

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA Y DEL MEDIO NATURAL

GRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS ALIMENTOS



**Estudio de Parámetros de Calidad de Manzana
Deshidratada mediante Secado a baja Temperatura
Asistido con Ultrasonidos**

CURSO 2013-2014

TRABAJO FIN DE GRADO

Autor:

Marina Contreras Ruiz

Director:

José Vicente García Pérez

Valencia, Junio 2014



Alumna: Marina Contreras Ruiz

Profesor: José Vicente García Pérez

Valencia, Junio 2014

Título: Estudio de parámetros de calidad de manzana deshidratada mediante secado a baja temperatura asistido con ultrasonidos.

Resumen:

El secado convectivo a baja temperatura representa una alternativa a la liofilización, pero es un proceso extremadamente lento. Una opción novedosa para mejorar la velocidad del proceso es la aplicación de ultrasonidos de potencia.

En este trabajo, se estudió la influencia de la aplicación de ultrasonidos de potencia durante el secado a baja temperatura de manzana en la calidad del producto deshidratado. Las experiencias de secado se realizaron a 2 m/s, a 10 y -10°C, sin (0W) y con aplicación de ultrasonidos a distintas potencias (25, 50 y 75W). Las cinéticas de secado se modelizaron con un modelo difusivo. Finalmente, se estudió la capacidad de rehidratación del producto y la textura de las muestras rehidratadas, así como el contenido en compuestos fenólicos total y la capacidad antioxidante.

La aplicación de ultrasonidos de potencia aceleró el proceso de secado, con reducciones del tiempo de secado de hasta 81.5%, al mejorar el transporte difusivo. Además, cuanto mayor fue la potencia acústica aplicada, mayor fue la velocidad de secado. En cuanto a la capacidad de rehidratación, las muestras deshidratadas a -10°C rehidrataron más y a una velocidad más elevada, adquiriendo una textura más blanda. No se observó ninguna influencia de la aplicación de ultrasonidos en la rehidratación ni en la textura. La capacidad antioxidante y el contenido en compuestos fenólicos total de la manzana deshidratada no se vieron afectados por las distintas condiciones de secado ensayadas. Por lo tanto, la aplicación de ultrasonidos de potencia no implicó una reducción de calidad de la manzana deshidratada.

Palabras clave: deshidratación, ultrasonidos, temperatura de secado, modelización, calidad

Student: Marina Contreras Ruiz

Advisor: José Vicente García Pérez

Valencia, June 2014

Title: Study of quality parameters in apple dried at low-temperature assisted by power ultrasound.

Abstract:

Low-temperature drying represents an alternative to freeze-drying, but it is considered an extremely slow process. A novel strategy to improve the process rate is the application of power ultrasound.

In this work, the influence of power ultrasound application in low-temperature drying of apple was addressed in order to assess how it affects the quality of the dehydrated product. Drying experiments were carried out at 2 m/s, at 10 and -10°C, without (0W) and with ultrasound application at different acoustic powers (25, 50 y 75W). The drying kinetics were mathematically described from a diffusion model. Finally, the rehydration capacity and the rehydrated product's texture were determined, as well as the antioxidant capacity and the total phenolic content.

The application of power ultrasound sped up the drying process, with drying time reductions of up to 81.5%, by improving diffusion transport. In addition, the higher the acoustic power applied, the faster the drying. With regard to the rehydration capacity, samples dried at -10°C rehydrated more and faster than those dried at 10°C and achieved a softer texture. Ultrasound application affected neither rehydration nor texture. Antioxidant capacity and total phenolic content of the dehydrated apple were not affected by the different drying conditions tested. Therefore, power ultrasound application did not involve the reduction of dehydrated apple quality.

Key words: dehydration, ultrasound, drying temperature, modelling, quality

ÍNDICE

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Manzana como producto deshidratado de interés.....	1
1.2. Secado de alimentos.....	3
1.3. Secado asistido con ultrasonidos	5
2. OBJETIVOS.....	7
3. MATERIALES Y MÉTODOS	8
3.1. Materia prima	8
3.2. Secadero convectivo a baja temperatura asistido con ultrasonidos de potencia	9
3.3. Experiencias de secado	13
3.4. Modelización de las cinéticas de secado.....	13
3.5. Parámetros de calidad	15
3.5.1. Capacidad de rehidratación.....	16
3.5.2. Textura.....	16
3.5.3. Contenido total en compuestos fenólicos	17
3.5.4. Capacidad antioxidante	18
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
4.1. Cinéticas de secado a baja temperatura	20
4.1.1. Influencia de la temperatura del aire	20
4.1.2. Influencia de la aplicación de ultrasonidos de potencia.....	22
4.2. Modelización de las cinéticas de secado: modelo difusivo	24
4.3. Parámetros de calidad	28
4.3.1. Rehidratación.....	28
4.3.2. Textura.....	30
4.3.3. Compuestos fenólicos totales.....	32
4.3.4. Capacidad antioxidante	34
5. CONCLUSIONES	36
6. BIBLIOGRAFÍA.....	37

ÍNDICE DE FIGURAS

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Figura 3.1. Herramienta de corte	8
Figura 3.2. Esquema del secadero convectivo asistido con ultrasonidos (García-Pérez et al., 2012)... ..	9
Figura 3.3. Cámara de secado cilíndrica	10
Figura 3.4. Portamuestras	10
Figura 3.5. Pantalla principal de la aplicación de gestión del secadero.	12
Figura 3.6. Pantalla de selección de los parámetros que intervienen en el proceso de secado.	12
Figura 3.7. Parámetros de calidad analizados en manzana fresca y deshidratada.	15
Figura 3.8. Cubetas utilizadas en la medida del contenido de compuestos fenólicos. Se observan los diferentes estados de la reacción.	17

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Figura 4.1. Cinéticas de secado sin aplicación de ultrasonidos (SUS) a 10 y -10°C.....	20
Figura 4.2. Cinéticas de secado a 10 y -10°C con aplicación de ultrasonidos a 25 y 50W....	21
Figura 4.3. Cinética de secado a 10 y -10°C con aplicación de ultrasonidos a 75W.	21
Figura 4.4. Cinéticas de secado a 10 y -10°C sin (SUS) y con aplicación de ultrasonidos de potencia a distintas potencias (25, 50 y 75W).	22
Figura 4.5. Cinéticas de secado y ajuste del modelo difusivo. Experiencias realizadas a 10 y -10°C sin (SUS) y con aplicación de ultrasonidos de potencia a 25W.....	25
Figura 4.6. Cinéticas de secado y ajuste del modelo difusivo. Experiencias realizadas a 10 y -10°C con aplicación de ultrasonidos de potencia a 50 y 75W.	26
Figura 4.7. Influencia de la potencia acústica aplicada (0, 25, 50 y 75W) en la difusividad efectiva para experiencias de secado realizadas a 10 y -10°C.	27
Figura 4.8. Cinéticas de rehidratación de las muestras secadas a 10 y -10°C sin (SUS) y con aplicación de ultrasonidos a 25W.	28
Figura 4.9. Cinéticas de rehidratación de las muestras secadas a 10 y -10°C con aplicación de ultrasonidos a 50 y 75W.	29
Figura 4.10. Incremento de peso durante la rehidratación de las muestras deshidratadas a 10 y -10°C sin (SUS, 0W) y con aplicación de ultrasonidos de potencia a diferentes potencias (25, 50 y 75W)..	29
Figura 4.11. Dureza (Fuerza máxima de compresión) de las muestras rehidratadas después de haber sido secadas a 10 y -10°C sin (SUS) y con aplicación de ultrasonidos de potencia a 25W..	30
Figura 4.12. Dureza (Fuerza máxima de compresión) de las muestras rehidratadas después de haber sido secadas a 10 y -10°C con aplicación de ultrasonidos de potencia a 50 y 75W..	31
Figura 4.13. Dureza (Fuerza máxima de compresión) de las muestras rehidratadas después de haber sido secadas a 10 y -10°C sin (SUS, 0W) y con aplicación de ultrasonidos de potencia a distintas potencias (25, 50 y 75W)..	31

Figura 4.14. Compuestos Fenólicos Totales (CFT) en manzana fresca y en manzana deshidratada.32

Figura 4.15. Porcentaje de degradación de compuestos fenólicos totales para las muestras secadas a 10 y a -10°C.33

Figura 4.16. Porcentaje de degradación de compuestos polifenólicos totales entre las muestras frescas y las deshidratadas a dos temperaturas distintas (10 y -10°C) sin (SUS, 0W) y con aplicación de ultrasonidos de potencia a distintas potencias (25, 50 y 75W).. ..33

Figura 4.17. Capacidad antioxidante (CA) de las muestras deshidratadas sin (SUS, 0W) y con aplicación de ultrasonidos a 25W a dos temperaturas distintas (10 y -10°C)..34

Figura 4.18. Capacidad antioxidante (CA) de las muestras deshidratadas con aplicación de ultrasonidos de potencia a 50 y 75W a dos temperaturas distintas (10 y -10°C).....35

Figura 4.19. Porcentaje de degradación de la capacidad antioxidante entre las muestras frescas y las deshidratadas a dos temperaturas distintas (10 y -10°C) sin (0W) y con aplicación de ultrasonidos de potencia a distintas potencias (25, 50 y 75W)..35

ÍNDICE DE TABLAS

1. INTRODUCCIÓN

Tabla 1.1. Composición nutricional (en 100 g) de manzana.....2

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Tabla 3.1. Resumen de las condiciones experimentales del secado de manzana a baja temperatura.13

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4.1. Tiempos de secado (en horas) para las experiencias realizadas a 10 y -10 °C sin (SUS, 0W) y con aplicación de ultrasonidos a distintas potencias (25, 50 y 75W).23

Tabla 4.2. Modelización de las cinéticas de secado realizadas a 10 y -10°C sin (SUS, 0W) y con aplicación de ultrasonidos de potencia a distintas potencias (25, 50 y 75W).....24

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Manzana como producto deshidratado de interés

La manzana es una fruta perteneciente a la familia de las rosaceae. El fruto es un pomo con forma ovoide o redondeada. La textura de la pulpa puede ser dura o blanda y posee un alto contenido en agua. Su sabor va desde el muy dulce al muy ácido, según la variedad. La piel es blanda y comestible y puede ser de color verde, amarillo o rojizo. La manzana tiene un tamaño medio de 85 mm de diámetro y su peso oscila entre 170 y 250 g (frutas.consumer.es, 2014)

Como ya se ha comentado, de la composición nutricional de la manzana cabe destacar la abundante cantidad de agua que posee, en cambio el contenido en grasa y colesterol es prácticamente nulo. Este fruto aporta hidratos de carbono fundamentalmente en forma de azúcares, siendo el azúcar mayoritario la fructosa, seguido de glucosa y sacarosa. También contiene cantidades elevadas de fibra, tanto soluble como insoluble. La fibra soluble, formada por pectina principalmente, ayuda a prevenir la formación de colesterol además de ralentizar la liberación de glucosa en el cuerpo. Por su parte, la fibra insoluble es capaz de regular el tránsito del intestino grueso.

Otras propiedades beneficiosas de la manzana derivan de su alto contenido en flavonoides, un tipo de polifenol, y ácido málico. Entre los flavonoides destacan los flavonoles, catequinas y procianidinas, todos ellos con un gran poder antioxidante. Estos compuestos químicos reducen o previenen la oxidación, así evitan que células y tejidos sean dañados por los radicales libres del cuerpo. Dentro de los flavonoles, el más abundante en esta fruta es la quercetina, la cual tiene capacidad anticancerígena. En cuanto al ácido málico, este compuesto está implicado en el metabolismo y en la producción de energía del cuerpo, además de ser un agente quelante de metales. Por todo esto, la composición nutricional de la manzana (Tabla 1.1) hace que sea una de las frutas más beneficiosas para la salud.

Tabla 1.1. Composición nutricional (en 100 g) de manzana. (MAGRAMA, 2013)

Compuesto	Cantidad	Compuesto	Cantidad
Energía	53 kcal	Sodio	2 mg
Agua	85.7 g	Potasio	120 mg
Carbohidratos	12 g	Fósforo	8 mg
Proteínas	0.3 g	Vitamina A	0.004 mg
Lípidos totales	Trazas	Vitamina C	10 mg
Fibra	2 g	Vitamina E	0.2 mg
Calcio	6 mg	Tiamina	0.04 mg
Hierro	0.4 mg	Riboflavina	0.02 mg
Magnesio	5 mg	Folatos	0.005 mg

En el mercado existen muchas variedades comerciales de manzana, siendo una de las más populares la variedad Granny Smith, de origen australiano. Posee un color verde intenso y es ligeramente ácida, a la vez que crujiente y jugosa. Además, es una de las variedades con mayor contenido en polifenoles (Rodríguez et al., 2014).

El consumo de frutas frescas disminuyó un 2.2% en España durante el año 2013. Para la manzana, la reducción fue del 7.2% (MAGRAMA, 2013). Ante esta situación, una de las opciones para aumentar su consumo es la búsqueda de nuevos formatos de comercialización. El desarrollo de nuevos productos permitirá diversificar la oferta, beneficiando a las propias industrias al incrementarse su oferta de productos y además, ofreciendo al consumidor una mayor variedad de formatos para consumir fruta.

La deshidratación es una de las posibles alternativas para el desarrollo de nuevos productos a partir de la manzana. Durante la deshidratación, se elimina de manera parcial o total el agua de la fruta, de manera que se logra aumentar la vida útil del producto. Además, la deshidratación es necesaria para conseguir ingredientes para la elaboración de nuevos productos (Marín et al., 2006). Entre los nuevos productos donde se emplean alimentos deshidratados como materia prima se encuentran los derivados lácteos, los cereales, la repostería o mermeladas. La introducción de fruta deshidratada en dichos productos incrementaría el consumo de fruta en la sociedad.

En el caso de la manzana, el mayor uso que se le ha dado a esta fruta deshidratada es el de snack saludable, ya que posee todos los nutrientes de la manzana muy concentrados al no tener agua. Además, se suele comercializar en un formato de loncha crujiente que es muy atractivo para el consumidor al considerarse una forma diferente y original de comer fruta. Otros usos de la manzana deshidratada son: té, ingrediente de quesos o fiambres, postres lácteos, cereales de desayuno, mueslis, etc...

Tal y como se ha comentado previamente, la obtención de productos deshidratados nuevos, de calidad y atractivos para el consumidor es necesaria para diversificar mercados (Askari et al., 2009). La calidad de los alimentos deshidratados normalmente es menor que la del producto fresco, puesto que el secado influye negativamente en sus características de calidad (Ratti, 2001). Por ello es necesario obtener un equilibrio entre calidad del producto deshidratado y coste operativo, así como el desarrollo de nuevos procesos de secado para obtener productos de alta calidad a un menor coste.

