por aire caliente de manzana y en el contenido polifenólico y la capacidad antioxidante del producto seco. Para alcanzar este objetivo, se deshidrataron cubos (10 mm de arista) de manzana (*Malus domestica* cv. Granny Smith) en un secadero convectivo, a velocidad de aire constante (1 m/s), diferentes temperaturas (30, 50 y 70°C), sin (0 W) y con la aplicación de ultrasonidos de potencia (45 W y 75 W). Tanto las altas temperaturas como la aplicación de ultrasonidos de potencia produjeron una significativa ($p < 0.05$) reducción del tiempo de secado y aumentaron la difusividad efectiva. De manera general, se observó que la capacidad antioxidante y el contenido polifenólico de las muestras de manzana se conservaron mejor cuando se disminuyó el tiempo de secado. Por tanto, la aplicación de ultrasonidos se puede considerar una tecnología adecuada con la que se intensifica el secado convectivo de manzana y se conserva la capacidad antioxidante.

Palabras-clave: ultrasonidos, deshidratación, difusión, antioxidantes, polifenoles.

Abstract

The main objective of this study was to evaluate the effect of power ultrasound application on hot air drying kinetics of apple and polyphenol content and the antioxidant capacity of the dried product. For this purpose, apple (*Malus domestica* cv. Granny Smith) cubes (10 mm side) were dried in a convective drier, at constant air velocity (1 m/s), different temperatures (30, 50 and 70°C), without (0 W) and with the application of power ultrasound (45 W and 75 W). Both high temperatures and power ultrasound application led to a significant ($p < 0.05$) reduction of drying time and increased the effective moisture diffusivity. In overall terms, the antioxidant capacity and polyphenol content of apple samples was better preserved when the drying time was shortened. Therefore, ultrasonic application could be considered an adequate technology with which to intensify convective drying of apple preserving antioxidant capacity.

Keywords: ultrasound, dehydration, diffusion, antioxidant, polyphenol.

PACS no. 43.35.Zc

1 Introducción

El secado es un método clásico para conservar alimentos que incrementa la estabilidad de los mismos porque reduce su actividad de agua, limitando así la actividad microbiológica y los cambios físicos y químicos que se producen durante el almacenamiento [1]. Mediante el secado se consigue prolongar la vida útil de los alimentos, consiguiendo además reducir el peso para su transporte y las necesidades de espacio para su almacenamiento [2]. Sin embargo, el secado produce una pérdida de calidad en el producto debido a que induce cierto colapso estructural y cambios bioquímicos. Así, en el secado por aire caliente, la pérdida de agua y el calentamiento producen estrés en la estructura celular del alimento provocando cambios en su microestructura (por ejemplo la formación de poros) y el encogimiento de las muestras. Además, puede inducir la degradación de los componentes termolábiles de los alimentos como los polifenoles o los antioxidantes. Obviamente, la degradación de la calidad del alimento depende de la técnica de secado utilizada y de las condiciones de secado (tiempo, temperatura) empleadas [3]. El secado por aire caliente es una de las tecnologías de secado más utilizadas en la industria alimentaria porque es una operación sencilla y requiere inversiones iniciales relativamente bajas. Con esta técnica se obtienen productos deshidratados bastante homogéneos y con una larga vida útil. El aumento de la temperatura del aire constituye la alternativa tradicional de incrementar la velocidad de secado y disminuir los tiempos de proceso, sin embargo esta estrategia puede afectar negativamente a la calidad del producto final debido a las altas temperaturas utilizadas.

Los ultrasonidos de potencia se han aplicado recientemente en el secado por aire caliente consiguiendo la reducción del tiempo de procesado y por tanto, el consumo energético de la operación. El potencial de la aplicación de ultrasonidos de potencia para mejorar el fenómeno de la transferencia de materia durante el secado de diferentes frutas y verduras se ha observado en anteriores trabajos [4, 5]. La energía mecánica que introducen los ultrasonidos en el medio contribuye a disminuir tanto la resistencia externa a la transferencia de materia como la interna. Entre otras variables, se ha observado que la influencia de los ultrasonidos es más importante a temperaturas moderadas ($<40^{\circ}\text{C}$) que a las más elevadas ($>70^{\circ}\text{C}$) [6]. Por tanto, el secado por aire caliente asistido con ultrasonidos puede ser una alternativa interesante, especialmente para los productos con componentes termolábiles debido a que se pueden secar a temperaturas más bajas acortando el tiempo de secado respecto al secado convencional.

