

Aplicaciones industriales del calentamiento con energía microondas

J. Ángel Menéndez
Ángel H. Moreno

Aplicaciones industriales del calentamiento con energía microondas

Primera Edición

Editores

J. Ángel Menéndez
Ángel H. Moreno



Universidad
Técnica de
Cotopaxi

AVALES

Dr. Ignacio Martín Gullón
Catedrático de Ingeniería Química
Universidad de Alicante, España

Dra. Teresa Valdés Solís
Científica Titular
INCAR-CSIC, España

Dr. Rafael Mato Chaín
Director del Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente
Universidad de Valladolid, España

Reservados todos los derechos. Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta obra. Se deja constancia que el contenido del texto es original y de absoluta responsabilidad de sus autores. La infracción de dichos derechos puede constituir un delito contra la propiedad intelectual.

© Copyright

EDITORES

PhD. J. Ángel Menéndez
PhD. Ángel H. Moreno

CONCEPTO CREATIVO

Taller de Estudio de Diseño y Publicidad
Universidad Técnica de Cotopaxi
Dis. Hipatia Galarza Barrionuevo Mg.C

DIRECCIÓN EDITORIAL, DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

Gabriela Pallo Suntaxi

DISEÑO DE PORTADA

Arq. Enrique Lanas L. Mg.C
Dis. Hipatia Galarza Barrionuevo Mg.C
Gabriela Pallo Suntaxi

ILUSTRACIONES

Jhonathan Suntaxi
Carlos Vargas
Laura Veloz

EDITORIAL UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
Ave. Simón Rodríguez s/n, Barrio El Ejido,
Sector San Felipe, Latacunga, Ecuador

ISBN Electrónico 978-9978-395-34-9
Primera Edición, 2017

¿CÓMO CITAR ESTE LIBRO?

Menéndez, J.A., Moreno, A.H. (Eds.). (2017). Aplicaciones industriales del calentamiento con energía microondas. Latacunga, Ecuador: Editorial Universidad Técnica de Cotopaxi, Primera Edición, pp 315. ISBN: 978-9978-395-34-9

Prólogo

La Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC) tiene como uno de sus Objetivos Estratégicos fundamentales *“fortalecer la actividad investigativa, de forma tal que permita crear y ampliar el conocimiento científico y tecnológico, así como diagnosticar la problemática social, cultural, económica y productiva de la región y del país para incidir en su desarrollo”*. Entre las Políticas de Investigación Científica y Tecnológica de nuestra institución se encuentra *“impulsar la cooperación científica y tecnológica, en el ámbito nacional e internacional, mediante la suscripción de convenios que permitan realizar investigaciones a través de la participación en redes de investigación”*.

Para darle cumplimiento al citado objetivo estratégico, y en correspondencia con la política de investigación indicada, la UTC ha firmado varios convenios de cooperación con diferentes universidades y centros de investigación nacionales e internacionales. Entre ellos se destaca el *Acuerdo Marco de Colaboración suscrito entre la UTC y la Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)*, de España, firmado el 24 de agosto de 2016.

Uno de los frutos principales de este acuerdo, recogidos hasta la fecha, lo constituye la publicación del presente libro *“Aplicaciones industriales del calentamiento con energía microondas”*. En esta obra, de 15 capítulos, colaboraron un total de 27 prestigiosos profesores e investigadores, 24 de ellos pertenecientes a diferentes universidades y centros de investigación extranjeros y 3 de nuestra querida institución. El desglose de los autores, por instituciones extranjeras participantes, es el siguiente: 27 del INCAR-CSIC, de España; 4 de la Universidad de Córdoba y 3 de la Universidad Politécnica de Cartagena, ambas de España; uno de la Universidad de *Cranfield* y otro del *Imperial College*, del Reino Unido; y, por último, uno de la empresa Pasek Minerales SAU, La Coruña, España.