1.2. Secado de alimentos

La deshidratación es un método muy antiguo de conservación de alimentos que ha permitido disponer de una gran variedad de productos sin importar la época del año. Actualmente, este procedimiento es una de las operaciones unitarias más relevantes en el procesado de alimentos (Mulet et al., 2005). La deshidratación disminuye la actividad de agua, lo que limita el desarrollo de microorganismos, reacciones de oxidación y enzimáticas que se podrían producir durante el almacenamiento del producto. La reducción de la actividad de agua, también lleva asociado una pérdida en volumen y en peso del alimento tratado, hecho que facilita su transporte y almacenamiento (Ozuna et al., 2011). Sin embargo, aunque esta operación es de las más utilizadas, puede provocar cambios indeseables en los alimentos como la pérdida de elementos volátiles, cambios en la textura, encogimiento, disminución de componentes bioactivos o cambios de color (Sanjuán et al., 1999), que afectan a la calidad del producto final. Estos cambios dependen en gran medida de la técnica de secado empleada (Mulet et al., 2010) o de la temperatura utilizada. Por ello es importante definir las condiciones de secado que mejor conserven las propiedades del producto fresco.

Para la extracción del agua del alimento existen diferentes técnicas, que pueden ser clasificadas en métodos mecánicos (ósmosis inversa o prensado) y métodos físico-químicos (secado con aire caliente o liofilización) (Vega-Mercado et al., 2001). Hoy en día el secado por

aire caliente es la técnica más utilizada para la deshidratación de alimentos. Dicha técnica consiste en aplicar una corriente de aire o vapor de agua sobrecalentado sobre el alimento. Esto provoca un flujo de calor desde el medio al alimento y un flujo de materia (agua) en dirección opuesta (García-Pérez, 2007). Con esta técnica se consiguen productos muy homogéneos y no requiere una excesiva inversión inicial, aunque la calidad final del producto puede verse seriamente afectada si se emplean temperaturas muy elevadas (Puig et al., 2012).

La deshidratación a baja temperatura es una alternativa para mejorar la calidad del producto deshidratado. El término “baja temperatura” se refiere a temperaturas de deshidratación por debajo de la temperatura ambiente (20°C) (Ozuna et al., 2014). La técnica de secado a baja temperatura convencional es la liofilización, donde el alimento se congela y el agua se elimina por sublimación del hielo en una cámara de vacío donde se emplean presiones por debajo del punto triple del agua (Schössler et al., 2012a). El producto deshidratado que se obtiene es de muy alta calidad debido a la utilización de bajas temperaturas y un ambiente con prácticamente ausencia de oxígeno (Wu et al., 2007) que evita/limita la oxidación. Sin embargo, la liofilización a vacío requiere una elevada inversión inicial e implica un elevado coste de operación debido a la generación de vacío y a que se trabaja en discontinuo (Claussen et al., 2007). Una alternativa a la liofilización, es el secado convectivo empleando bajas temperaturas. En este caso, se pueden emplear temperaturas por encima del punto de congelación del agua, lo que conlleva una deshidratación por evaporación. Este tipo de secado presenta algunas ventajas interesantes, como por ejemplo, que no es necesaria la congelación del producto por lo que se evita la degradación de la estructura por formación de cristales de hielo. También, se pueden emplear temperaturas por debajo del punto de congelación del alimento. Este método de secado se denomina liofilización a presión atmosférica. Durante el secado, la muestra permanece siempre congelada al estar en contacto con la corriente de aire y la eliminación del agua se realiza por sublimación. Las técnicas de secado convectivo a baja temperatura permiten obtener productos deshidratados de una calidad similar a la liofilización a vacío a un menor coste (Alves-Filho et al., 2007). Sin embargo, el principal inconveniente de estas técnicas es la baja velocidad de secado en condiciones de baja temperatura y presión atmosférica. La velocidad de evaporación y de sublimación se ven seriamente limitadas por el bajo nivel energético en el sistema y la presión atmosférica no favorece la eliminación del agua. Ante esta situación se han desarrollado nuevas tecnologías aplicadas al secado convectivo a baja temperatura, con el fin de intensificar la cinética del secado convectivo (Benali y Kudra, 2010) y deshidratar el producto en el menor tiempo posible manteniendo su calidad. Entre estas tecnologías se encuentran distintas formas de energía, tales como las

ondas microondas, radiación infrarroja y radiofrecuencia (Mulet et al., 2010). El efecto que provocan estos tres tipos de ondas electromagnéticas en el proceso de secado se basa principalmente en el aporte de energía térmica por calentamiento del producto. De esta manera se reduce el tiempo de secado, pero el incremento de temperatura puede afectar a la calidad del alimento (Schössler et al., 2012b). Para reducir o evitar la degradación es necesario controlar cuidadosamente el aporte de energía para impedir el fenómeno de sobrecalentamiento y así, la descongelación del producto. Este hecho hace complicado la implantación de estas técnicas en los procesos de secado a baja temperatura.

Los ultrasonidos de potencia, un tipo de tecnología no-térmica basada en fenómenos mecánicos, es una posible alternativa a las tecnologías anteriormente citadas, ya que son capaces de intensificar la eliminación de agua sin introducir una gran cantidad de energía térmica durante el secado.

1.3. Secado asistido con ultrasonidos

Los ultrasonidos son oscilaciones mecánicas que tienen lugar en el seno del material por el que se propagan (García-Pérez, 2007), al ser ondas elásticas necesitan de un medio material para su propagación.

Los ultrasonidos se pueden clasificar arbitrariamente según su frecuencia e intensidad (Awad et al., 2012). Así, los ultrasonidos de señal, también conocidos como de baja intensidad o de alta frecuencia, comprenden frecuencias entre 10^5 y 10^6 Hz. Se utilizan para obtener información del producto cuando la onda acústica pasa a través del alimento. Esto es posible gracias a que algunos parámetros de los ultrasonidos cambian según las propiedades físicas del medio (Corona et al., 2014). Los ultrasonidos de señal en tecnología de alimentos se utilizan como técnica no destructiva de control de procesos y caracterización de alimentos. Entre otras aplicaciones, se han utilizado para evaluar la textura de determinados tipos de queso (Benedito et al., 2006), para determinar parámetros de calidad de frutas (Camarena y Martínez-Mora, 2006) o para caracterizar productos cárnicos curados (Corona et al., 2013).

Por otro lado, se encuentran los ultrasonidos de potencia, también conocidos como de alta intensidad o de baja frecuencia, ya que su frecuencia está comprendida entre 2×10^4 y 10^5 Hz. Son capaces de provocar cambios en un proceso o producto. Los ultrasonidos de potencia tienen numerosas aplicaciones. Una de las más conocidas es para facilitar la limpieza de

materiales. Entre otras, destacan en tecnología de alimentos, las siguientes aplicaciones: filtración, corte, extracción, esterilización y calentamiento (Chemat et al., 2011).

Los ultrasonidos de potencia provocan una serie de efectos mecánicos en el medio que pueden acelerar la velocidad de secado con un bajo efecto térmico (Awad et al., 2012). Cuando la onda ultrasónica atraviesa un material, induce una serie de compresiones y descompresiones alternas en el producto que facilitan la salida del agua del alimento al reducir la resistencia interna al transporte de materia (Cárcel et al., 2012), este fenómeno es conocido como “efecto esponja”. Además, los ultrasonidos contribuyen a disminuir la resistencia externa a la transferencia de materia, la cual controla el movimiento del agua entre la superficie del sólido y el aire y depende del espesor de la capa límite de convección (Mulet et al., 2011). Para ello, los ultrasonidos provocan variaciones de presión en la superficie sólido-gas y crean microcorrientes y cambios en la turbulencia del aire.

Trabajos previos han puesto de manifiesto que distintas variables del proceso de secado, al igual que las propiedades del producto, afectan a la eficacia de la aplicación de ultrasonidos en procesos de secado por aire caliente (García-Pérez et al., 2007). Entre ellas, la temperatura es una de las más importantes, ya que a partir de una temperatura elevada (70°C), la influencia de los ultrasonidos desaparece (García-Pérez et al., 2006). La velocidad del aire también es una variable a tener en cuenta cuando se aplican ultrasonidos de potencia, ya que a partir de un umbral de velocidad del aire de secado dado, la influencia de los ultrasonidos es despreciable (García-Pérez et al., 2007). Otra de las variables que juegan un papel relevante en las cinéticas de secado convectivo con ultrasonidos es la potencia aplicada. García-Pérez et al. (2011) concluyeron que a mayor potencia aplicada, el efecto de los ultrasonidos se incrementó. Por último, la estructura de la materia prima influye en la respuesta del producto a la aplicación de ultrasonidos (García-Pérez et al., 2007). Así, los productos muy porosos, tienen grandes espacios intercelulares que facilitan la absorción de energía acústica, incrementando la intensidad de las compresiones y descompresiones provocadas por los ultrasonidos. Sin embargo, la influencia de estas variables no ha sido abordada en profundidad en aplicaciones en procesos de secado a baja temperatura. Además, los estudios realizados hasta el momento se han centrado principalmente en la cinética del proceso y menos esfuerzos se han puesto en determinar la influencia en la calidad del producto deshidratado (Gamboa-Santos et al., 2014).

2. OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo fue determinar cómo algunas variables de proceso del secado a baja temperatura asistido con ultrasonidos de potencia influyen en la calidad de la manzana deshidratada. Con el fin de extraer conclusiones más representativas de la viabilidad de esta técnica, también se realizó un estudio cinético para evaluar su influencia en la velocidad de deshidratación. Para alcanzar este objetivo general se plantearon los siguientes objetivos particulares:

- Evaluar la influencia de la temperatura del aire de secado mediante la utilización de una temperatura por encima del punto de congelación (10 °C) y una inferior (-10 °C).
- Determinar la influencia de la potencia acústica aplicada.
- Modelizar las cinéticas de secado empleando un modelo difusivo para cuantificar el efecto de las variables del proceso sobre los parámetros cinéticos.
- Evaluar diferentes parámetros de calidad (capacidad de rehidratación, textura del producto rehidratado, contenido de compuestos polifenólicos y capacidad antioxidante) para manzana deshidratada en diferentes condiciones.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materia prima

Las manzanas (*Malus domestica* var. Granny Smith) empleadas como materia prima en este trabajo fueron adquiridas en un supermercado local (Valencia, España). Las frutas se seleccionaron para lograr un lote homogéneo en cuanto a madurez y tamaño. Fueron almacenadas a $4 \pm 1^\circ\text{C}$ hasta su procesado. La pulpa de la manzana se cortó en piezas de geometría cúbica (8,7 mm de lado). Para ello se utilizó un utensilio de corte doméstico (Figura 3.1). A continuación, las muestras que iban a ser deshidratadas a una temperatura por encima del punto de congelación se procesaron inmediatamente. En cambio, las muestras cuyo tratamiento se realizó a una temperatura por debajo del punto de congelación, se congelaron a $-18 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 24 horas.



Figura 3.1. Herramienta de corte

El contenido en humedad inicial de las muestras se determinó según el procedimiento de la AOAC número 934.01 (AOAC, 1997). Para ello, entre 2-3 gramos de manzana triturada obtenida de la pulpa de la fruta fresca se colocaron en una estufa a vacío a 70°C y 0.2 atm hasta alcanzar un peso constante (24 h).

3.2. Secadero convectivo a baja temperatura asistido con ultrasonidos de potencia

Las experiencias de secado se realizaron en un secadero convectivo con recirculación de aire, control automático de velocidad y temperatura del aire y registro del peso de las muestras (García-Pérez et al., 2012), que se muestra en la Figura 3.2.

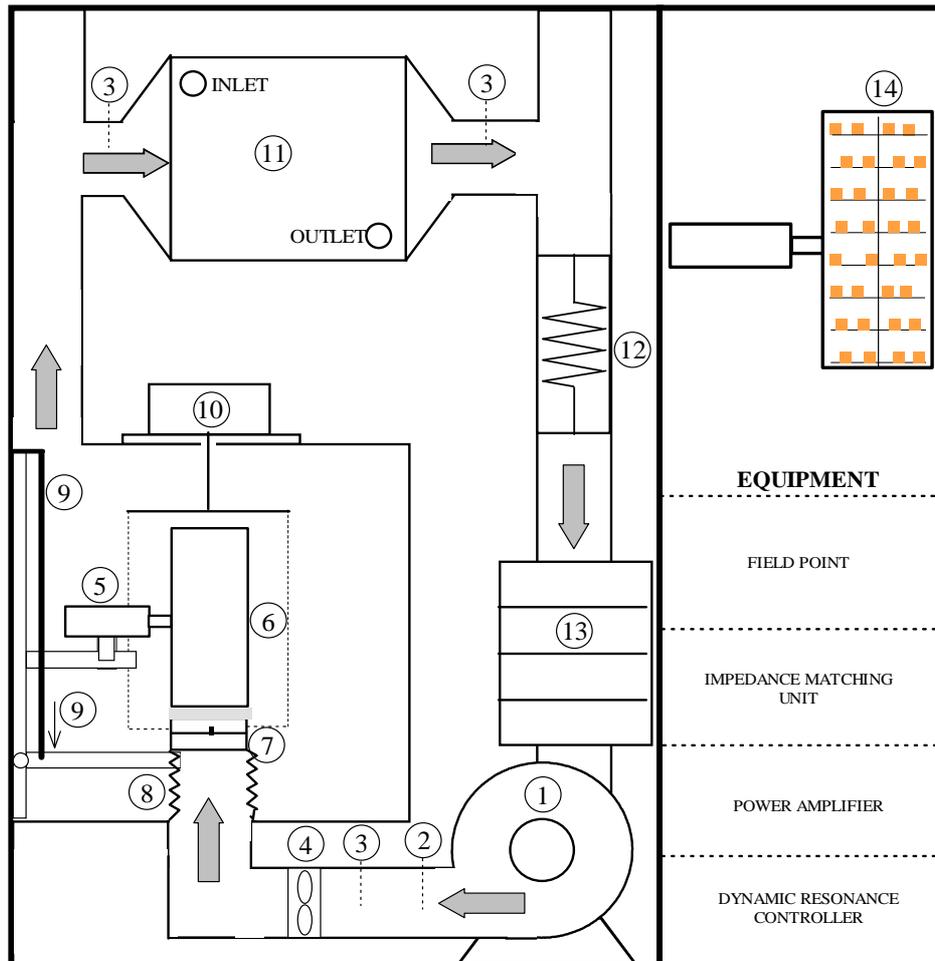


Figura 3.2. Esquema del secadero convectivo asistido con ultrasonidos (García-Pérez et al., 2012).