El secado es un proceso complejo en el que se produce una transferencia simultánea de materia y de energía, acompañada de cambios físicos y estructurales en el producto. La modelización constituye una herramienta necesaria para analizar estos procesos y la influencia de las condiciones de operación [7]. Los modelos de secado se formulan teniendo en cuenta una serie de simplificaciones de la realidad. La más común es considerar que la transferencia de materia dentro del alimento se produce únicamente por los gradientes de humedad, lo que se conoce como mecanismo difusivo [8]. Así, la modelización de las cinéticas de secado permite obtener parámetros como la difusividad efectiva del producto, parámetro esencial para abordar la optimización del proceso de secado [9].

La manzana es una de las frutas más consumidas a nivel mundial. La variedad Granny Smith se encuentra entre las más cultivadas debido a que presenta un amplio periodo de cultivo en las zonas de clima templado. Por otra parte, el secado es un método de conservación frecuentemente utilizado para la manzana, debido a que la manzana deshidratada es un componente importante en numerosos productos como snacks, cereales de desayuno y alimentos funcionales entre otros [10]. Una de las características beneficiosas de la manzana para la salud humana es su actividad antioxidante, la que se debe fundamentalmente a su contenido en fenoles y flavonoides [11]. Sin embargo, se ha visto que el procesamiento de manzanas, ya sea para transformarlas en zumo o deshidratarlas, ha causado una significativa reducción tanto en el contenido fenólico, como en su actividad antioxidante [12, 13]. Por lo tanto, resulta interesante evaluar técnicas de secado que eviten la degradación de dichos componentes. Así, el principal objetivo del presente trabajo fue comparar el efecto de la temperatura y

de la aplicación de ultrasonidos de potencia en las cinéticas de secado por aire caliente de manzana y en el contenido polifenólico y la capacidad antioxidante del producto seco.

2 Materiales y métodos

2.1 Materia prima

Se obtuvieron muestras de geometría cúbica (10 mm de arista) de manzana (*Malus domestica* cv. Granny Smith) utilizando un utensilio de corte doméstico. Los cubos se procesaron inmediatamente después de cortarlos. El contenido de humedad inicial de las muestras se determinó por diferencia de peso, colocando las muestras en una estufa a 70°C y 200 mmHg hasta que alcanzaron un peso constante [14].

2.2 Experiencias de secado

La determinación de las cinéticas de secado por aire caliente se llevó a cabo en un secadero convectivo a escala de laboratorio, ya descrito anteriormente [15]. Su principal novedad radica en su cámara de secado, que consiste en un cilindro vibrante de aluminio (diámetro interno 100 mm, altura 310 mm y espesor 10 mm) activado por un transductor piezoeléctrico (21.8 kHz). El sistema ultrasónico es capaz de generar un campo ultrasónico de alta intensidad en el medio con una presión sonora media de 154.3 dB. El secadero funciona de forma completamente automática. La temperatura de secado y la velocidad del aire se controlaron mediante un algoritmo PID y las muestras se pesaron a tiempos predefinidos mediante la combinación de dos sistemas neumáticos y un PLC (CQM41, Omron, Japón). Se realizaron experiencias de secado a velocidad de aire constante (1 m/s), diferentes temperaturas (30, 50 y 70°C), con (45 y 75 W) y sin (0 W) aplicación de ultrasonidos de potencia. Las experiencias se realizaron, al menos, por triplicado y se extendieron hasta que las muestras perdieron el 80% de su peso inicial.

2.3 Modelización de las cinéticas de secado

Para describir matemáticamente las cinéticas de secado por aire caliente de los cubos de manzana con y sin aplicación de ultrasonidos se utilizó un modelo difusivo. La ecuación diferencial de difusión se obtiene combinando la ley de Fick y el balance microscópico de materia. La Ecuación 1 muestra dicha expresión para una geometría cúbica, considerando la difusividad efectiva constante y la homogeneidad e isotropía del sólido.

$$\frac{\partial W_p(x,y,z,t)}{\partial t} = D_e \left(\frac{\partial^2 W_p(x,y,z,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_p(x,y,z,t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_p(x,y,z,t)}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

donde W_p es el contenido de humedad local (kg H₂O /kg s.s.); t el tiempo (s); D_e la difusividad efectiva (m²/s); x , y , z las coordenadas características (m).

Para abordar la resolución de la Ecuación 1 se necesitan una serie de hipótesis, condiciones iniciales y de contorno. En este caso se consideró:

- la simetría del sólido.
- el contenido inicial de humedad y la temperatura homogéneos en toda la muestra.
- el tamaño de la muestra constante durante el secado.

- la resistencia externa a la transferencia de agua despreciable frente a la resistencia interna. Por tanto, la superficie de la muestra se encuentra en equilibrio con el aire durante el tiempo de secado.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, la solución analítica a la ecuación de difusión se expresa, en términos de contenido de humedad media, en la Ecuación 2 [16]

$$W(t) = W_e + (W_e - W_0) \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} e^{\left(-\frac{D_e (2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2} \right)} \right]^3 \quad (2)$$

donde W es el contenido de humedad media (kg H₂O/kg s.s.); L el semiespesor del cubo (m); el subíndice 0 corresponde al estado inicial; subíndice e corresponde al estado de equilibrio.