En el libro se recogen algunas de las principales aplicaciones que en la actualidad ha encontrado el calentamiento con energía microondas, como sustituto del calentamiento convencional, en diferentes procesos industriales. Entre estas aplicaciones se analiza el empleo de la tecnología microondas en procesos tales como el secado de semillas y productos hortofrutícolas, la pirolisis de biomasa, el reformado de metano con CO₂, la molienda de

carbones y minerales, la sinterización de polvos de cerámicos, metales, aleaciones y materiales compuestos de matriz cerámica o metálica, la síntesis de polímeros, fundamentalmente, la síntesis de geles orgánicos y de xerogeles de carbono, la activación de materiales biomásicos, la regeneración de adsorbentes, procesos catalíticos y de extracción, reacciones orgánicas, la digestión de muestras sólidas y la preparación de muestras.

El conocimiento generado con el empleo de la tecnología microondas en cada uno de estos procesos industriales constituye una base sólida para la generación de proyectos de investigación que permitan la implementación y transferencia de estas tecnologías a la provincia de Cotopaxi. Todo ello puede ayudar a mejorar la eficiencia energética y el rendimiento productivo de los procesos y empresas, la transformación de materias primas en productos de alto valor añadido, la realización de una producción industrial más limpia, reducir el impacto medioambiental derivado de la utilización de los recursos energéticos y, por consiguiente, contribuir al desarrollo socioeconómico del país y al cambio de la matriz productiva de la zona 3 del Ecuador.

Para finalizar, resulta muy importante señalar que la publicación de este libro no solo es relevante para el personal docente-investigador y estudiantes de la UTC, sino que constituye una obra de referencia para toda la comunidad científica de habla hispana, dada la carencia de un libro sobre esta temática en idioma español.



MBA Cristian Fabricio Tinajero Jiménez

Rector de la Universidad Técnica de Cotopaxi

Tabla de contenido

Autores.....vii

Nota de los Editores.....xi

Capítulos

1. Introducción al calentamiento con microondas

José Ángel Menéndez.....1

2. Generación de microondas

Miguel A. Montes-Morán.....19

3. Aspectos básicos en el diseño de cavidades resonantes

José Fayos-Fernández y Juan Monzó-Cabrera.....45

4. Aspectos de seguridad y normativa sobre calentamiento con microondas

Antonio J. Lozano Guerrero y Juan Monzó-Cabrera.....67

5. Secado industrial con microondas

Ángel Hernández Moreno, Rafael Hernández Maqueda e Isabel Ballesteros.....85

6. Pirólisis de biomasa y residuos orgánicos

Daniel Beneroso Vallejo.....119

7. Las microondas y el reformado de metano con CO₂ sobre catalizadores carbonosos

Beatriz Fidalgo Fernández.....135

8. Molienda de carbones y minerales asistida con microondas

Esteban Ruisánchez y Esther Gómez Calvo.....155

9. Sinterización en microondas

Alejandro Concheso Álvarez.....167

10. Síntesis de polímeros con microondas

Isabel D. Alonso-Buenaposada, Ana Arenillas.....195

11. Preparación y regeneración de carbones activos asistida por microondas

Nuria Ferrera-Lorenzo, Begoña Ruiz Bobes, Isabel Suárez-Ruiz y Enrique Fuente Alonso.....217

12. Reacciones catalíticas mejoradas con microondas

Natalia Rey-Raap.....243

13. Extracción asistida con microondas

José Miguel Bermúdez Menéndez.....263

14. Reacciones orgánicas asistidas por microondas

Ana Franco, Alina M. Balu, Antonio A. Romero y Rafael Luque.....277

15. Digestión de muestras para análisis en microondas

M. Rosa Martínez Tarazona y M. Antonia López Antón.....301

Autores

PhD J. Ángel Menéndez

Grupo de Microondas y Carbones para Aplicaciones Tecnológicas (MCAT)
Instituto Nacional del Carbón, INCAR
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC
Apartado 73, 33080
Oviedo, España
angelmd@incar.csic.es

PhD Miguel A. Montes-Moran

Grupo de Microondas y Carbones para Aplicaciones Tecnológicas (MCAT)
Instituto Nacional del Carbón, INCAR
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC
Apartado 73, 33080
Oviedo, España
miguel.montes@incar.csic.es

PhD José Fayos-Fernández

Área de Teoría de la Señal
Departamento. de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Universidad Politécnica de Cartagena
Plaza del Hospital 1, 30202
Cartagena, Murcia, España
jose.fayos@upct.es