1. Ventilador centrífugo o soplante; 2.Sensor Pt-100; 3.Sensor de temperatura y humedad relativa; 4.Anemómetro; 5.Transductor piezoeléctrico; 6.Cilindro vibrante y cámara de secado; 7.Dispositivo para cargar la muestra; 8.Tubo retráctil; 9. Mecanismo de desplazamiento vertical; 10.Módulo de pesada; 11. Intercambiador de calor; 12.Resistencia eléctrica; 13.Cámara con bandejas de desecante; 14.Detalle de las muestras en el interior de la cámara de secado.

En el secadero, las muestras se colocaron en el interior de la cámara de secado (Figura 3.2, ⑥ y Figura 3.3), dispuestas en un portamuestras (Figura 3.4) donde 40 cubos de manzana se distribuyeron de manera aleatoria. El portamuestras está compuesto de 10 varillas de aluminio perpendiculares a un eje central de latón. Las dimensiones del portamuestras no introducen perturbaciones en el campo acústico (García-Pérez, 2007).

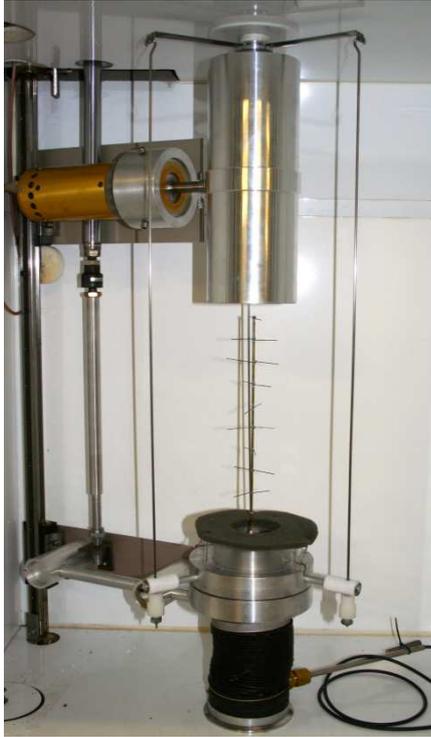


Figura 3.3. Cámara de secado cilíndrica

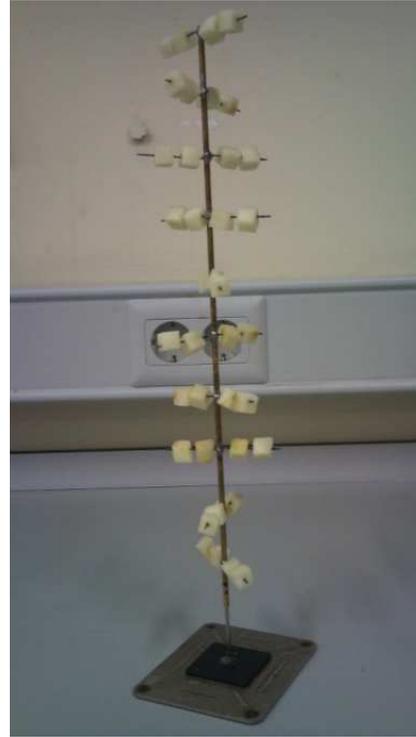


Figura 3.4. Portamuestras

La cámara de secado (Figura 3.2, ⑥ y Figura 3.3) consiste en un cilindro vibrante activado acústicamente por un transductor piezoeléctrico (Figura 3.2, ⑤), el cual actúa como emisor de los ultrasonidos. El cilindro vibrante es de aluminio, ya que este material posee excelentes propiedades elásticas y además, presenta menos problemas térmicos que otros materiales con propiedades similares (García-Pérez, 2007).

Un soplante (Figura 3.2, ①) es el encargado de impulsar el flujo de aire a través de la cámara de secado donde están colocadas las muestras. La velocidad del aire se mide con un anemómetro ($\pm 0,1$ m/s; 1468, Wilh. Lambrecht GmbH, Alemania). El flujo de aire es controlado mediante un PLC (cFP-2220, National Instruments, EE.UU.) utilizando un algoritmo PID (proporcional-integral-derivado) y actuando sobre un variador de frecuencia (MX2, Omron, Japón).

La temperatura del aire requerida se consigue al combinar un intercambiador de calor (Figura 3.2, ⑪) y unas resistencias eléctricas (Figura 3.2, ⑫). El flujo de aire es enfriado al pasar a través del intercambiador de calor y posteriormente las resistencias eléctricas ajustan la temperatura del aire deseada. La temperatura se mide en diferentes puntos del circuito de aire: a la entrada de la cámara de secado, a la entrada y a la salida del intercambiador de calor, y a la salida del soplante, para ello se utiliza una sonda Pt-100 y sensores combinados de temperatura y humedad relativa (Figura 3.2, ② y ③). La humedad relativa del aire de secado se mantiene por debajo del 15% al hacer pasar el flujo de aire por un lecho de bandejas (Figura 3.2, ⑬) con un material desecante (drying beads, 6-8 mm, Rung Rueng Cosulting, Tailandia). Las bandejas son sustituidas periódicamente con material desecante regenerado en estufa a 250°C durante 4 horas.

El cilindro vibrante (Figura 3.2, ⑥) es controlado y activado por un sistema de generación y control ultrasónico que está compuesto por tres elementos fundamentales. En primer lugar, el generador ultrasónico de potencia (APG-AC01, Pusonics, España) genera la señal eléctrica con la frecuencia deseada de trabajo (21.9 kHz). A continuación un transductor piezoeléctrico tipo sándwich (Figura 3.2, ⑤) convierte la señal eléctrica en vibraciones mecánicas que llegan al cilindro vibrante. Por último, y como ya se ha comentado, el emisor (cilindro vibrante) irradia las vibraciones a la muestra a través del aire. El sistema de generación, adaptación y aplicación de ultrasonidos de potencia descrito proporciona un nivel de presión sonora medio en la cámara de secado de 154 dB (García-Pérez et al., 2012), sin flujo de aire.

Durante el secado, un sistema de pesada totalmente automático pesa la muestra a tiempos pre-establecidos (10 min). En el momento de realizar la pesada de las muestras, un mecanismo de desplazamiento vertical (Figura 3.2, ⑨) desplaza las muestras fuera del cilindro vibrante para evitar que los ultrasonidos produzcan vibraciones durante la pesada, que se realiza con un módulo industrial ($6000 \pm 0.01\text{g}$, VM6002-W22, Mettler-Toledo, EEUU).

Para la gestión de las experiencias de secado, se utilizó una aplicación informática desarrollada en LabView (National Instruments, EE.UU.) expresamente para este equipo. Con este sistema de gestión, se pueden definir los valores de consigna de las variables que intervienen en las experiencias de secado (temperatura, velocidad del aire y potencia), el tiempo o porcentaje de pérdida de peso necesario para finalizar el proceso, el intervalo de tiempo entre pesadas y las constantes del algoritmo de control PID. A continuación, se muestra la pantalla frontal de la aplicación (Figura 3.5) y la pantalla secundaria (Figura 3.6),

donde se seleccionan las variables que intervienen en el proceso de secado. La aplicación genera un archivo de datos con toda la información de la experiencia de secado: temperatura, velocidad y humedad relativa del aire, fecha y tiempo del proceso y evolución del peso de la muestra durante el proceso de deshidratación.

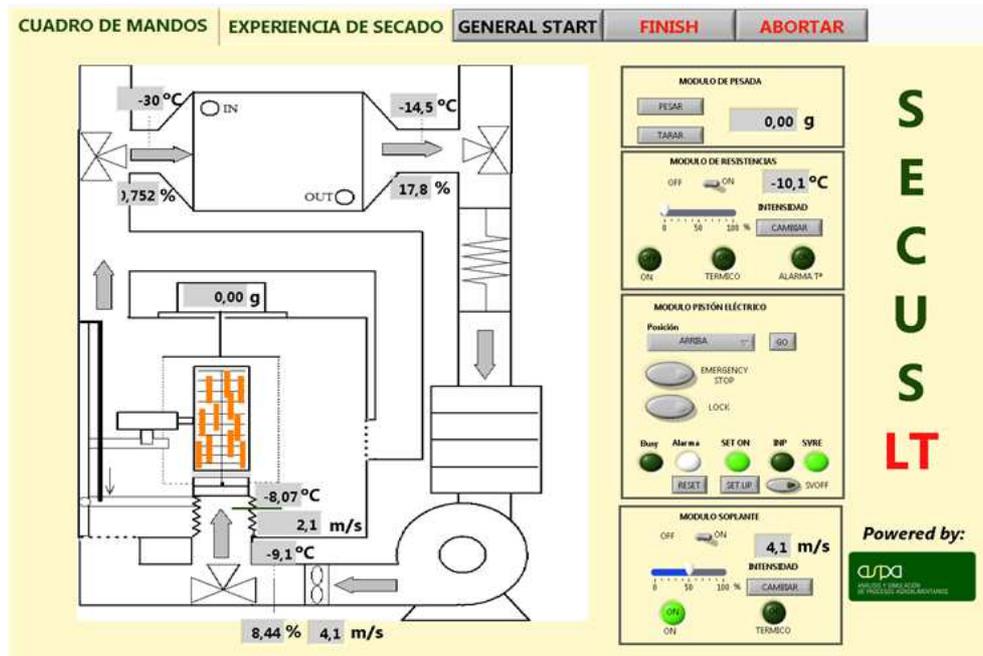


Figura 3.5. Pantalla principal de la aplicación de gestión del secadero.

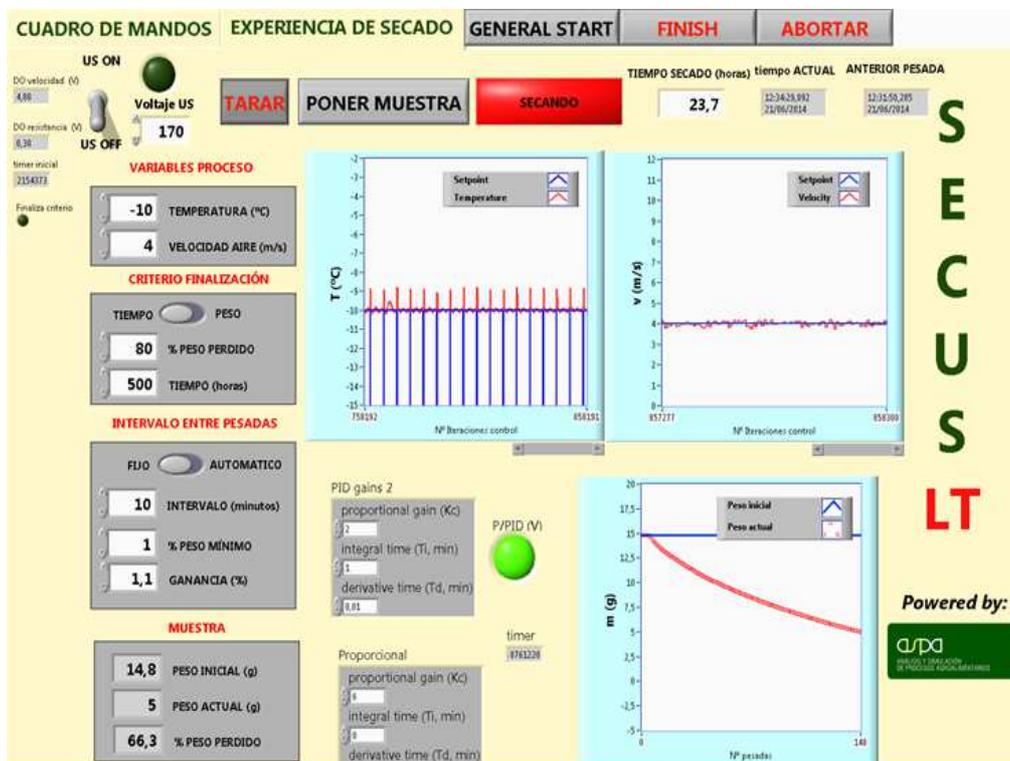


Figura 3.6. Pantalla de selección de los parámetros que intervienen en el proceso de secado.

3.3. Experiencias de secado

En este trabajo, se realizaron experiencias de secado en diferentes condiciones para determinar cómo afectan a los parámetros de calidad de la manzana deshidratada. Así, se realizaron experiencias de secado a una velocidad de aire de 2 m/s a dos temperaturas distintas (10 y -10°C) y con aplicación de ultrasonidos de potencia a distintas potencias (0, 25, 50 y 75W). La potencia hace referencia a la potencia eléctrica con la que se alimenta el transductor ultrasónico. Las experiencias se realizaron hasta alcanzar el 80% de pérdida de peso respecto al peso inicial de la muestra. De cada combinación de temperatura y potencia se llevaron a cabo tres repeticiones (2x4x3), haciendo un total de 24 experiencias de secado diferentes. En la tabla 3.1 se resumen las experiencias realizadas para el estudio de la influencia de la temperatura y de la aplicación de ultrasonidos de potencia en la deshidratación de manzana.

Tabla 3.1. Resumen de las condiciones experimentales del secado de manzana a baja temperatura.

		Potencia (W)			
		0 (SUS)	25	50	75
Temperatura (°C)	10	x3	x3	x3	x3
	-10	x3	x3	x3	x3

3.4. Modelización de las cinéticas de secado

Para describir matemáticamente las cinéticas de secado se empleó un modelo estrictamente difusivo (modelo SRE), el cual sólo tiene en cuenta la resistencia interna a la transferencia de materia, despreciando la resistencia externa. La ecuación diferencial de difusión se obtiene combinando la ley de Fick y el balance microscópico de materia. La ecuación 3.1 muestra dicha expresión para una geometría cúbica, considerando la difusividad efectiva constante y la homogeneidad e isotropía del sólido.

$$\frac{\partial W_p(x, y, z, t)}{\partial t} = D_e \left(\frac{\partial^2 W_p(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_p(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_p(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right) \quad (\text{Ec. 3.1})$$

donde x, y, z son las coordenadas características de la geometría cúbica, W_p es el contenido de humedad local (kg agua (w)/kg materia seca (ms)), t el tiempo (s) y D_e la difusividad efectiva (m^2/s).

Para abordar la resolución de la ecuación 3.1 se necesitan una serie de 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, el contenido en agua de la superficie del sólido alcanzó el equilibrio inmediatamente al entrar en contacto con el aire de secado (Ecuación 3.2)

$$W_p(L, y, z, t > 0) = W_e \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Teniendo en cuenta estas consideraciones, la solución analítica a la ecuación de difusión se expresa en términos de contenido en humedad adimensional, $\Psi(t)$ en la ecuación 3.3 (Crank, 1975).

$$\Psi(t) = \frac{(W(t) - W_e)}{(W_0 - W_e)} = \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n + 1)^2 \pi^2} \exp\left(-\frac{D_e(2n + 1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right) \right]^3 \quad (\text{Ec. 3.3})$$

donde W_e es la humedad de equilibrio de la muestra (kg w/ kg ms), W_0 la humedad inicial (kg w/kg ms), D_e la difusividad efectiva (m^2/s), t el tiempo (s) y L la mitad de la longitud del lado del cubo (m) .