2.4 Identificación paramétrica

En la modelización de las cinéticas de secado, la difusividad efectiva se identificó ajustando el modelo difusivo a los datos experimentales. Para ello, se consideró como función objetivo a ser minimizada la suma de la diferencia cuadrática entre los valores experimentales del contenido de humedad media y los calculados con el modelo. La identificación se llevó a cabo mediante el método de optimización del Gradiente Reducido Generalizado (GRG), disponible en la hoja de cálculo Microsoft ExcelTM (Microsoft Corporation, Seattle, USA).

La bondad del ajuste se determinó a partir del porcentaje de varianza explicada (%VAR, Ecuación 3) [17].

$$\%VAR = \left[1 - \frac{S_{xy}^2}{S_y^2} \right] \times 100 \quad (3)$$

donde S_{xy} y S_y son la desviación estándar de la estimación y de la muestra, respectivamente.

2.5 Reactivos químicos

En la determinación de la capacidad antioxidante y el contenido de polifenoles totales se emplearon los siguientes reactivos: ABTS (ácido 2,2'-azinobis-(3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico) *Applichem*, TPTZ (2,4,6-tri(2-piridil)-s-triazina) y Trolox 97% *Acros Organics*; DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil) *Fluka*; neocuprina *Sigma*; cloruro de cobre (II) y ácido gálico *Scharlab*; Folin-Ciocalteu, etanol y metanol *Panreac*. Todos los reactivos empleados fueron de grado analítico.

2.6 Determinación de los polifenoles totales y la actividad antioxidante

Se midió el contenido de polifenoles totales y la capacidad antioxidante tanto en manzana fresca como deshidratada, para lo cual se prepararon extracto metanólicos de acuerdo a la metodología propuesta por Heredia y Cisneros-Zevallos [18] con algunas modificaciones. Muestras frescas (0.859 kg H₂O/kg s.s) y deshidratadas (0.267 kg H₂O/kg s.s) fueron pesadas (1.0 g ± 0.05) y sumergidas en 20 mL de metanol. La mezcla fue triturada usando un dispersor digital (Ultra-Turrax® T25, Ika) a 1300 rpm durante 1 min a 4°C. La solución homogenizada fue refrigerada durante 12 horas. Posteriormente, fue centrifugada a 4000 rpm por 10 min, y luego filtrada. El extracto metanólico fue almacenado a 4°C hasta su análisis. Para la determinación de los polifenoles totales se empleo el método de Folin Ciocalteu, mientras que para la determinación de la capacidad antioxidante se emplearon los métodos ABTS, FRAP, CUPRAC y DPPH. En todos los casos lecturas de absorbancia se llevaron a cabo en un

espectrofotómetro multiplaca UV/Vis (Multiskan® Spectrum, Thermo Scientific) a 25°C. La Tabla 1 resume los métodos de análisis.

Tabla 1. Métodos de análisis de polifenoles totales y capacidad antioxidante

Método	Reactivos	λ (nm)	Referencia
ABTS	Radical ABTS 7 mM K ₂ S ₂ O ₈ 2.45mM	734	Floegel et al [19]
FRAP	TPTZ 0.01M FeCl ₃ *6H ₂ O 0.02M Buffer acetato (pH 3.6)	593	Benzei y Strain [20]
CUPRAC	CuCl ₂ *2H ₂ O 10 mM Neocuprina 7.5 mM NH ₄ Ac Buffer 1.0 M	450	Karaman et al [21]
DPPH	DPPH 0.2 mM:	517	Lo Scalzo et al. [22]
Folin Ciocalteu	Folin Ciocalteu	745	Carbone et al. [23]
Ciocalteu	Na ₂ CO ₃ 7.5%		

Los resultados obtenidos fueron expresados como mg de ácido gálico (A.G)/g s.s para el contenido de polifenoles totales y mg Trolox/ g s.s para la actividad antioxidante a partir de curvas de calibrado de los componentes de referencia para todo cada método ensayado. Para cada experiencia de secado se conservó una muestra de manzana fresca que se utilizó como control para su comparación con la muestra deshidratada. Este procedimiento se realizó por triplicado. De cada muestra se obtuvieron 2 extractos metanólicos y para cada extracto se realizaron 6 repeticiones.

2.7 Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) ($p < 0.05$) utilizando el programa estadístico Statgraphics Plus 5.1. (Statistical Graphics Corp., Warrenton, USA) con el objetivo de evaluar el efecto de la temperatura y la potencia ultrasónica aplicada en la difusividad efectiva, el contenido polifenólico y la capacidad antioxidante. Las medias fueron comparadas por medio de un test de Tukey ($p < 0.05$).