PhD Juan Monzó-Cabrera

Área de Teoría de la Señal
Departamento. de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Universidad Politécnica de Cartagena
Plaza del Hospital 1, 30202
Cartagena, Murcia, España
Juan.monzo@upct.es

PhD Antonio José Lozano Guerrero

Área de Teoría de la Señal
Departamento. de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Universidad Politécnica de Cartagena
Plaza del Hospital 1, 30202
Cartagena, Murcia, España
antonio.lozano@upct.es

PhD Rafael Hernández-Maqueda

Dirección de Investigación
Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales (CAREN)
Universidad Técnica de Cotopaxi
Av. Simón Rodríguez s/n
Barrio El Ejido, Sector San Felipe, Latacunga, Ecuador
rafael.hernandez@utc.edu.ec

PhD Isabel Ballesteros

Dirección de Investigación
Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales (CAREN)
Universidad Técnica de Cotopaxi
Av. Simón Rodríguez s/n
Barrio El Ejido, Sector San Felipe, Latacunga, Ecuador
maria.ballesteros@utc.edu.ec

PhD Daniel Beneroso Vallejo

Grupo de Microondas y Carbones para Aplicaciones Tecnológicas (MCAT)
Instituto Nacional del Carbón, INCAR
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC
Apartado 73, 33080
Oviedo, España
danielbeneroso@gmail.com

PhD Beatriz Fidalgo Fernández

Bioenergy & Resource Management Centre
Cranfield University
Bedfordshire, MK43 0AL
United Kingdom
b.fidalgofernandez@cranfield.ac.uk

PhD Esteban Ruisánchez

Departamento de Extracción y Operaciones
Pasek Minerales SAU
Mina Dunita Landoy, 15360
Cariño, A Coruña, España
esteban.ruisanchez@pasek.es

Autores

PhD Ángel H. Moreno

Dirección de Investigación
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas (CIYA)
Universidad Técnica de Cotopaxi
Av. Simón Rodríguez s/n
Barrio El Ejido, Sector San Felipe
Latacunga, Ecuador
angel.hernandez@utc.edu.ec

PhD Alejandro Concheso

Grupo de Microondas y Carbones para Aplicaciones Tecnológicas (MCAT)
Instituto Nacional del Carbón, INCAR
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC
Apartado 73, 33080, Oviedo, España
a.concheso@incar.csic.es

Isabel D. Alonso-Buenaposada

Grupo de Microondas y Carbones para Aplicaciones Tecnológicas (MCAT)
Instituto Nacional del Carbón, INCAR
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC
Apartado 73, 33080, Oviedo, España
isa.diaz@incar.csic.es

PhD Ana Arenillas

Grupo de Microondas y Carbones para Aplicaciones Tecnológicas (MCAT)
Instituto Nacional del Carbón, INCAR
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC
Apartado 73, 33080, Oviedo, España
aapunte@incar.csic.es

PhD Nuria Ferrera-Lorenzo

Instituto Nacional del Carbón, INCAR
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC
Apartado 73, 33080, Oviedo, España
nuriafl@incar.csic.es

PhD Begoña Ruiz Bobes

Coordinadora y Responsable de Relaciones externas y Normalización
Instituto Nacional del Carbón, INCAR
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC
Apartado 73, 33080, Oviedo, España
begorb@incar.csic.es

PhD Esther Gómez Calvo

Grupo de Microondas y Carbones para Aplicaciones Tecnológicas (MCAT)
Instituto Nacional del Carbón, INCAR
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC
Apartado 73, 33080, Oviedo, España
esthergc@incar.csic.es

PhD José M. Bermúdez Menéndez

Chemical Engineering Department
Imperial College London
SW7 2AZ
London, United Kingdom
j.bermudez-menendez@imperial.ac.uk

Ana Franco

Estudiante de Doctorado
Departamento de Química Orgánica
Universidad de Córdoba. Edificio Marie Curie (C-3),
Ctra Nnal IV-A, Km 396, E1 4014,
Córdoba, España
b12frloa@uco.es

PhD Alina M. Balu

Departamento de Química Orgánica
Universidad de Córdoba. Edificio Marie Curie (C-3),
Ctra Nnal IV-A, Km 396, E1 4014
Córdoba, España
qo2balua@uco.es