Para obtener la humedad de equilibrio (W_e) se empleó la isoterma de sorción propuesta por Veltchev y Menko (2000) para manzana.

Para cada cinética de secado se identificó la difusividad efectiva mediante el ajuste del modelo a los datos experimentales, minimizando la suma de los errores cuadráticos entre la humedad experimental y la calculada. Para ello, se utilizó la herramienta de optimización Solver disponible en Microsoft Excel™.

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y de diferencias mínimas significativas (LSD, Least Significant Difference) con Statgraphics Plus 5.1 (Statistical Graphics Corporation, Warrenton, USA) para averiguar si las distintas condiciones del proceso de secado (temperatura del aire y potencia aplicada) influyeron significativamente ($p < 0.05$) sobre la difusividad efectiva.

A partir de la varianza explicada (%VAR) (Ecuación 3.4) y del error medio relativo (%MRE) (Ecuación 3.5) se determinó la bondad del ajuste del modelo a los datos experimentales.

$$\%VAR = \left[1 - \frac{S_{xy}^2}{S_y^2} \right] \quad (\text{Ec 3.4})$$

$$\%MRE = \frac{100}{N} \left[\sum_{i=1}^N \frac{|W_{exp} - W_{cal}|}{W_{exp}} \right] \quad (\text{Ec. 3.5})$$

donde S_{xy}^2 es la desviación estándar de la estimación; S_y^2 la desviación estándar de la muestra; N el número de muestras; W_{exp} la humedad media experimental y W_{cal} la humedad calculada mediante el modelo difusivo.

3.5. Parámetros de calidad

Las muestras deshidratadas obtenidas en cada experiencia de secado se sometieron a cuatro ensayos de calidad diferente (Figura 3.7). Así, las muestras deshidratadas fueron reconstituidas en agua y posteriormente se midió su dureza mediante pruebas de textura instrumental. Además, en las muestras deshidratadas se midió el contenido de compuestos fenólicos totales y capacidad antioxidante. A continuación, se describen en detalle los ensayos realizados.

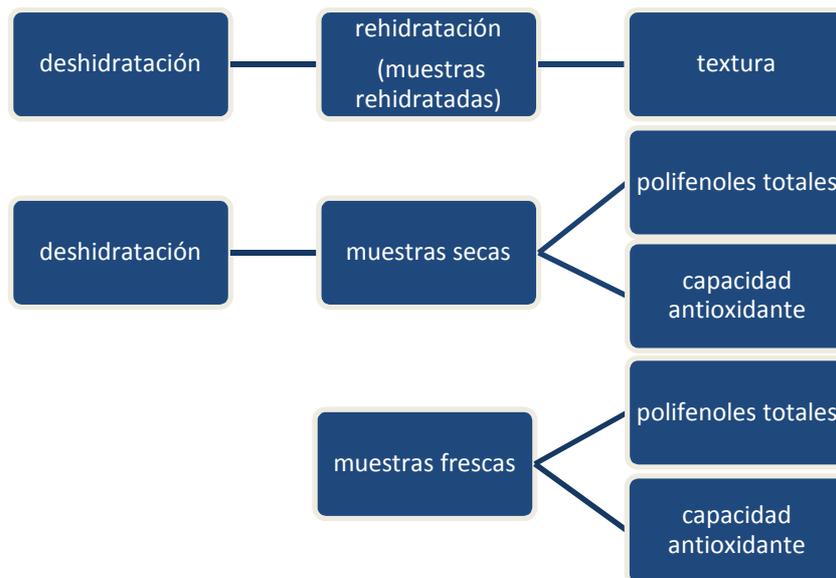


Figura 3.7. Parámetros de calidad analizados en manzana fresca y deshidratada.

3.5.1. Capacidad de rehidratación

La rehidratación es un parámetro de calidad de un producto deshidratado, ya que un producto deshidratado de calidad debe reconstituirse rápidamente y alcanzar un contenido de humedad lo más cercano posible al producto fresco.

La capacidad de rehidratación se midió por inmersión de la muestra deshidratada en agua destilada. La cinética de la reconstitución se evaluó mediante el incremento de peso de las muestras durante la inmersión en agua. Las experiencias se realizaron en un baño con sistema de agitación que permite controlar la temperatura del proceso a $25\pm 1^\circ\text{C}$. En cada experimento, se utilizaron 20 cubos de manzana deshidratada (2.16 ± 0.24 g) que se colocaron dentro de un tamiz plástico. Las muestras se pesaron a tiempos preestablecidos (0, 20, 100, 360, 600, 900, 1200, 1800, 2400, 3600 y 4800 s). Antes de pesar las muestras, se realizó un secado superficial con papel absorbente para eliminar el agua de la superficie de los cubos. Se realizó una experiencia de rehidratación para cada una de las condiciones de secado ensayadas.

3.5.2. Textura

Mediante el estudio de textura instrumental se pretendió cuantificar la dureza de la muestra rehidratada, ya que el producto rehidratado debe alcanzar una consistencia similar al producto fresco. Para ello se llevaron a cabo ensayos de compresión simple mediante un texturómetro (TA-XT2, SMS, Reino Unido) hasta alcanzar el 80% de deformación de la muestra. Los ensayos se realizaron con una sonda plana de aluminio y 75 mm de diámetro (SMS P/75) y a una velocidad de 0.2 mm/s.

A partir de la curva fuerza-tiempo, se determinó la fuerza máxima de compresión (N) de 10-12 cubos de manzana rehidratados para cada experiencia de secado. Las medidas se realizaron en el interior de una cámara de temperatura controlada a 16°C , ya que la textura es dependiente de la temperatura.

3.5.3. Contenido total en compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos se determinaron por el método descrito por Singleton et al. (1999). El reactivo “Folin-Ciocalteu” es una mezcla de ácido fosfowolfrámico y fosfomolibdico de coloración amarilla. Estos compuestos se reducen al interaccionar con los compuestos fenólicos para dar óxido de wolframio y óxido de molibdeno de color azul que se pueden medir con un espectrofotómetro (Helios, Thermo Electron Corporation) a una absorbancia máxima de 765 nm. El contenido en polifenoles totales se expresó como equivalentes de ácido gálico (GAE).

Para poder evaluar la degradación de estos compuestos durante el secado, se llevó a cabo su determinación tanto en la muestra fresca como en la muestra deshidratada. Aproximadamente 1 g de manzana fresca se colocó con 10 mL de etanol (80% v/v), mientras que de manzana deshidratada se utilizaron 0.5 g (5 cubos). La mezcla se homogeneizó con un ultraturrax (T25 Digital, IKA, Germany) a 13000 rpm durante 1 minuto. A continuación se filtró la disolución, obteniéndose así un extracto de los polifenoles de la manzana. Se tomaron 100 μ L del extracto y se colocaron en una cubeta de 4.5 mL con 0.2 mL de reactivo Folin-Ciocalteu y 2 mL de agua destilada. Esta mezcla se dejó a temperatura ambiente durante 3 minutos. Pasado el tiempo de incubación, se añadió a la cubeta 1 mL de carbonato de sodio al 20% (p/v) (Panreac) y se incubó nuevamente durante una hora a temperatura ambiente y en la oscuridad. Por último, se midió la absorbancia de las muestras a 765 nm. Todos los ensayos de este método se realizaron por triplicado (Figura 3.8) para cada experiencia de secado.



Figura 3.8. Cubetas utilizadas en la medida del contenido de compuestos fenólicos. Se observan los diferentes estados de la reacción.

Para poder expresar las absorbancias medidas con el espectrofotómetro en concentraciones equivalentes de ácido gálico, se realizó una recta de calibrado con disoluciones de ácido gálico de concentración conocida y el mismo solvente que fue utilizado para la extracción (etanol 80% v/v). La recta relaciona la concentración de ácido gálico (mg GAE/L) con la absorbancia (765 nm). Los valores de absorbancia deben estar comprendidos entre 0.2 y 1.2, puesto que si son inferiores no hay suficientes compuestos fenólicos para reducir el reactivo Folin-Ciocalteu y si son superiores se traduce en un exceso no medible por espectrofotometría.

Con el fin de identificar el efecto de la temperatura y de la aplicación de ultrasonidos en la calidad de las muestras, se calculó el % de degradación (Ecuación 3.6) de compuestos polifenólicos. Para cada experiencia de secado, se realizó un control de la muestra fresca.

$$\% \text{ degradación} = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \times 100 \quad (\text{Ec. 3.6})$$

donde C_0 es la concentración inicial en el producto fresco (mg GAE/g ms) y C_f la concentración final en el producto deshidratado (mg GAE/g ms).

3.5.4. Capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante se midió mediante el método FRAP (Benzie et al., 1996). Este método se basa en el poder que tiene una sustancia antioxidante para reducir el Fe^{3+} a Fe^{2+} , que es menos antioxidante. El complejo férrico-2,4,6-tripiridil-s-triazina (TPTZ) incoloro es reducido al complejo ferroso, de color azul, que puede medirse a una absorbancia máxima de 595 nm. Cuanto más antioxidante es la muestra, mayor es la reducción y mayor la concentración de Fe^{2+} , por tanto, la señal de absorbancia será más alta.

En este caso, para conseguir un extracto a partir de la muestra se realizó el mismo procedimiento descrito para la medida de los compuesto polifenólicos. Posteriormente, se mezclaron en una cubeta, por este orden, 30 μL de agua destilada, 30 μL de extracto y 900 μL de reactivo FRAP. Dicho reactivo se preparó a partir de tampón acetato sódico anhidro 0.3 M a pH 3.6, $\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ 20mM y TPTZ 10 mM en HCl 40 mM. La proporción utilizada de estos compuestos fue 1:1:1. A continuación las cubetas se incubaron en un baño termostático (Tecton 200, P-selecta, España) a 37°C durante 30 min. Después se midió la absorbancia de las

muestras a 595 nm. Los ensayos de este método se realizaron por triplicado para cada experiencia de secado.

También se realizó una recta de calibrado utilizando el mismo solvente que en la obtención del extracto (etanol 80% v/v) con el fin de expresar las absorbancias en concentraciones conocidas del antioxidante sintético TROLOX.

Como en el caso de los compuestos polifenólicos, se estudió el porcentaje de variación de la capacidad antioxidante de las muestras frescas respecto a las secas (Ecuación 3.6). En este caso, C_0 es la capacidad antioxidante de la muestra fresca y C_f la capacidad antioxidante del producto deshidratado, ambas expresadas como mg TROLOX/g ms.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Cinéticas de secado a baja temperatura

4.1.1. Influencia de la temperatura del aire

La temperatura del aire es una de las variables más relevantes del secado convectivo de alimentos (García-Pérez, 2007). Los fenómenos de transporte de materia (agua) son distintos en función de la temperatura empleada. Así, cuando la temperatura es mayor al punto de congelación, la eliminación del agua se lleva a cabo por evaporación, mientras que si la temperatura es menor a dicho punto, el agua es eliminada por sublimación.

Generalmente, para el secado por aire caliente, un incremento en la temperatura del aire conlleva un aumento de la velocidad de secado (Gallego-Juarez et al., 1999). Esto es debido a que se incrementa la movilidad de las moléculas de agua presentes en el alimento (Ozuna et al., 2011). Un efecto similar al citado ocurre en procesos de secado a baja temperatura, tal y como indican Santacatalina et al. (2014).

En el presente trabajo, se observó que el tiempo de secado en las cinéticas a -10°C fue más elevado que en las experiencias realizadas a 10°C , tal y como se observa en las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3. Este hecho fue especialmente destacable en las experiencias realizadas sin aplicación de ultrasonidos de potencia (SUS) (Figura 4.1), donde el tiempo de secado medio a -10°C fue 40 ± 11 horas, mientras que las muestras secadas a 10°C requirieron 15 ± 3 horas. Es decir, el tiempo de secado se redujo aproximadamente en un 63% en las experiencias SUS cuando la temperatura se incrementó de -10 a 10°C .

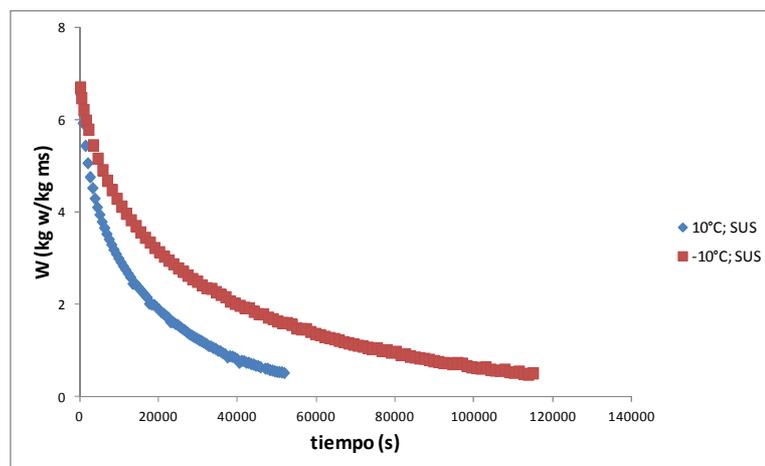


Figura 4.1. Cinéticas de secado sin aplicación de ultrasonidos (SUS) a 10°C y -10°C .

La influencia de la temperatura sobre la velocidad de secado no fue tan acusada cuando se aplicaron ultrasonidos de potencia (US). En todos los casos, cuando la temperatura del aire fue 10°C, las cinéticas fueron más rápidas (Figuras 4.2 y 4.3), pero las diferencias con las experiencias realizadas a -10 °C fueron pequeñas cuando se aplicaron 25 y 50W (Figura 4.2). Mayores diferencias se observaron cuando se aplicó una potencia de 75W (Figura 4.3), ya que las muestras deshidratadas a 10°C necesitaron aproximadamente 4.3 ± 1.1 horas en perder el 80% de peso frente a las 7.4 ± 2.2 horas de las muestras secadas a -10°C. Por tanto, el tiempo de secado disminuyó aproximadamente en un 41%.