3 Resultados y discusión

3.1 Experiencias de secado

En la Figura 1 se muestran las cinéticas de secado de manzana (30°C, Figura 1A; 50°C, Figura 1B y 70°C, Figura 1C) con aplicación de ultrasonidos de potencia (45 y 75 W, 21.8 kHz) y sin aplicación de ultrasonidos (0 W). Se observó un evidente efecto de la temperatura en la velocidad de secado, de manera que las cinéticas fueron más rápidas cuanto mayor fue la temperatura de secado. Por ejemplo, el tiempo de secado se redujo de 33300 s (9.25 h) en las cinéticas a 30°C a 6840 s (1.90 h) cuando la temperatura fue de 70°C. En la Figura 1 también se observa el efecto de la aplicación de ultrasonidos de potencia en las cinéticas de secado, especialmente a las temperaturas más bajas (30 y 50°C). La aplicación de ultrasonidos redujo los tiempos de secado y esta reducción fue mayor cuanto mayor fue la potencia aplicada. Por ejemplo, en las cinéticas a 30°C el tiempo de secado disminuyó un 32.7% y un 53.8% cuando se aplicaron 45 W y 75 W, respectivamente. A medida que se incrementó la temperatura de secado el efecto de los ultrasonidos fue menor y las cinéticas de secado fueron similares al aplicar diferentes potencias, como se observa en las experiencias realizadas a 70°C (Figura 1C).

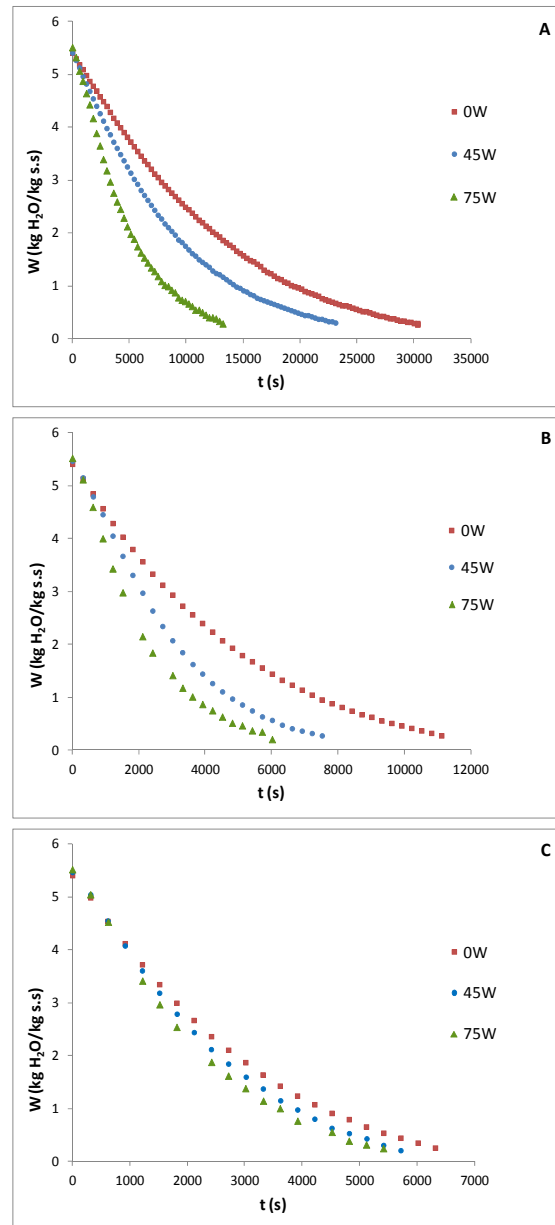


Figura 1 – Cinéticas de secado de manzana sin (0 W) y con (45 W y 75 W) aplicación de ultrasonidos de potencia a tres temperaturas de secado (A) 30°C, (B) 50°C, (C) 70°C.

3.2 Modelización de las cinéticas de secado

Los resultados de la modelización de las cinéticas de secado de manzana se muestran en la Tabla 2. Los valores de difusividad efectiva identificados con el modelo difusivo propuesto aumentaron significativamente ($p < 0.05$) a medida que se incrementó la potencia aplicada. El incremento de la difusividad efectiva por la aplicación de ultrasonidos fue mucho mayor a 30°C (52.7 y 106.1% para 45 y 75 W, respectivamente) que a 70°C (19.2 y 31.4% para 45 y 75 W, respectivamente). La bibliografía previa apunta a que la mejora de la D_e por la aplicación de ultrasonidos está relacionada con los efectos mecánicos que provocan en el material [24]. Los ultrasonidos de potencia generan

compresiones y expansiones en el producto [25], efecto que contribuye a la salida del agua hacia la superficie. La D_e también aumentó significativamente ($p < 0.05$) a medida que se incrementó la temperatura de secado, así aumentó de 1.68 a 6.03 m^2/s cuando la temperatura pasó de 30 a 70°C.