PhD Antonio A. Romero

Departamento de Química Orgánica
Universidad de Córdoba. Edificio Marie Curie (C-3),
Ctra Nnal IV-A, Km 396, E1 4014
Córdoba, España
qo1rorea@uco.es

PhD Rafael Luque

Departamento de Química Orgánica
Universidad de Córdoba. Edificio Marie Curie (C-3),
Ctra Nnal IV-A, Km 396, E1 4014
Córdoba, España
q62alsor@uco.es

Secado industrial con energía microondas 5

*Ángel H. Moreno, Rafael Hernández Maqueda
e Isabel Ballesteros*

Abstract

This chapter provides an analysis of the fundamentals of heating and drying processes using microwave energy, their advantages and disadvantages are discussed; and shows some of the different industrial applications of these processes. Given the importance of agricultural production in Ecuador special emphasis is focused on researches conducted on the application of this technology in drying seeds and horticultural products. Based on the analysis of the knowledge generated in this field is evidenced that the use of microwave technology has great potential to contribute to improving seed conservation, quality of dehydrated vegetable products and improve the energy efficiency of the drying process.

Keywords: Microwave drying, Seeds conservation, Dehydrated Fruits and Vegetables.

Resumen

En este capítulo se realiza un análisis de los fundamentos de los procesos de calentamiento y secado que utilizan la energía microondas, se exponen sus ventajas y desventajas; y se muestran algunas de las diferentes aplicaciones industriales de estos procesos. Dada la importancia de la producción agrícola en Ecuador se hace especial énfasis en las investigaciones realizadas sobre la aplicación de esta tecnología en el secado de semillas y productos hortofrutícolas. En base al análisis del conocimiento generado en este campo se evidencia que el uso de la tecnología microondas tiene un gran potencial para contribuir al mejoramiento de la conservación de semillas, la calidad de los productos vegetales deshidratados y mejorar la eficiencia energética del proceso de secado.

Palabras clave: Secado con microondas, Conservación de semillas, Productos vegetales deshidratados.

5.1. Fundamentos del calentamiento con energía microondas

La radiación microondas es el término utilizado para denominar a las radiaciones electromagnéticas no ionizantes que se producen en la porción del espectro electromagnético en la gama de frecuencias entre 300 MHz y 300 GHz, que corresponden a longitudes de onda entre un 1 m y un 1 mm (Osepchuk, 1984; Ohlsson y Bengtsson, 2001). Dentro de esta porción del espectro electromagnético hay frecuencias que se utilizan para las comunicaciones por telefonía móvil, radares, televisión y las comunicaciones por satélite. Por ello, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) ha reservado dos frecuencias para la utilización del calentamiento por energía microondas para fines industriales, científicos y médicos. Estas dos frecuencias son: 2,45 GHz y 915 MHz (Ohlsson y Bengtsson, 2001). Los hornos microondas utilizados, tanto para usos domésticos como industriales, generalmente operan a una frecuencia de 2,45 MHz, que corresponde a una longitud de onda de 12,2 cm y a una energía de $1,02 \times 10^{-5}$ eV.

Por otra parte, es muy importante saber que la radiación microondas no es una forma de calor, sino que es una forma de energía que se manifiesta en forma de calor a través de su interacción con los materiales. Para la conversión de esta forma de energía existen varios mecanismos (Schiffmann, 2015). Además, es muy importante tener presente que todos los materiales no se pueden calentar rápidamente mediante energía microondas, debido a que ellos interactúan de diferente forma con los campos electromagnéticos. En este sentido, los materiales, de acuerdo a la forma en que interactúan con los campos electromagnéticos, se clasifican en cuatro grupos: conductores, aislantes, absorbentes y compuestos magnéticos (Schiffmann, 2015). En la Tabla 5.1 se muestran las características generales de cada uno de ellos.

Como se puede observar en ella, en el grupo de materiales absorbentes se encuentran los materiales que absorben la radiación microondas; a estos materiales se les denomina materiales dieléctricos, por ello, al calentamiento con energía microondas también se le conoce como calentamiento dieléctrico.