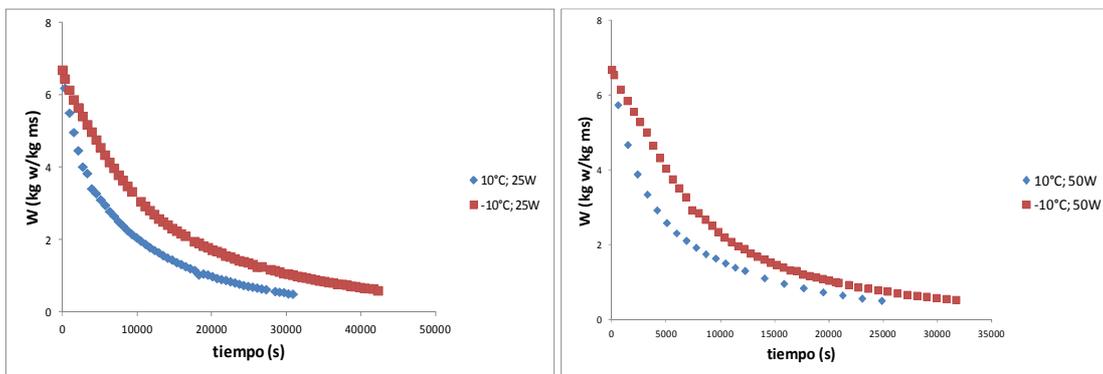


Figura 4.2. Cinéticas de secado a 10 y -10°C con aplicación de ultrasonidos a 25 y 50W.

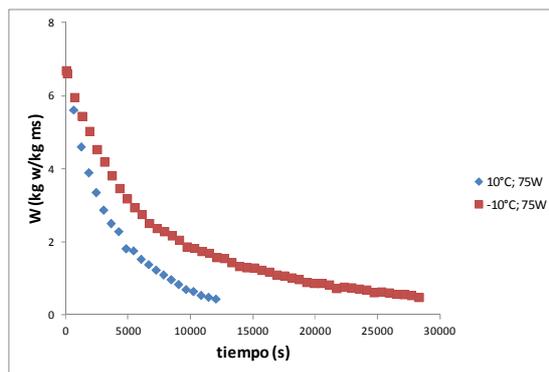


Figura 4.3. Cinética de secado a 10 y -10°C con aplicación de ultrasonidos a 75W.

4.1.2. Influencia de la aplicación de ultrasonidos de potencia

En la Figura 4.4 se muestran las cinéticas de secado realizadas a 10 y -10 °C aplicando diferentes niveles de potencia acústica, que en este caso hace referencia a la potencia eléctrica que se suministra al transductor ultrasónicos. Se observa que independientemente de la potencia aplicada, la velocidad de secado fue más elevada que en las experiencias realizadas sin aplicación de ultrasonidos (SUS).

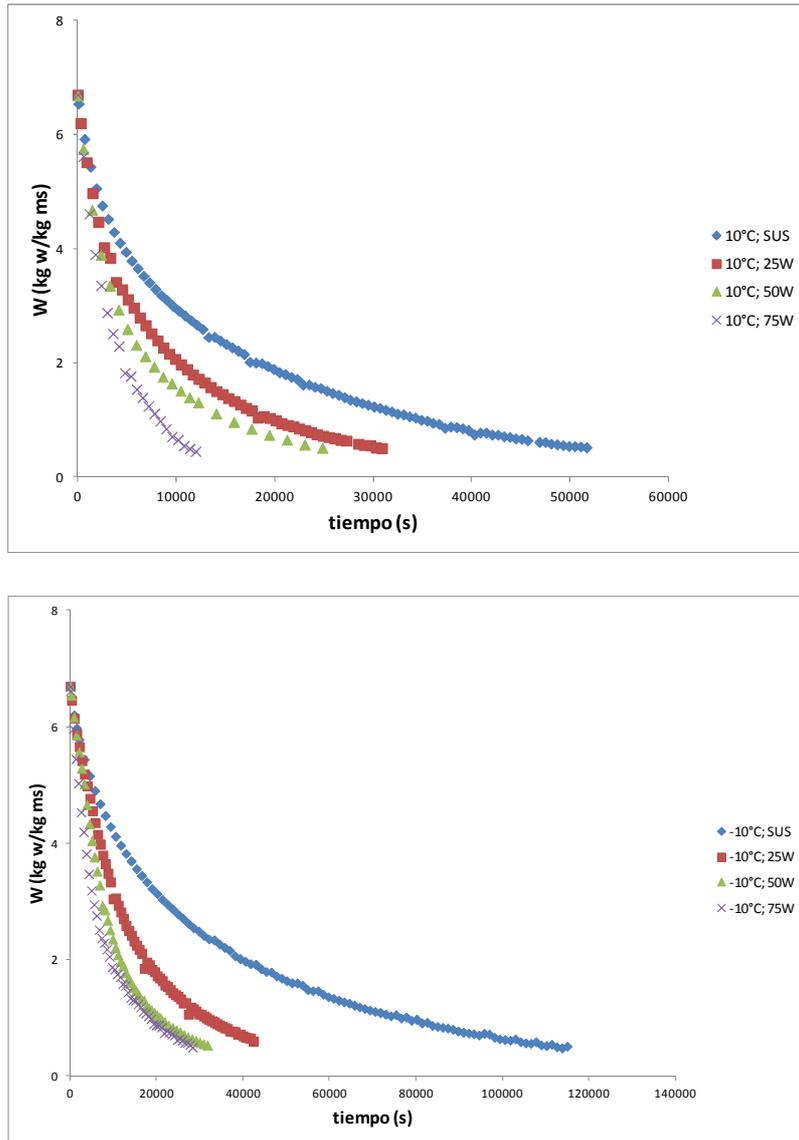


Figura 4.4. Cinéticas de secado a 10 y -10°C sin (SUS) y con aplicación de ultrasonidos de potencia a distintas potencias (25, 50 y 75W).

El incremento de la potencia acústica implicó un aumento de la velocidad de secado, que se tradujo en una reducción del tiempo de secado (Figura 4.4). En la Tabla 4.1 se muestran los valores medios del tiempo de secado para las distintas condiciones ensayadas. Así, en las

experiencias realizadas a -10°C , la aplicación de ultrasonidos a una potencia de 75W redujo el tiempo de secado un 81.5% respecto a las experiencias SUS, pasando de 40 ± 11 horas a 7.4 ± 2 . Este resultado representa uno de los ahorros más importantes en un proceso de secado asistido por ultrasonidos de potencia que aparece en la bibliografía (Cárcel et al., 2007; Ortuño et al., 2010; García-Pérez et al., 2012). Del mismo modo, cuando la potencia empleada fue 25W y 50W hubo un ahorro en el tiempo de secado del 71 y 80% respecto a las experiencias SUS (0W), respectivamente. Es necesario indicar que la mejora del tiempo de secado fue muy importante incluso para las potencias más bajas.

En cuanto a las experiencias realizadas a la temperatura de 10°C , la reducción del tiempo de secado por aplicación de ultrasonidos fue inferior que a -10°C . Así, a 75W, se alcanzó un ahorro de tiempo del 71% respecto a las experiencias SUS, pasando de 14.7 ± 2.8 a 4.3 ± 1.1 horas. Los ahorros de tiempo para las potencias de 25 y 50W en este caso fueron del 42 y 49% respectivamente.

Tabla 4.1. Tiempos de secado (en horas) para las experiencias realizadas a 10 y -10°C sin (SUS, 0W) y con aplicación de ultrasonidos a distintas potencias (25, 50 y 75W)

		Potencia (W)			
		0	25	50	75
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	10	14.7	8.5	7.5	4.3
	-10	40	11.4	8.1	7.4

Como ya se ha mencionado previamente, se puede concluir que a 10°C la efectividad de los ultrasonidos para reducir el tiempo de secado fue inferior que a -10°C . Por tanto, a mayor temperatura del aire, el efecto que producen los ultrasonidos de potencia sobre la velocidad de secado parece disminuir. Los trabajos de García-Pérez et al. (2012) y de García-Pérez et al. (2006) están en concordancia con este hecho. En este sentido, García-Pérez et al. (2012) ponen de manifiesto que cuando la temperatura del aire de secado fue de -10°C , la muestra se encoge menos y se consigue un producto más poroso ya que la eliminación del agua es por sublimación. La elevada porosidad beneficia la absorción de energía acústica y por tanto el fenómeno de compresión-expansión provocado por los ultrasonidos se ve incrementado, favoreciendo así la salida de agua del producto. Además de este efecto estructural de la temperatura, García-Pérez et al. (2006) indican que un incremento en la temperatura del aire supone un aumento de la energía térmica disponible en el medio y como consecuencia, el efecto de la energía mecánica que aportan los ultrasonidos pasa a tener

menos importancia en el proceso de secado. Ambos efectos explican la menor influencia de los ultrasonidos en las experiencias realizadas a 10°C respecto a los efectos observados a -10°C, independientemente de la potencia acústica aplicada.

4.2. Modelización de las cinéticas de secado: modelo difusivo

La modelización permite cuantificar la influencia de las condiciones de secado sobre los parámetros cinéticos que intervienen en el proceso de secado. Las cinéticas de secado obtenidas se modelizaron utilizando un modelo difusivo aplicado a una geometría cúbica (2L= 8.7mm), el cual supone que el transporte de materia está controlado únicamente por la resistencia interna del material (modelo SRE). Mediante el ajuste de este modelo se identificó el valor de la difusividad efectiva (D_e) para cada condición de secado ensayada.

En la tabla 4.2 se muestran los resultados obtenidos al ajustar el modelo difusivo a los datos experimentales. En líneas generales, el ajuste del modelo fue satisfactorio, con valores de varianza explicada superiores al 95% y errores medios relativos en muchos casos cercanos al 10%. Así, se puede afirmar que la hipótesis considerada acerca del control de la difusividad de los mecanismos de transferencia de materia es adecuada y cercana al comportamiento real del proceso.

Tabla 4.2. Modelización de las cinéticas de secado realizadas a 10 y -10°C sin (SUS, 0W) y con aplicación de ultrasonidos de potencia a distintas potencias (25, 50 y 75W).

Temperatura (°C)		Potencia (W)			
		0	25	50	75
10	D_e (10^{-10} m ² /s)	1.12 _b	1.92 _c	2.20 _c	3.51 _d
	VAR (%)	99.78	99.57	99.35	98.31
	MRE (%)	10.07	11.28	9.05	16.4
-10	D_e (10^{-10} m ² /s)	0.431 _a	1.17 _b	1.82 _c	2.17 _c
	VAR (%)	99.28	98.29	97.15	96.78
	MRE (%)	11.77	22.38	27.88	30.74

D_e : difusividad efectiva, VAR (%): varianza explicada, MRE (%): error medio relativo. Los subíndices a, b, c y d muestran grupos significativamente diferentes establecidos según los intervalos LSD ($p < 0.05$).

Se puede observar que en las experiencias realizadas a 10°C, el ajuste del modelo fue mejor que a -10°C (Tabla 4.2). Así, a 10°C la varianza explicada (VAR) fue cercana al 99% y el error relativo se situó cercano al 10%. Mientras que en las experiencias realizadas a -10°C, la bondad del ajuste del modelo a los datos fue dependiente de la potencia acústica aplicada, ya que disminuyó progresivamente a medida que la potencia aumentó. Así, en las experiencias SUS (0W), el ajuste fue muy satisfactorio con valores de varianza explicada y error medio relativo cercanos al 99% y 10%, respectivamente. Sin embargo a 75W, la varianza fue aproximadamente del 97% y el error medio relativo del 30%. En la Figura 4.5 y 4.6 se muestra el ajuste del modelo a los datos experimentales en los diferentes casos. Por lo tanto, se puede afirmar que los ultrasonidos están influyendo en los mecanismos de transferencia de materia, disminuyendo la importancia de la difusión (resistencia interna) en el control de la pérdida de agua respecto a otros mecanismos implicados en el proceso, como la convección (resistencia externa).

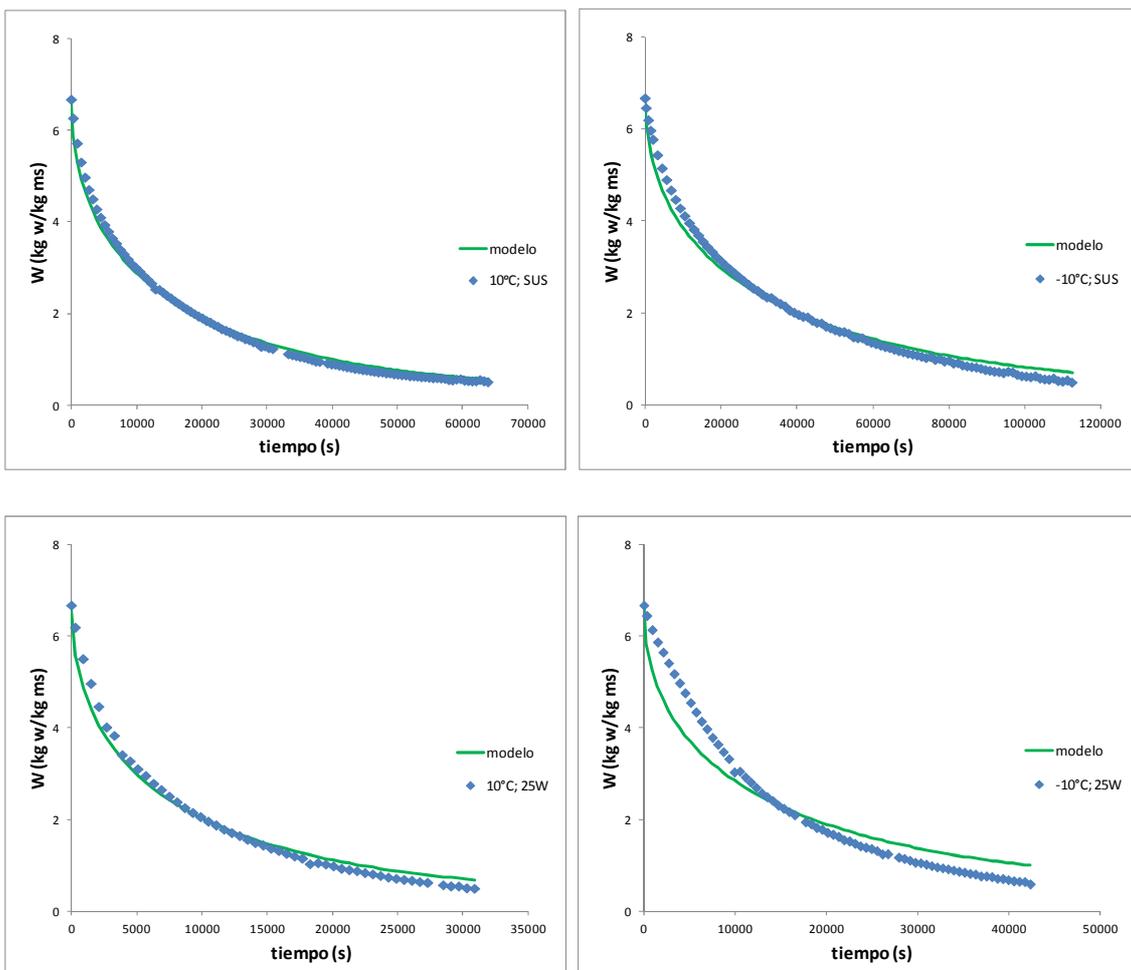


Figura 4.5. Cinéticas de secado y ajuste del modelo difusivo. Experiencias realizadas a 10 y -10°C sin (SUS) y con aplicación de ultrasonidos de potencia a 25W.