Tabla 2 – Resultados de la modelización de las cinéticas de secado de manzana sin (0 W) y con (45 W y 75 W) aplicación de ultrasonidos de potencia.

		30°C	50°C	70°C
0 W	$D_e (10^{-10} m^2/s)$	1.68±0.12	4.03±0.09	6.03±0.19
	VAR (%)	87.5	88.4	86.1
45 W	$D_e (10^{-10} m^2/s)$	2.57±0.37	6.15±0.16	7.18±0.25
	VAR (%)	86.6	85.1	85.9
75 W	$D_e (10^{-10} m^2/s)$	3.47±0.22	7.50±0.44	7.92±0.40
	VAR (%)	85.6	84.5	86.8

El modelo difusivo propuesto obtuvo un bajo valor del porcentaje de varianza explicada (Tabla 2) que osciló entre 84.5 y 88.4%, lo que significa que las hipótesis consideradas en la formulación del modelo no se ajustan a las condiciones experimentales. Sin embargo, este modelo nos permite comparar los efectos de la temperatura y aplicación de ultrasonidos en las cinéticas de secado, por lo que resulta adecuado como una primera etapa de modelización. Con el fin de obtener un mejor ajuste a los datos experimentales [5, 26], en el modelo se debería considerar el encogimiento de las muestras y la resistencia externa a la transferencia de materia, dado que pueden no ser despreciables en estas condiciones experimentales, aspectos que se deberán abordar en futuros trabajos. De este modo, los valores de D_e que aparecen en la Tabla 1 incluyen tanto el efecto de la difusión como de otros fenómenos no considerados, como la convección. Por tanto, el incremento de los valores de D_e por la aplicación de ultrasonidos incluye el efecto tanto en la resistencia interna a la transferencia de materia como en la externa. La aplicación de ultrasonidos de potencia en sistemas sólido-gas produce una agitación mecánica del medio debido a la generación microcorrientes y variaciones de presión en las interfases, lo que reduce la capa límite y consecuentemente, mejora el movimiento del agua de la superficie del producto hacia el aire.

3.3 Contenido de polifenoles totales

Se observó una variabilidad experimental muy elevada en el contenido de polifenoles totales y la capacidad antioxidante de la manzana fresca. Por tal razón, para apreciar el efecto del secado convectivo sin (0 W) y con (45 W, 75 W) aplicación de ultrasonidos fue necesario hacer uso de los valores de degradación de acuerdo a la Ecuación 4, donde C_f y C_d son la concentración del parámetro de calidad bajo estudio de la muestra fresca y deshidratada respectivamente. En la Figura 2 se muestra la degradación (%) del contenido de polifenoles totales durante el secado sin (0 W) y con (45 W, 75 W) aplicación de ultrasonidos de potencia.

$$\text{Degradacion} = \frac{(C_f - C_d)}{C_f} \times 100 \quad (4)$$

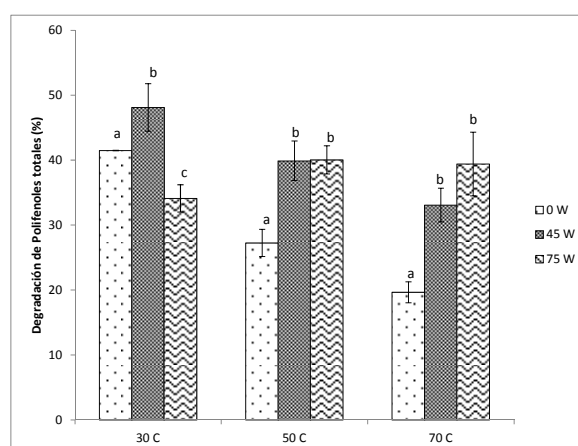


Figura 2 – Reducción del contenido de polifenoles totales de manzana deshidratada mediante el secado convectivo sin (0 W) y con (45 W, 75 W) ultrasonidos de potencia. Medias con diferentes letras muestran diferencias significativas para cada temperatura ($p < 0.05$)