Tabla 5.1. Clasificación y características de los materiales de acuerdo a su interacción con las ondas electromagnéticas (Schiffmann, 2015).

| Tipo de material | Interacción con las ondas electromagnéticas |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Conductores | Son materiales con electrones libres, como los metales, que reflejan las ondas electromagnéticas. Se utilizan para contener y dirigir las ondas electromagnéticas en los aplicadores y guías de onda. |
| Aislantes | Son materiales que no conducen la energía eléctrica, tales como el vidrio, la cerámica, y el aire. Actúan como aislantes, que reflejan y absorben las ondas electromagnéticas en una proporción muy poco significativa y principalmente las transmiten (son transparentes a las ondas electromagnéticas). Son útiles para soportar o contener los materiales que se van a calentar y pueden tomar la forma de cintas transportadoras, bandejas de soporte, platos, etc. |
| Absorbentes | Son materiales que absorben la energía electromagnética y la convierten en calor. Por ejemplo, el agua, aceites, la madera y otros materiales que contienen humedad |
| Compuestos magnéticos | Son materiales, tales como ferritas, que interactúan con el componente magnético de la onda electromagnética y debido a ello se calientan. Se utilizan como blindaje o dispositivos que impiden la fuga de energía electromagnética. |

Las propiedades que determinan si un material se puede calentar con éxito mediante energía microondas son sus propiedades dieléctricas, tales como: la constante dieléctrica relativa (ϵ'), tangente de pérdida o factor de disipación ($\tan \delta$) y el factor de pérdida (ϵ'') (Schiffmann, 2015). Por ello, el calentamiento con energía microondas resulta más útil y atractivo para los materiales que presentan excelentes propiedades dieléctricas. Estos materiales deben ser capaces de absorber la energía microondas y convertirla en calor, de una forma muy eficiente.

El mecanismo y la dirección de la transferencia de calor del calentamiento con energía microondas difieren de forma significativa con los métodos de calentamiento convencionales con los que tradicionalmente se realiza este proceso.

En los métodos convencionales de calentamiento, el material se calienta mediante una fuente externa de calor (desde el exterior del material a calentar), y el calor se transmite desde la superficie exterior del material hacia su interior. Por ello, estos métodos dependen del lento proceso de esta transferencia de calor. Este proceso es controlado por la diferencia de temperatura existente entre la temperatura de la superficie externa del material (de mayor temperatura) y la temperatura en su interior (de más baja temperatura).

Por el contrario, el calentamiento por microondas se basa en la rápida polarización y despolarización de grupos cargados cuando el material se somete a un campo de microondas, lo que resulta en una generación de calor simultánea en su interior. Por ello, el calentamiento con energía microondas es un calentamiento volumétrico, en el que el campo electromagnético interactúa con el material como un todo.

El calentamiento se produce casi instantáneamente y puede ser muy rápido, aunque necesariamente no tiene por qué serlo. La alta velocidad a la que se puede realizar este proceso constituye una de las ventajas del calentamiento con energía microondas y, debido a ello, es posible lograr en segundos, minutos o horas lo que podría tardar minutos, horas o días, con los métodos de calentamiento convencional. No obstante, el calentamiento también se puede realizar a una velocidad tan baja como se requiera.

Los parámetros que controlan el proceso de calentamiento con energía microondas son: la masa de material a calentar, su calor específico y propiedades dieléctricas, la geometría, los mecanismos de pérdida de calor, la eficiencia, la potencia generada en el material así como la potencia de salida del horno microondas. La velocidad de calentamiento del proceso es directamente proporcional a la potencia de salida del horno microondas. En la Tabla 5.2 se resumen las ventajas que presenta el calentamiento mediante energía microondas con respecto a los métodos convencionales de calentamiento.

Tabla 5.2. Ventajas del calentamiento con energía microondas (Schiffmann, 2015; Rattanadecho y Makul, 2016).