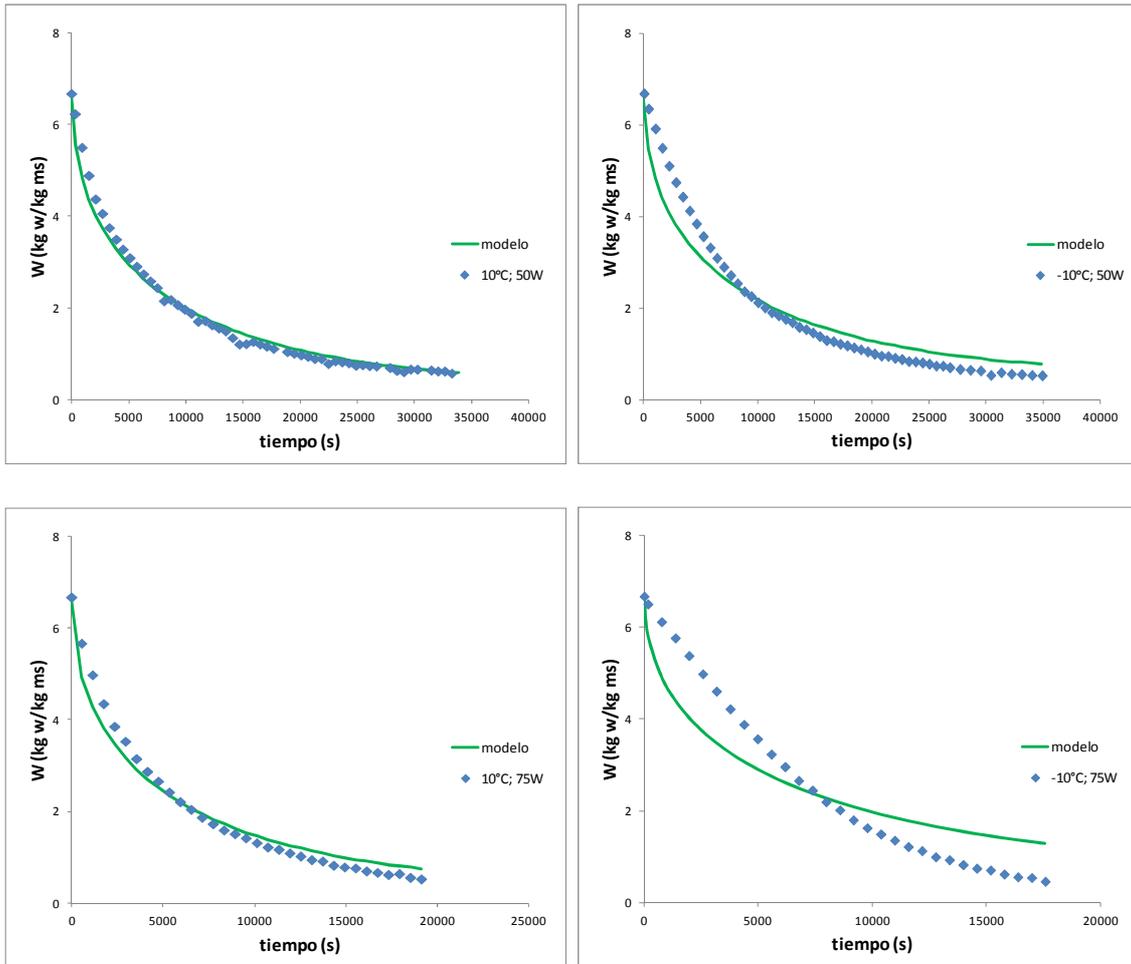


Figura 4.6. Cinéticas de secado y ajuste del modelo difusivo. Experiencias realizadas a 10 y -10°C con aplicación de ultrasonidos de potencia a 50 y 75W.

Los valores de difusividad obtenidos en el presente trabajo estuvieron comprendidos entre 0.43 y $3.51 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. García-Pérez et al. (2012) en su estudio de secado de manzana a -14°C obtuvieron valores de difusividad algo menores, quizá porque la temperatura de secado fue de 4°C menos que en el presente trabajo. Así, estos autores indican que cuando el secado se llevó a cabo sin aplicación de ultrasonidos de potencia, la difusividad efectiva fue de $0.16 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, mientras que al aplicar ultrasonidos aumentó a $0.55 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Por su parte, Santacatalina et al. (2014) obtuvieron en el secado con aplicación de ultrasonidos una difusividad de $1.56 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ cuando la temperatura fue de -10°C y $2.58 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ cuando fue de 10°C , valores muy similares a los obtenidos en este trabajo cuando se aplicó una potencia de 50W.

El efecto de la temperatura del aire sobre la difusividad efectiva ha sido mostrado en multitud de ocasiones en la bibliografía (Cárcel et al., 2007; Ozuna et al., 2014). En el presente estudio se confirmó este hecho puesto que los valores de difusividad efectiva identificados se

vieron afectados de forma significativa ($p < 0,05$) por la temperatura de secado. Así, el aumento de la temperatura del aire (de -10 a 10°C) provocó un aumento de la difusividad efectiva en cada una de las potencias estudiadas. A modo de ejemplo, a -10°C y aplicando una potencia de 75W , la difusividad efectiva fue de $2.17 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, mientras que a 10°C fue de $3.51 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, lo que implica un incremento aproximado del 62%.

La difusividad efectiva también se vio afectada por la aplicación de ultrasonidos de potencia durante la deshidratación, los cuales provocaron un aumento significativo ($p < 0.05$) de la difusividad efectiva en todas las condiciones de secado ensayadas. Así, cuando la temperatura del aire fue de 10°C , la difusividad efectiva en las experiencias sin aplicar ultrasonidos fue de $1.12 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. En cambio, en las realizadas con aplicación de ultrasonidos a 75W fue de $3.51 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, lo que representa un incremento de la difusividad efectiva del 213 %. Puig et al (2012) también confirmaron un aumento de la difusividad efectiva en su estudio de secado de berenjena asistido por ultrasonidos al aumentar la potencia aplicada. El efecto mecánico de compresión y expansión que producen los ultrasonidos en el material que está siendo secado está especialmente relacionado con el aumento de los valores de difusividad efectiva (Puig et al., 2012). Además, tal y como ilustra la Figura 4.7, el incremento de la difusividad efectiva con la potencia aplicada fue lineal. Este hecho también se ha puesto de manifiesto con anterioridad para procesos de secado por aire caliente (Garcia-Perez et al., 2007). Además, la pendiente de las relaciones lineales obtenidas a 10 y -10°C fue muy similar.

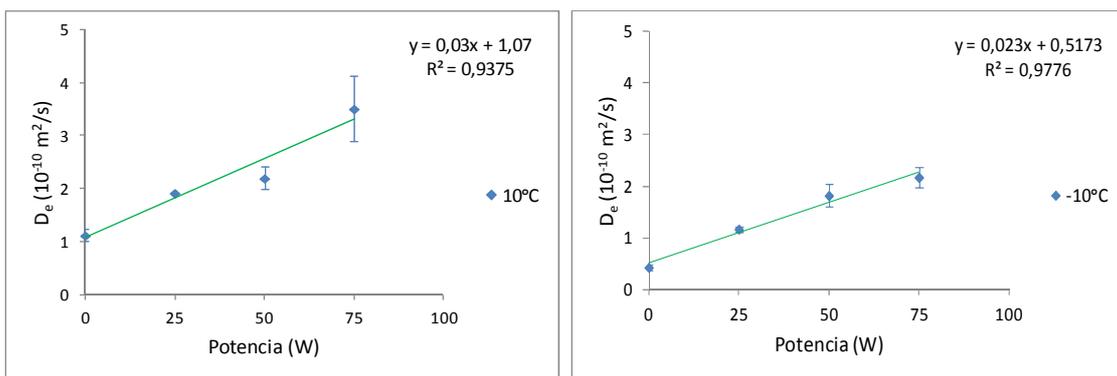


Figura 4.7. Influencia de la potencia acústica aplicada (0, 25, 50 y 75W) en la difusividad efectiva para experiencias de secado realizadas a 10 y -10°C .

4.3. Parámetros de calidad

4.3.1. Rehidratación

La mayoría de los productos deshidratados se reconstituyen antes de ser consumidos, por ello es importante conocer cómo se comportan los productos deshidratados durante su rehidratación. En este trabajo, la cinética de rehidratación se monitorizó a partir de la variación de peso de las muestras. Es necesario indicar que durante la rehidratación hay una ganancia de agua en las muestras, pero también una pérdida de sólidos solubles (Ahmad-Qasem et al., 2014).

Las cinéticas de rehidratación de los cubos de manzana se muestran en la Figura 4.8 y 4.9. Las muestras de manzana quedaron completamente rehidratadas tras 80 min de inmersión en agua. En la Figura 4.8 y 4.9, se observa que las muestras deshidratadas a -10°C se reconstituyeron más rápido que las muestras secadas a 10°C . Además, estas muestras alcanzaron un incremento de peso significativamente ($p < 0.05$) mayor a las muestras secadas a 10°C al final del proceso de rehidratación. Este comportamiento se explica porque durante el secado de manzana a una temperatura por debajo del punto de congelación, la muestra pierde masa sin variar su volumen inicial (Stawczyk et al., 2007), quedando una estructura abierta y porosa que facilita la absorción de agua (Gamboa-Santos et al., 2014). Tal y como se observa en la Figura 4.8 y 4.9, el efecto de la temperatura en la capacidad de rehidratación fue similar en las experiencias con y sin aplicación de ultrasonidos de potencia.

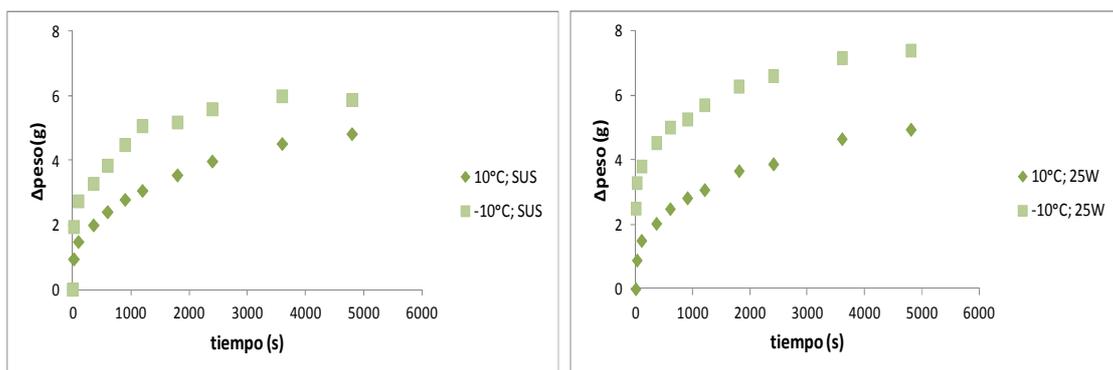


Figura 4.8. Cinéticas de rehidratación de las muestras secadas a 10°C y -10°C sin (SUS) y con aplicación de ultrasonidos a 25W.

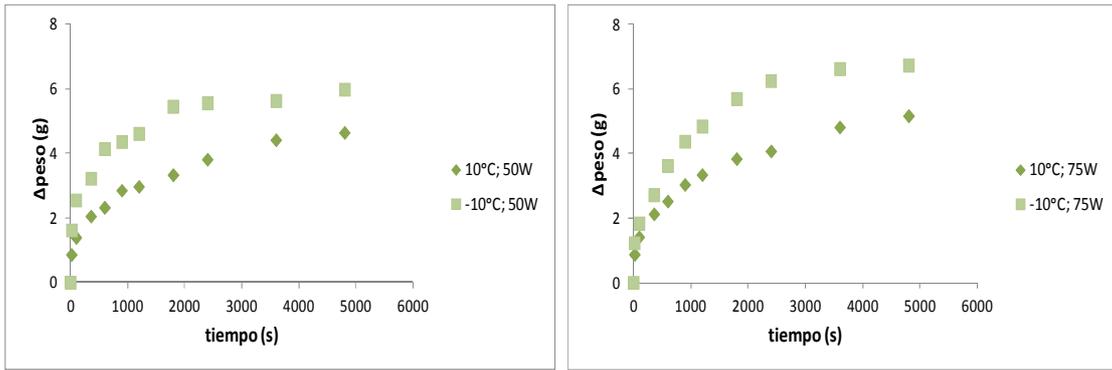


Figura 4.9. Cinéticas de rehidratación de las muestras secadas a 10 y -10°C con aplicación de ultrasonidos a 50 y 75W.

La aplicación de ultrasonidos durante el secado a distintas potencias no produjo diferencias significativas ($p < 0.05$) en el incremento de peso de las muestras rehidratadas durante 80 min. Tal y como se observa en la Figura 4.10, tanto para las experiencias realizadas a 10 como a -10°C, la potencia acústica aplicada no influyó en la capacidad de rehidratación. Únicamente, se encontró un ligero aumento del incremento de peso cuando la muestra fue deshidratada con una temperatura del aire de -10°C aplicando una potencia acústica de 75W. Esta mayor ganancia de agua podría estar ligada a los cambios producidos por los ultrasonidos en la microestructura de la muestra durante el secado (Voda et al., 2012).

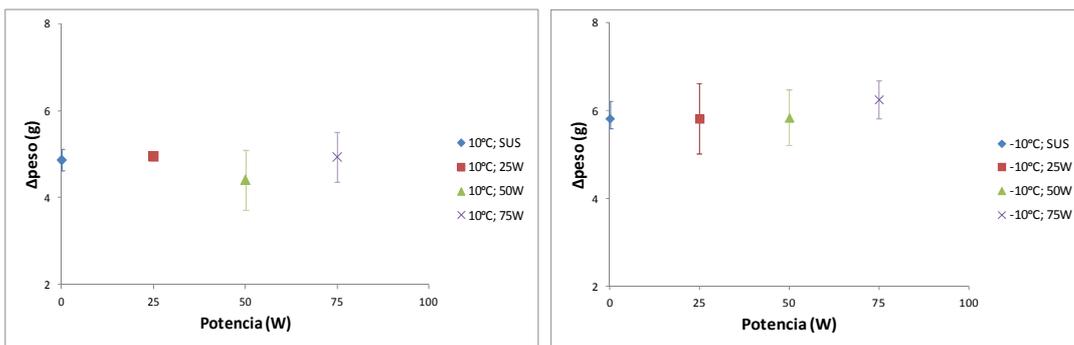


Figura 4.10. Incremento de peso durante la rehidratación de las muestras deshidratadas a 10 y -10°C sin (SUS, 0W) y con aplicación de ultrasonidos de potencia a diferentes potencias (25, 50 y 75W). Se muestra los valores medios \pm la desviación estándar.