El contenido de polifenoles totales inicial fue de 10.00 ± 1.81 mg (A.G)/g. s.s. Este valor es similar que el determinado por Heras-Ramírez et al. [27] (11.9 mg (A.G)/g. s.s) para Granny Smith y por Schieber et al. [28] para distintas variedades de manzana ('Pacific Rose', 'Sunrise', 'Braeburn', 'Royal Gala). El secado causa una notable reducción en el contenido de polifenoles totales independientemente de las condiciones experimentales evaluadas. Tal y como se observa en la Figura 2, tanto la temperatura de secado como la aplicación de ultrasonidos influyen de manera significativa en el contenido de compuestos fenólicos. Así en las muestras deshidratadas sin aplicación de ultrasonidos (0 W), la degradación fue de 41.84% para 30°C y de 19.66% para 70°C respecto de la manzana fresca. Este resultado es indicativo de que altas temperaturas de secado y por consiguiente tiempos de exposición cortos ralentizan la reacción de degradación de los polifenoles totales [29]. Con respecto a la aplicación de ultrasonidos de potencia, la aplicación de ultrasonidos, en general, conllevó a una mayor degradación de los compuestos fenólicos, excepto en las experiencias realizadas a 30°C donde las muestras deshidratadas a 75 W mostraron una degradación menos intensa que las deshidratadas sin la aplicación de ultrasonidos (0 W). Este hecho abre un campo de potencial aplicación de esta tecnología en el secado a bajas temperaturas. Es conveniente resaltar que no existen estudios publicados que relacionen el efecto de la aplicación de ultrasonidos durante el secado convectivo sobre los compuestos fenólicos de muestras vegetales.

3.4 Capacidad antioxidante

Los valores de capacidad antioxidante para las muestras de manzana fresca se muestran en la Tabla 3. Estos resultados son similares a los obtenidos por Heras-Ramírez et al. [27] para ABTS, Karaman et al. [21] para CUPRAC, y ligeramente mas bajos que los obtenidos por Imeh y Khokhar [30] para FRAP.

Tabla 3. Capacidad antioxidante (mg Trolox/ g s.s) de las muestras frescas.

Método	Promedio
ABTS	12.94 ± 1.78
CUPRAC	18.31 ± 3.26
DPPH	29.23 ± 5.53
FRAP	7.96 ± 1.68

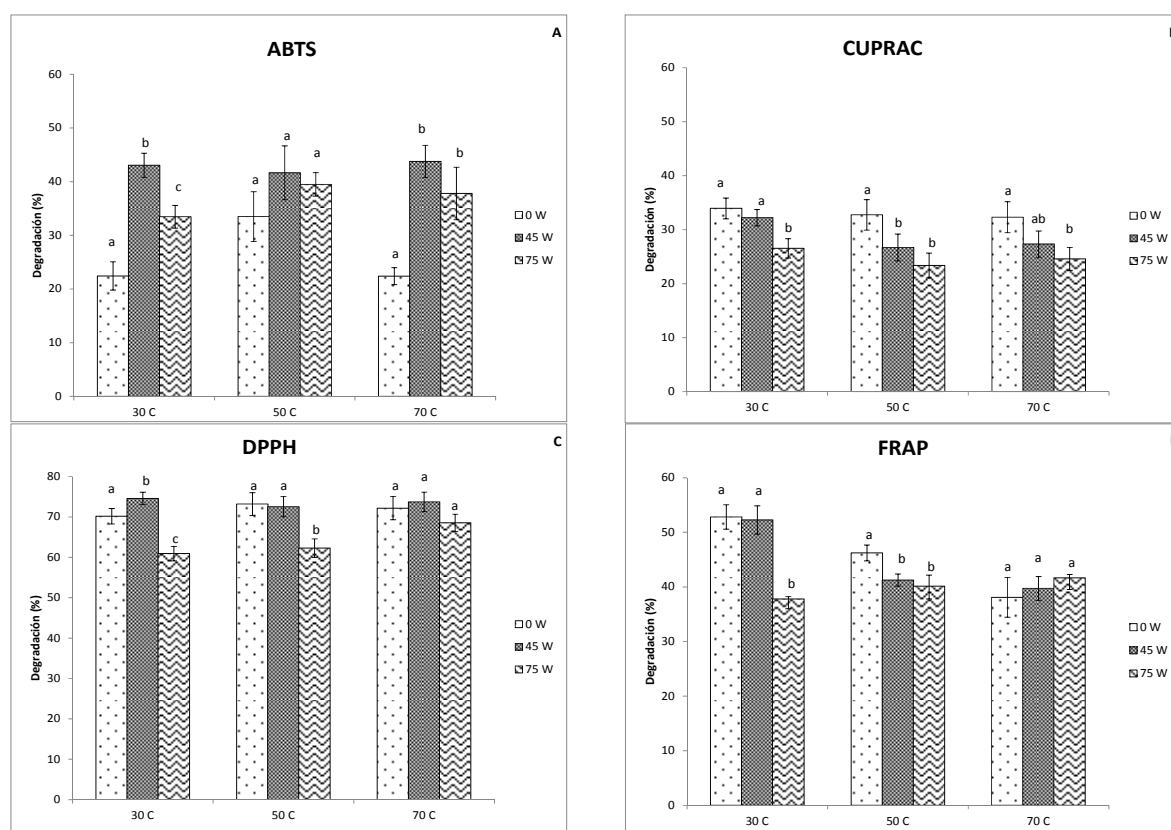


Figura 3 – Reducción de la capacidad antioxidante de manzana deshidratada mediante secado convectivo sin (0 W) y con (45 W, 75 W) aplicación de ultrasonidos de potencia. (A) ABTS, (B) CUPRAC, (C) DPPH. (D) FRAP.