| Ventajas | Debido a: |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mayor velocidad de calentamiento y menores tiempo de procesamiento | Al calentamiento volumétrico y a la interacción directa del campo electromagnético que interactúa con el material a calentar. |
| Calentamiento uniforme del material | Que, generalmente, el efecto del calentamiento volumétrico produce un calentamiento más uniforme, evitando los grandes gradientes de temperatura que se producen en sistemas de calentamiento convencionales. |
| Mayor eficiencia energética | Que la energía interactúa directamente sobre el material a calentar y que no hay que calentar el aire, el horno o ninguna otra parte. Además, no existe una fuente de energía a alta temperatura ni hay que enfriar una |
| Mejor, más rápido, preciso y eficiente control del calentamiento | Al carácter instantáneo del encendido y apagado del calentamiento y la capacidad para cambiar el grado de calentamiento mediante el control de la potencia de salida del generador. |
| Menor requerimiento de espacio | Que las velocidades de calentamiento son más altas |
| Calentamiento selectivo | Que el campo electromagnético generalmente interactúa con el disolvente y no con el sustrato. Por ello, el agua (humedad) contenida en el material es la que se calienta y se elimina, mientras que el sustrato se calienta principalmente por conducción. |
| Se puede mejorar la calidad de los productos | Que no se producen altas temperaturas en la superficie de los productos a calentar, evitándose el recalentamiento de la superficie y el de endurecimiento del producto, que son comunes con los métodos convencionales de calentamiento. Esto puede contribuir a un menor rechazo de los productos. |
| Se pueden obtener efectos químicos y físicos favorables | Que muchas reacciones químicas y físicas se favorecen por el calor generado por este método beneficiando los procesos de secado, fusión, desnaturalización de las proteínas, la gelatinización del almidón, etc. |
| Proceso de calentamiento limpio | Que no genera residuos secundarios |

5.2. Generalidades sobre el proceso de secado de sólidos

El secado es, posiblemente, la más antigua, común y diversa de las operaciones unitarias de la ingeniería química. El secado de sólidos consiste en la operación de separación, total o parcial, del líquido que lo acompaña, con el objetivo de reducir el contenido del mismo hasta un valor aceptable (McCabe *et al.*, 1998). En la práctica del secado industrial el líquido a separar es, generalmente, el agua, aunque puede ser otro solvente (Richardson *et al.*, 2002).

El secado es una operación esencial en muchas industrias, tales como la química, agrícola, biotecnológica, alimenticia, de polímeros, cerámica, farmacéutica, pulpa y papel, procesamiento de minerales e industrias de transformación de la madera (Mujumdar, 2015). A menudo, el secado es la operación final de una serie de operaciones que se desarrollan en el proceso de fabricación de un determinado producto y se realiza inmediatamente antes de su envasado y envío (Richardson *et al.*, 2002). Sin embargo, en algunos casos, el secado es una parte esencial del proceso de fabricación, como por ejemplo en la fabricación de papel. En la mayoría de las industrias de proceso, el secado se lleva a cabo por una o más de las siguientes razones (Richardson *et al.*, 2002; Mujumdar, 2015). Para:

- Reducir el coste de transportación de los productos.
- Hacer un material más adecuado para su manipulación.
- Proporcionar propiedades definidas.
- Eliminar la humedad, con el fin de evitar la corrosión.
- Mejorar la conservación y el almacenamiento de los productos.
- Lograr la calidad deseada del producto final.

En este sentido, es necesario tener en cuenta que en muchos procesos un secado inadecuado puede conducir a un daño irreversible en la calidad del producto y, por lo tanto, que sea un producto no vendible (Mujumdar, 2015).

El agua u otros solventes presentes en los sólidos se pueden separar de los mismos a través de procesos térmicos, por evaporación, o por medio de procesos mecánicos, mediante la utilización de prensas o centrífugas. La eliminación de los líquidos mediante la utilización de métodos mecánicos resulta, de forma general, más económica que hacerlo por métodos térmicos; por ello se recomienda reducir el contenido de humedad del sólido, en la medida de lo posible, antes de entrar al secador (McCabe *et al.*, 1998).

En general, casi todos los procesos de secado implican la eliminación de agua por evaporación, lo que requiere la adición de calor procedente de una determinada fuente de energía, con la excepción del secado parcial de un material por compresión en una prensa o la eliminación de agua por adsorción (Richardson *et al.*, 2002).

En la práctica del secado industrial es frecuente encontrar que los productos que se requieren secar en ocasiones pueden soportar altas temperaturas, mientras que en otras solo pueden tolerar temperaturas moderadas o bajas (McCabe *et al.*, 1998).