4.3.2. Textura

El ablandamiento y la pérdida de la textura original es uno de los principales problemas que aparecen en los productos rehidratados. Estos dos parámetros son de gran importancia a la hora de aceptar el producto final. Para evaluar la textura del producto rehidratado se midió su dureza. Se obtuvieron medidas objetivas mediante pruebas de textura instrumental con el fin de poder valorar el daño sufrido por los tejidos durante la operación de secado.

La dureza de la manzana fresca (37.1 ± 4.6 N) fue significativamente ($p < 0.05$) superior a las muestras secadas y posteriormente rehidratadas (entre 20.8 ± 4.5 y 33.5 ± 6.6 N). Esto es debido a que el secado produce una degradación de la estructura de la manzana. Por ello, las muestras rehidratadas no son capaces de recuperar la textura inicial.

La dureza obtenida tras la rehidratación de las muestras secadas a 10°C estuvo alrededor de 29.3 ± 4.5 N, mientras que a -10°C , la dureza se situó en 23.2 ± 2.4 N. Por tanto, las muestras secadas a 10°C y posteriormente rehidratadas, alcanzaron una dureza significativamente ($p < 0.05$) mayor a las secadas a -10°C (Figura 4.11 y 4.12). Este hecho podría explicarse considerando que la congelación de la muestra provoca la formación de cristales de hielo, los cuales degradan la estructura de la muestra. Así, las muestras secadas a -10°C , fueron capaces de absorber más agua durante la rehidratación, pero presentan una textura más blanda. Este comportamiento se encontró para todas las potencias acústicas aplicadas, excepto en las experiencias realizadas a 75W, donde las muestras secadas a 10 y -10°C presentaron durezas similares.

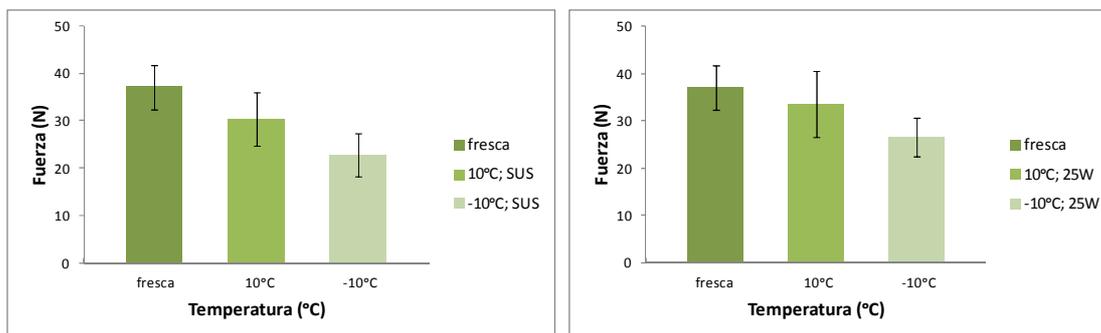


Figura 4.11. Dureza (Fuerza máxima de compresión) de las muestras rehidratadas después de haber sido secadas a 10 y -10°C sin (SUS) y con aplicación de ultrasonidos de potencia a 25W. Se muestran los valores medios \pm desviación estándar.

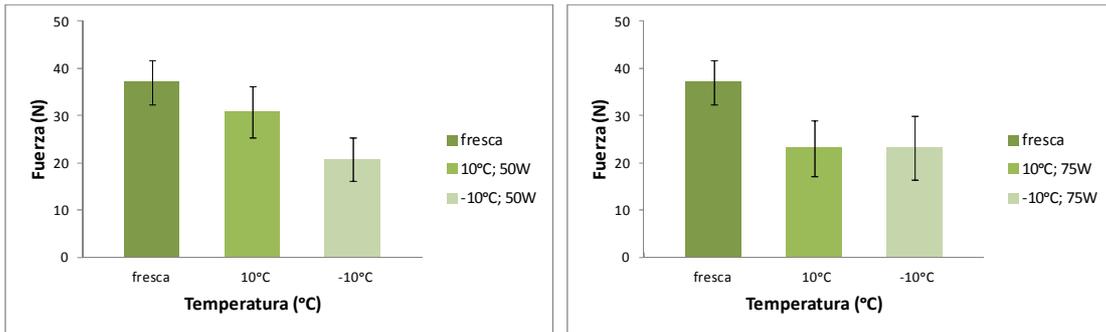


Figura 4.12. Dureza (Fuerza máxima de compresión) de las muestras rehidratadas después de haber sido secadas a 10 y -10°C con aplicación de ultrasonidos de potencia a 50 y 75W. Se muestran los valores medios \pm desviación estándar.

En cambio, la potencia acústica aplicada no influyó de forma significativa ($p < 0.05$) en la dureza de las muestras secadas a 10 y -10°C (Figura 4.13). A 10°C se observó un descenso de la dureza con la potencia aplicada, pero no llegó a ser significativo ($p < 0.05$). La menor dureza de las muestras secadas a 10°C puede deberse al efecto de degradación estructural asociado a los ultrasonidos de potencia (Puig et al., 2012). En cuanto a las muestras secadas a -10°C, el efecto de la congelación sobre la degradación de la estructura del producto es tan grande que la degradación asociada a los ultrasonidos puede considerarse despreciable.

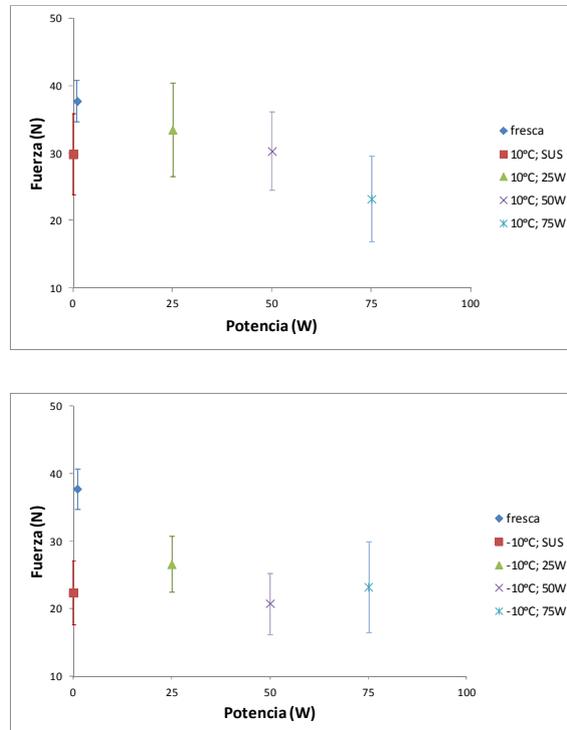


Figura 4.13. Dureza (Fuerza máxima de compresión) de las muestras rehidratadas después de haber sido secadas a 10 y -10°C sin (SUS, 0W) y con aplicación de ultrasonidos de potencia a distintas potencias (25, 50 y 75W). Se muestran los valores medios \pm desviación estándar.

4.3.3. Compuestos fenólicos totales

Los compuestos fenólicos son abundantes en manzana. Sus propiedades antioxidantes contribuyen a reducir el riesgo de padecer enfermedades coronarias, asma, diabetes, cáncer y enfermedades del sistema inmunitario (Karaman et al., 2010). Durante el proceso de deshidratación, la concentración de estos compuestos se ve reducida notablemente, por ello es importante encontrar una combinación óptima de tiempo y temperatura de secado que minimice las pérdidas de estos compuestos bioactivos.

El contenido en compuestos fenólicos totales (CFT) medido en la manzana fresca fue 6.7 ± 1.3 mg ácido gálico (GAE)/g ms, significativamente ($p < 0.05$) más elevado que el obtenido en las muestras deshidratadas 2.2 ± 0.7 mg GAE/g ms. Por tanto, el proceso de secado disminuyó alrededor de un 67% la concentración de polifenoles, independientemente de las condiciones de secado llevadas a cabo (Figura 4.14). Es necesario indicar que dada la variabilidad experimental de la manzana fresca, se determinó para cada experiencia el porcentaje de degradación de compuestos fenólicos totales tomando como control la muestra fresca de la que se obtuvieron las muestras.

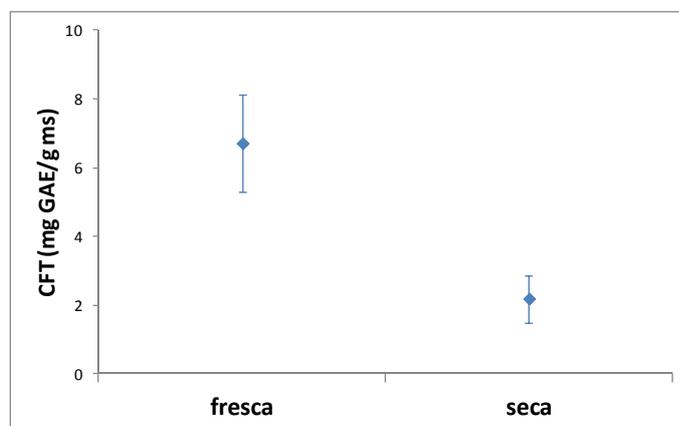


Figura 4.14. Compuestos Fenólicos Totales (CFT) en manzana fresca y en manzana deshidratada.

El porcentaje de degradación de compuestos fenólicos totales fue muy similar para las muestras secadas a 10°C (67.6%) y a -10°C (66.8%). Las diferencias entre ambos valores no fueron significativas ($p < 0.05$), por tanto se puede afirmar que la temperatura del aire no influyó en el porcentaje de degradación de polifenoles (Figura 4.15).

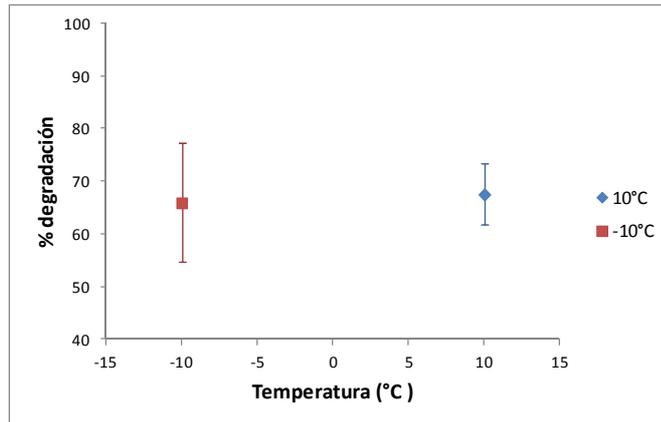


Figura 4.15. Porcentaje de degradación de compuestos fenólicos totales para las muestras secadas a 10 y a -10°C.

La aplicación de ultrasonidos no influyó de manera significativa ($p < 0.05$) en la degradación de compuestos fenólicos. De igual modo, tampoco se observó una influencia significativa ($p < 0.05$) de la potencia acústica aplicada. Aunque sí cabe destacar que, cuando la potencia aplicada fue de 75W, tanto para 10 como para -10°C, el porcentaje de degradación de compuestos fenólicos estuvo en torno al 58%, inferior al obtenido para 25 y 50W. Esto puede explicarse considerando que la elevada reducción del tiempo de secado a 75W disminuye el tiempo de exposición de los polifenoles al aire de secado, disminuyendo de este modo, su degradación (Ahmad-Qasem et al., 2013) (Figura 4.16).

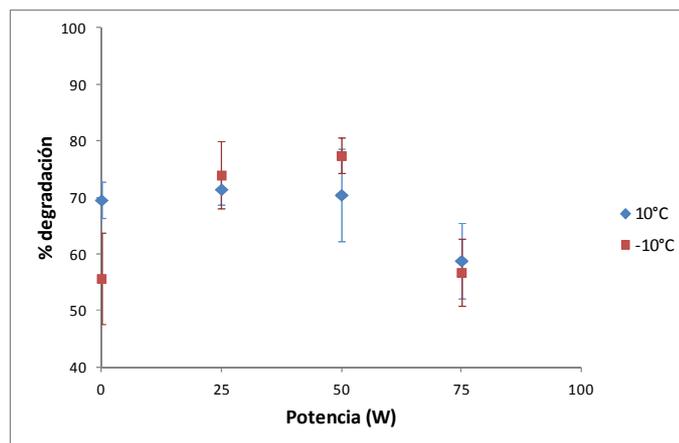


Figura 4.16. Porcentaje de degradación de compuestos polifenólicos totales entre las muestras frescas y las deshidratadas a dos temperaturas distintas (10 y -10°C) sin (SUS, 0W) y con aplicación de ultrasonidos de potencia a distintas potencias (25, 50 y 75W). Se muestran los valores medios \pm desviación estándar.

4.3.4. Capacidad antioxidante

De igual modo que en el caso de los compuestos fenólicos totales, el secado influyó significativamente ($p < 0.05$) en la capacidad antioxidante de la manzana. Independientemente de las condiciones de secado empleadas, el análisis de la capacidad antioxidante con el método FRAP demostró que la manzana fresca tuvo una capacidad antioxidante 2.4 veces mayor a la de las muestras deshidratadas. Así, el valor medio obtenido para las muestras frescas fue de 15.7 ± 2.7 mg TROLOX/g ms, mientras que para las secas fue de 6.5 ± 2.8 mg TROLOX/g ms. Este resultado representa una degradación cercana al 58.6%.

Respecto a las muestras deshidratadas, la temperatura utilizada en el proceso de secado no influyó de manera significativa ($p < 0.05$) en la capacidad antioxidante. Las diferencias más importantes entre ambas temperaturas (10 y -10°C) se encontraron en las experiencias realizadas a 25W, donde la capacidad antioxidante (CA) fue de 3.7 mg TROLOX/g ms para la muestra deshidratada a -10°C frente a los 9.8 mg TROLOX/g ms de la muestra deshidratada a 10°C (Figura 4.17). Este incremento de la capacidad antioxidante a 10°C también se observó en las experiencias realizadas a 50W, y en menor medida cuando la potencia acústica aplicada fue de 75W (Figura 4.18). La mayor capacidad antioxidante de las muestras secadas a 10°C puede estar relacionada con el menor tiempo de secado comparado con las experiencias realizadas a -10°C , ya que de este modo se disminuye el tiempo de exposición al aire. Además, la congelación previa de las muestras deshidratadas a -10°C también pudo influir en la disminución del potencial antioxidante debido a la degradación celular que conlleva (Ahmad-Qasem et al, 2013).