Medias con diferentes letras muestran diferencias significativas para cada temperatura ($p < 0.05$)

La capacidad antioxidante de la manzana fue afectada de manera significativa ($p < 0.05$) tanto por la temperatura de secado como por la aplicación de ultrasonidos de potencia (Figura 3). El efecto de ambos factores varió según el método con el que se evaluó, ya que están basados en principios químicos distintos. Así, los valores medios de degradación de la capacidad antioxidante respecto de la muestra fresca oscilaron entre aproximadamente el 70% medido con el método DPPH hasta el 35% para el método CUPRAC. Para el método ABTS, la degradación fue menor cuando no se aplicaron ultrasonidos de potencia (0 W) en el intervalo de temperaturas estudiado. Sin embargo, la degradación de la capacidad antioxidante medida por los métodos CUPRAC, DPPH y FRAP fue significativamente ($p < 0.05$) inferior cuando se aplicaron ultrasonidos de potencia, siendo este hecho más evidente para temperaturas bajas (30 y 50°C) y para la potencia ultrasónica más elevada (75 W). En trabajos futuros, será necesaria una investigación mas profunda para esclarecer los fenómenos que expliquen la influencia de la aplicación de los ultrasonidos de potencia en la degradación de la capacidad antioxidante durante el secado convectivo de muestras vegetales.

4 Conclusiones

En el secado por aire caliente de manzana, el tiempo de secado se redujo por el aumento de la temperatura y la aplicación de ultrasonidos de potencia. De igual forma, ambos factores conllevaron un aumento significativo de la difusividad efectiva. El efecto de la aplicación de ultrasonidos fue

dependiente de la potencia aplicada y se redujo a altas temperaturas. En general, se observó que la capacidad antioxidante y el contenido polifenólico de las muestras de manzana se conservaron mejor cuando se disminuyó el tiempo de secado, es decir cuando se utilizaron altas temperaturas y/o potencias ultrasónicas elevadas. Por tanto, la aplicación de ultrasonidos se puede considerar una tecnología adecuada con la que se intensifica el secado convectivo de manzana y se puede conservar la capacidad antioxidante.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) su financiación para la realización de este trabajo a través de los proyectos DPI2009-14549-C04-01, DPI2009-14549-C04-02 y DPI2009-14549-C04-04, de igual manera a la Consellería de Innovación, Interior y Justicia de la CAIB por la beca predoctoral FPI y el Proyecto 57/2011.

Referencias

- [1] Mayor, L.; Sereno, A.M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61, 2004, 373-386.
- [2] Ertekin, C.; Yaldiz, O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering*, 63, 2004, 349-359.
- [3] Garau, M.C; Simal, S; Rosselló, C; Femenia, A. Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties of dietary fibre and antioxidant capacity of orange (*Citrus aurantium* v. *Canoneta*) by-products. *Food Chemistry*, 104, 2007, 1014-1024.
- [4] Gallego-Juárez, J.A.; Riera, E.; de la Fuente Blanco, S.; Rodríguez-Corral, G.; Acosta-Aparicio, V.M.; Blanco, A. Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetables: processes and devices. *Drying Technology*, 25, 2007, 1893-1901.
- [5] García-Pérez, J.V.; Cárcel, J.A.; Benedito, J.; Mulet, A. Power ultrasound mass transfer enhancement in food drying. *Food and Bioproducts Processing*. 85, 2007, 247-254.
- [6] García-Pérez, J.V.; Rosselló, C.; Cárcel, J.A.; De la Fuente, S.; Mulet, A. Effect of air temperature on convective drying assisted by high power ultrasound. *Defect and diffusion forum*. Vols. 258-260, 2006, 563-574. Trans Tech Publications. Switzerland.
- [7] Mulet, A.; Cárcel, J.A.; Sanjuán, N.; García-Pérez, J.V. Food dehydration under forced convection conditions. En: *Recent Progress in Chemical Engineering*, J. Delgado (ed), Studium Press LLC, Houston, TX, USA, 2010.
- [8] Ortuño, C.; García-Pérez, J.V.; Cárcel, J.A.; Femenía, A.; Mulet, A. Modelling of ultrasonically assisted convective drying of eggplant, *17th International Drying symposium*, Magdeburg, Germany, 3-6 October 2010.
- [9] Hassini, L.; Azzouz, S.; Pecalski, R.; Belghith, A. Estimation of potato moisture diffusivity from convective drying kinetics with correlation of shrinkage. *Journal of Food Engineering*, 79, 2007, 47-56.
- [10] Vega-Gálvez, A.; Miranda, N.; Bilbao-Sáinz, C.; Uribe, E.; Lemus-Mondaca, R. Empirical modeling of drying process for apple (cv. *Granny Smith*) slices at different air temperatures. *Journal of Food Processing and Preservation*, 32, 2008, 972-986.