Estas diferencias en los requerimientos del proceso de secado de los diferentes productos traen consigo que en el mercado se encuentren disponibles más de 100 tipos distintos de secadores y que se hayan reportado más de 400 tipos (Mujumdar, 2015). Las diferencias entre ellos consisten, fundamentalmente, en la forma en la que se transmite el calor hacia el producto a secar y en la que se mueven los sólidos a través de la zona de secado (McCabe *et al.*, 1998).

En la Tabla 5.3 se resume el rango de variación de los principales parámetros de operación del proceso de secado de sólidos. Es muy importante tener en cuenta los mismos, tanto para el diseño de un nuevo secador como para el análisis y evaluación de un secador existente, así como para la selección de un secador disponible en el mercado.

Tabla 5.3. Principales parámetros de operación del proceso de secado de sólidos (Mujumdar, 2015).

| Parámetros | Rango de variación |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tamaño | Desde decenas de micras hasta centímetros (de espesor o profundidad) |
| Porosidad | 0 – 99,9% |
| Tiempo de secado | De 0,25 s (secado de tejido papel) a 5 meses (para ciertas especies de madera dura) |
| Capacidad de producción | De 0,10 kg/h a 100 t/h |
| Velocidad | De 0 (estacionaria) a 2.000 m/min (papel de seda) |
| Temperatura de secado | Desde temperaturas inferiores al punto triple a temperaturas superiores al punto crítico del líquido |
| Presión de operación | Desde una fracción de milibares a 25 atm |
| Suministro de calor | Puede ser transmitido de forma continua o intermitente por convección, conducción, radiación, o campos electromagnéticos. |

5.2.1 Contenido de humedad en los sólidos

La humedad en los sólidos puede estar presente en dos formas: ligada y no ligada (Treybal, 1980, McCabe *et al.*, 1998; Mujumdar, 2015). En la Tabla 5.4 se muestran las definiciones de ambos tipos de humedad, dadas por diferentes investigadores.

La humedad contenida en un sólido húmedo ejerce una presión de vapor, cuya magnitud depende de la naturaleza de la humedad, la naturaleza del sólido, y la temperatura (Treybal, 1980; Mujumdar, 2015).

Tabla 5.4. Definiciones de los diferentes tipos de humedad.

| Humedad | Definición |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ligada | Se refiere a la humedad (agua) retenida en el sólido en los capilares, como una solución en las estructuras celulares o dentro del mismo; o adsorbida, química o físicamente, sobre la superficie del sólido (Richardson <i>et al.</i> , 2002; Mujumdar, 2015). La misma ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro (agua libre) a la misma temperatura (Treybal, 1980; McCabe <i>et al.</i> , 1998; Richardson <i>et al.</i> , 2002; Mujumdar, 2015). |
| No ligada | Se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura (Treybal, 1980). Es la humedad en exceso de la humedad ligada Es la humedad en exceso del contenido de humedad de equilibrio correspondiente a la humedad de saturación (Mujumdar, 2015). Todo el contenido de humedad de un material no higroscópico es la humedad no ligada. |
| En equilibrio | Es el contenido de humedad de una sustancia que está en equilibrio con una presión parcial del vapor dada (Treybal, 1980). La porción de agua del sólido húmedo que no puede ser separada por el aire que entra, debido a la humedad de éste, recibe el nombre de humedad de equilibrio (McCabe <i>et al.</i> , 1998). |
| Libre | Es la humedad contenida por una sustancia en exceso de la humedad en el equilibrio: $X - X^*$ (Treybal, 1980) Es la diferencia entre el contenido total de agua del sólido y el contenido de agua en el equilibrio (McCabe <i>et al.</i> , 1998). Es el agua que está en exceso del contenido de humedad de equilibrio (Richardson <i>et al.</i> , 2002). Es el contenido de humedad removible a una temperatura dada y puede incluir tanto la humedad ligada como la no ligada (Mujumdar, 2015). |

Cuando un sólido húmedo se pone en contacto con un suministro continuo de gas, que tiene una temperatura y humedad dada, el sólido pierde humedad hasta que la presión de vapor de la humedad en el sólido es igual a la presión parcial del vapor en el gas. Cuando esto sucede el sólido y el gas están en equilibrio, y al contenido de humedad del sólido se le llama **contenido de humedad de equilibrio** en las condiciones existentes (Mujumdar, 2015). En la Tabla 5.4 se pueden consultar otras definiciones dadas por otros autores. Un mayor tiempo de exposición del sólido al gas no origina ninguna pérdida de humedad adicional. No obstante, el contenido de humedad del sólido se puede reducir aún más mediante su exposición a un flujo de aire con una humedad relativa más baja (Mujumdar, 2015).