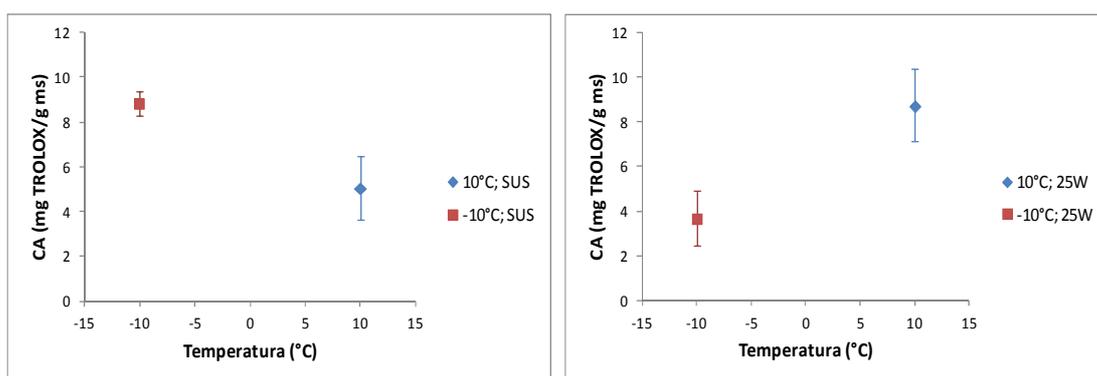


Figura 4.17. Capacidad antioxidante (CA) de las muestras deshidratadas sin (SUS, 0W) y con aplicación de ultrasonidos a 25W a dos temperaturas distintas (10 y -10°C). Se muestran los valores medios \pm desviación estándar.

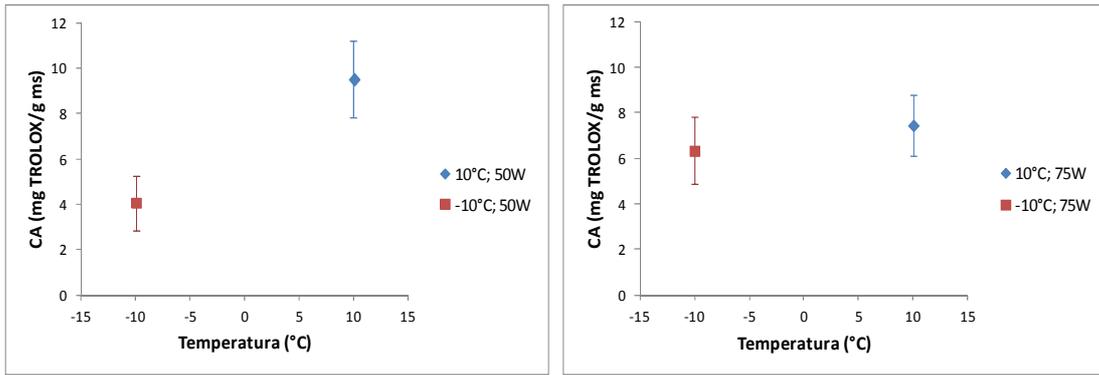


Figura 4.18. Capacidad antioxidante (CA) de las muestras deshidratadas con aplicación de ultrasonidos de potencia a 50 y 75W a dos temperaturas distintas (10 y -10°C). Se muestran los valores medios \pm desviación estándar.

La aplicación de ultrasonidos en las experiencias de secado no influyó de forma significativa ($p < 0.05$) en la capacidad antioxidante. A 10°C la degradación de capacidad antioxidante entre las muestras frescas y secas fue muy similar para todas las potencias aplicadas. En cambio, cuando la temperatura de secado fue de -10°C, los mayores porcentajes de degradación se encontraron cuando la potencia aplicada fue de 25 y de 50W (Figura 4.19).

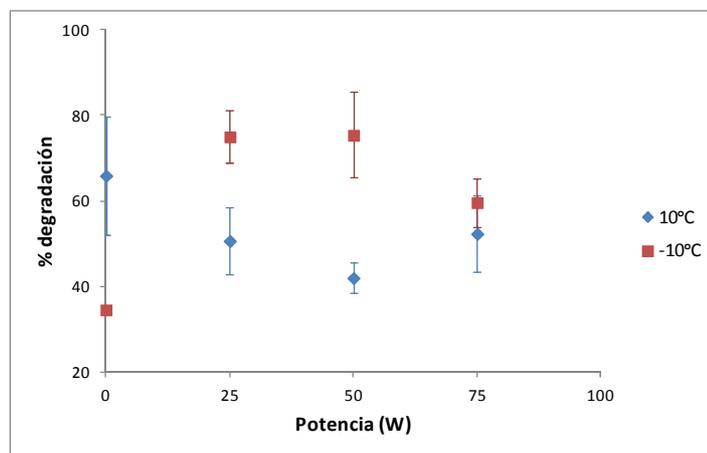


Figura 4.19. Porcentaje de degradación de la capacidad antioxidante entre las muestras frescas y las deshidratadas a dos temperaturas distintas (10 y -10°C) sin (0W) y con aplicación de ultrasonidos de potencia a distintas potencias (25, 50 y 75W). Se muestran los valores medios \pm desviación estándar.

5. CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se pueden obtener de este trabajo se incluyen a continuación:

- La aplicación de ultrasonidos de potencia redujo de manera significativa el tiempo de secado de manzana a baja temperatura. Además, cuando la temperatura de secado fue inferior al punto de congelación, el efecto de los ultrasonidos fue más intenso.
- La mejora cinética debido a la aplicación de ultrasonidos fue dependiente de la potencia acústica aplicada. Así, cuanto mayor fue la potencia aplicada, menor fue el tiempo de secado.
- Los ultrasonidos provocaron cambios en los fenómenos de transporte, tal y como se pudo observar a partir del análisis de los resultados del modelo difusivo.
- La temperatura del aire de secado influyó en la capacidad de rehidratación ya que las muestras secadas a -10°C rehidrataron a mayor velocidad y alcanzaron una capacidad de rehidratación mayor que las secadas a 10°C .
- Las muestras secadas a 10°C fueron más duras que las secadas a -10°C , alcanzando una textura tras la rehidratación más parecida a la muestra fresca.
- Los ultrasonidos no influyeron en la capacidad de rehidratación ni en la dureza.
- En las condiciones de secado evaluadas, no se observó ninguna influencia de las variables de secado en el contenido de compuestos polifenólicos totales ni en la capacidad antioxidante de la manzana deshidratada.
- En vista de los resultados obtenidos, se puede considerar que el secado a baja temperatura asistido por ultrasonidos de potencia es una novedosa tecnología con un gran potencial a nivel industrial para la deshidratación de manzana, debido a la mejora cinética que conlleva y a su efecto despreciable sobre la calidad del producto deshidratado.

6. BIBLIOGRAFÍA

6. BIBLIOGRAFÍA

Ahmad-Qasem, M. H., Barraji3n-Catal3n, E., Micol, V., Mulet, A., Garc3a-P3rez, J.V. (2013). Influence of freezing and dehydration of olive leaves (var. Serrana) on extract composition and antioxidant potential. *Food Research International*, 50: 189-196.

Ahmad-Qasem, M.H., Santacatalina, J.V., Barraji3n-Catal3n, E., Micol, V., C3rcel, J.A., Garc3a-P3rez, J.V. (2014). Influence of drying on the retention of olive leaf polyphenols infused into dried apple. *Food and Bioprocess Technology: An International Journal*. In press.

Alves-Filho, O., Eikevik, T., Mulet, A., Garau, C., Rosell3, C. (2007). Kinetics and mass transfer during atmospheric freeze drying of red pepper. *Drying Technology*, 25: 1155-1161.

AOAC (1997). Official methods of analysis. Association of Official Analytical Chemist, Arlington, Virginia, EEUU.

Askari, G.R., Emam-Djomeh, Z., Mousavi, S.M. (2009). An investigation of the effects of drying methods and conditions on drying characteristics and quality attributes of agricultural products during hot air and hot air/microwave-assisted dehydration. *Drying Technology*, 27: 831-841.

Awad, T.S., Moharram, H.A., Shaltout, O.E., Asker, D., Youssef, M.M. (2012). Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: a review. *Food Research International*, 48: 410-427.

Benali, M., Kudra, T. (2010). Process intensification for drying and dewatering. *Drying Technology*, 28: 1127-1135.

Benedito, J., Simal, S., Clemente, G., Mulet, A. (2006). Manchego cheese texture evaluation by ultrasonics and surface probes. *International dairy journal*, 16: 431-438.

Benzie, I.F.F., Strain, J.J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": the FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239. 70-76.

Camarena, F., Martinez-Mora, J.A. (2006). Potential of ultrasound to evaluate turgidity and hydration of the orange peel. *Journal of Food Engineering*, 75: 503-507.

C3rcel, J.A., Garc3a-P3rez, J.V., Riera, E., Mulet, A. (2007). Influence of high-intensity ultrasound on drying kinetics of persimmon. *Drying Technology*, 25: 185-193.

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.

Chemat, F., Huma, Z., Khan, M.K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18: 813-835.

Claussen, I.C., Ustad, T.S., Strommen, I., Walde, P.M. (2007). Atmospheric freeze drying: a review. *Drying Technology*, 25: 947-957.

Corona, E., García-Pérez, J.V., Gómez Álvarez-Arenas, T.E., Watson, N., Povey, M.J.W., Benedito, J. (2013). Advances in the ultrasound characterization of dry-cured meat products. *Journal of Food Engineering*, 119: 464-470.

Corona, E., García-Pérez, J.V., Santacatalina, J.V., Ventanas, S., Benedito, J. (2014). Ultrasonic characterization of pork fat crystallization during cold storage. *Journal of Food Science*, 79: E828-E838.

Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion*. Oxford University Press, Reino Unido.

Eroski Consumer, 2014. <http://frutas.consumer.es/documentos/frescas/manzana/intro.php>
(Fecha de consulta: 27-05-2014)

Gallego-Juárez, J.A., Rodríguez-Corral, G., Gálvez-Moraleda, J.C., Yang, T.S. (1999). A new high-intensity ultrasonic technology for food dehydration. *Drying Technology*, 17: 597-608.

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.

García-Pérez, J.V. (2007). Contribución al estudio de la aplicación de ultrasonidos de potencia en el secado convectivo de alimentos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

García-Pérez, J.V., Roselló, C., Cárcel, J.A., De la Fuente, S., Mulet, A. (2006). 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., Benedito, J., Mulet, A. (2007). Power ultrasound mass transfer enhancement in food drying. *Food and Bioproducts Processing*, 85: 247-254.

García-Pérez, J.V., Ozuna, C., Ortuño, C., Cárcel, J.A., Mulet, A. (2011). Modeling ultrasonically assisted convective drying of eggplant. *Drying Technology*, 29: 1499-1509.

García-Pérez, J.V., Cárcel, J.A., Riera, E., Roselló, C., Mulet, A. (2012). Intensification of low-temperature drying by using ultrasound. *Drying Technology*, 30: 1199-1208.

Karaman, S., Tütem, E., Baskan, K.S., Apak, R. (2010). Comparison of total antioxidant capacity and phenolic composition of some apple juices with combined HPLC-CUPRAC assay. *Food Chemistry*, 120: 1201-1209.

MAGRAMA, 2013. <http://www.magrama.gov.es> (Fecha de consulta: 30-05-2014)

Marín B, E., Lemus M, R., Flores M, V., Vega G, A. (2006). La rehidratación de alimentos deshidratados. *Revista Chilena de Nutrición*, 33.

Mulet, A., Blasco, M., García-Reverter, J., García-Pérez, J.V. (2005). Drying kinetics of *curcuma longa* rhizomes. *Journal of Food Science*, 70: 318-323.

Mulet, A., Cárcel, J.A., Sanjuán, N., García-Pérez, J.V. (2010). Food dehydration under forced convection conditions. In *Current trends in chemical engineering*, By Delgado, J. Studium Press L.L.C, Houston, Texas, 153-177.

Mulet, A., Cárcel, J.A., García-Pérez, J.V., Riera, E. (2011). Ultrasound-assisted hot air drying of foods. *Ultrasound technologies for Food and Bioprocessing*, 19: 511-534.

Ortuño, C., Pérez-Munuera, I., Puig, A., Riera, E., García-Pérez, J.V. (2010). Influence of power ultrasound application on mass transport and microstructure of orange peel during hot air drying. *Physics Procedia*, 3: 153-159.

Ozuna, C., Cárcel, J.A., García-Pérez, J.V., Mulet, A. (2011). Improvement of water transport mechanisms during potato drying by applying ultrasound. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91: 2511-2517.

Ozuna, C., Cárcel, J.A., Wale, P.M., García-Pérez, J.V. (2014). Low-temperature drying of salted cod (*Gadus morhua*) assisted by high power ultrasound: kinetics and physical properties. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 23: 146-155.

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 Bioprocesses Processing*, 90: 624-632.

Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *Journal of Food Engineering*, 49: 311-319.

Rodríguez, Ó., Santacatalina, J.V., Simal, S., García-Pérez, J.V., Femenia, A., Roselló, C. (2014). Influence of power ultrasound application on drying kinetics of apple and its antioxidant and microstructural properties. *Journal of Food Engineering*, 129: 21-29.

Sanjuán, N., Simal, S., Bon, J., Mulet, A. (1999). Modelling of broccoli stems rehydration process. *Journal of Food Engineering*, 42: 27-31.

Santacatalina, J.V., Rodríguez, O., Simal, S., Cárcel, J.A., Mulet, A., García-Pérez, J.V. (2014). Ultrasonically enhanced low-temperature drying of apple: Influence on drying kinetics and antioxidant potential. *Journal of Food Engineering*, 138: 35-44.

Schössler, K., Jäger, H., Knorr, D. (2012a). Novel contact ultrasound system for the accelerate freeze-drying of vegetables. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 16: 113-120.

Schössler, K., Thomas, T., Knorr, D. (2012b). Modification of cell structure and mass transfer in potato tissue by contact ultrasound. *Food Research International*, 49: 425-431.

Singleton, V.L., Orthofer, R., Lamuela-Raventós, R.M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods of Enzymology*, 299: 152-178.

Stawczyk, J., Li, S., Witrowa-Rajchert, D., Fabisiak, A. (2007). Kinetics of atmospheric freeze-drying of apple. *Transport in porous media*, 66: 159-172.

Vega-Mercado, H., Góngora-Nieto, M.M., Barbosa-Cánovas, G.V. (2001). Advances in dehydration of foods. *Journal of Food Engineering* 49: 271-289.

Veltchev, Z.N., Menkov, N.D. (2000). Desorption isotherms of apples at several temperatures. *Drying Technology*, 18: 1127-1137.

Voda, A., Homan, N., Witek, M., Duijster, A., Van Dalen, G., Van Der Sman, R., Nijse, J., Van Vliet, L., Van As, H., Van Duynhoven, J. (2012). The impact of freeze-drying on microstructure and rehydration properties of carrot. *Food Research International*, 49: 687-693.

Wu, L., Orikasa, T., Ogawa, Y., Tagawa, A. (2007). Vacuum drying characteristics of eggplants. *Journal of Food Engineering*, 83: 422-429.