- [11] Vrhovsek, U.; Rigo, A.; Tonon, D.; Mattivi, F. Quantitation of polyphenols in different apple varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52, 2004, 6532-6538.
- [12] van der Sluis, A.A.; Dekker, M.; Jongen, W.M. Flavonoids as bioactive components in apple products. *Cancer Letters*, 114, 1997, 107-108.
- [13] van der Sluis, A.A.; Dekker, M.; van Boekel, M.A. Activity and concentration of polyphenolic anti-oxidants in apple juice. 3. Stability during storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 2005, 1073-1080.
- [14] AOAC. *Official methods of analysis* (Association of Official Analytical Chemist, Arlington, Virginia, USA, 1997).
- [15] García-Pérez, J.V.; Cárcel, J.A.; de la Fuente, S.; Riera, E. Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed: parametric study. *Ultrasonics*, 44, 2010, e539-e543.
- [16] Crank, J. *The Mathematics of Diffusion*. Oxford University Press, London, 1975.
- [17] Rodríguez, O., Eim, V.S., Simal, S., Femenia, A., Rosselló, C. Validation of a Diffusion Model Using Moisture Profiles Measured by Means of TD-NMR in Apples (*Malus domestica*). *Food and Bioprocess Technology*, 2011, 1-11. DOI 10.1007/s11947-011-0711-7
- [18] Heredia, J., & Cisneros-Zevallos, L. The effects of exogenous ethylene and methyl jasmonate on the accumulation of phenolic antioxidants in selected whole and wounded fresh produce. *Food Chemistry*, 115, 2009, 1500-1508.
- [19] Floegel, A; Dae-Ok, K; Sang-Jin, C; Sung I. Koo, Ock K., C; Comparison of ABTS/DPPH assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich US foods. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24, 2011, 1043-1048.
- [20] Benzie, I; Strain, J. The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of “Antioxidant Power”: The FRAP Assay. *Analytical Biochemistry*, 239, 1996, 70-76.
- [21] Karaman, S, Tütem, E; Sözgen, K, Apak, R. Comparison of total antioxidant capacity and phenolic composition of some apple juices with combined HPLC-CUPRAC assay. *Food Chemistry*, 120, 2010, 1201-1209.
- [22] Lo Scalzo, R; Iannocari, T; Summa, C; Morelli, R; Rapisarda, P. Effect of thermal treatments on antioxidant and antiradical activity of blood orange juice. *Food Chemistry*, 85, 2004, 41-47.
- [23] Carbone, K; Giannini, B; Picchi, V, Lo Scalzo, R; Cecchini, F. Phenolic composition and free radical scavenging activity of different apple varieties in relation to the cultivar, tissue type and storage. *Food Chemistry*, 127, 2011, 493-500.
- [24] García-Pérez, J.V.; Cárcel, J.A.; Riera, E.; Mulet, A. Influence of the applied acoustic energy on the drying of carrots and lemon peel. *Drying Technology*, 27, 2009, 281-287.
- [25] Gallego-Juárez, J.A.; Rodríguez-Corral, G.; Gálvez-Moraleda, J.C.; Yang, T.S. A new high intensity ultrasonic technology for food dehydration. *Drying Technology*, 17, 1999, 597-608.
- [26] Cárcel, J.A.; García-Pérez, J.V.; Riera, E.; Mulet, A. Influence of high intensity ultrasound on drying kinetics of persimmon. *Drying. Technology*, 25, 2007, 185-193.
- [27] Heras-Ramírez, M; Quintero-Ramos, A; Camacho-Dávila, A; Barnard, J; Talamás-Abbud, R; Torres-Muñoz, J; Salas-Muñoz, E. Effect of Blanching and Drying Temperature on Polyphenolic Compound Stability and Antioxidant Capacity of Apple Pomace. *Food and Bioprocess Technology*. 2011, DOI: 10.1007/s11947-011-0583-x

- [28] Schieber, A; Hilt, P; Streker, P; Endreß, H; Rentschler, C; Carle, R. A new process for the combined recovery of pectin and phenolic compounds from apple pomace. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 4, 2003, 99-107.
- [29] Chantaro, P; Devahastin, S; Chiewchan, N; Production of antioxidant high dietary fiber powder from carrot peels, *LWT - Food Science and Technology*, 41, 2008, 1987-1994.
- [30] Imeh, U., Khokhar, S. Distribution of conjugated and free phenols in fruits: Antioxidant activity and cultivar variations. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 2002, 6301-6306.