El contenido de humedad de equilibrio de un sólido varía ampliamente con el contenido de humedad y la temperatura del aire (Richardson *et al.*, 2002). Por ejemplo, un sólido no poroso e insoluble, tal como la arena o el caolín (arcilla de china), tiene un contenido de humedad de equilibrio de aproximadamente cero para un amplio rango de humedades y temperaturas (Richardson *et al.*, 2002). Sin embargo, muchos materiales orgánicos, como la madera, los textiles y el cuero, muestran grandes variaciones de la humedad de equilibrio (Richardson *et al.*, 2002).

Los sólidos, de acuerdo a su capacidad para absorber humedad, se clasifican en los tres grupos que se muestran en la Tabla 5.5, en la que se exponen, además, ejemplos de cada uno de ellos y los criterios que se utilizan para definirlos.

Tabla 5.5. Clasificación de los sólidos, de acuerdo a su capacidad para absorber la humedad (Mujumdar, 2015).

| Tipo de sólidos | Ejemplos | Criterios para definirlos |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Medios capilares poroso no higroscópicos | Arena | |
| | Minerales triturados | <ul style="list-style-type: none"> Existe un espacio de poros claramente reconocible. El espacio de los poros se llena con líquido si el medio capilar-poroso está completamente saturado Se llena de aire cuando el medio está completamente seco |
| | Cristales no higroscópicos | <ul style="list-style-type: none"> La cantidad de humedad ligada físicamente es poco significativa; es decir, el material no es higroscópico. |
| | Polímeros | <ul style="list-style-type: none"> El producto no se encoge durante el secado. |
| | Algunas cerámicas | |
| Medios porosos higroscópicos | Arcilla, tamices moleculares, madera y textiles. | |
| <ul style="list-style-type: none"> Medios capilares poroso higroscópicos (microporos y macroporos) Medios estrictamente higroscópicos (solo microporos) | Madera | <ul style="list-style-type: none"> Existe un espacio de poros claramente reconocible. |
| | Arcilla | <ul style="list-style-type: none"> Existe una gran cantidad de líquido ligado físicamente. |
| | Textiles | <ul style="list-style-type: none"> La contracción (encogimiento) del sólido se produce en las etapas iniciales de su proceso de secado. |
| | Gel de sílice | |
| | alúmina | |
| | zeolita | |
| Medios coloidales no porosos | Jabón | |
| | Pegamento | <ul style="list-style-type: none"> No existe un espacio poroso (la evaporación puede tener lugar sólo en la superficie). |
| | Algunos polímeros (nylons) | <ul style="list-style-type: none"> Todo el líquido está físicamente ligado. |
| | Diversos productos alimenticios | |

Un sólido húmedo, generalmente, está hinchado en comparación a cuando está seco y su volumen cambia durante el proceso de secado. Por estos motivos no resulta conveniente expresar el contenido de humedad de los mismos en términos de volumen (Mujumdar, 2015). Por ello, el contenido de humedad de un sólido se expresa, generalmente, como el contenido de humedad, o el porcentaje de humedad, por masa de material seco en el sólido, X (Richardson *et al.*, 2002; Mujumdar, 2015).

$$X = \frac{\text{kg humedad}}{\text{kg sólido seco}} \quad (5.1)$$

X : Contenido de humedad en base seca (kg agua / kg sólido seco).

No obstante, en ocasiones, el contenido de humedad se expresa sobre una base húmeda W (Richardson *et al.*, 2002; Mujumdar, 2015), que es la relación de la humedad del sólido en base a la masa total del material húmedo (Mujumdar, 2015).

$$W = \left(\frac{\text{kg humedad}}{\text{kg sólido húmedo}} \right) \quad (5.2)$$

$$W = \left(\frac{\text{kg humedad}}{\text{kg sólido seco} + \text{kg humedad}} \right) \quad (5.3)$$

W : Contenido de humedad en base húmeda (kg agua / kg sólido húmedo).

O en porcentaje:

$$W(\%) = \left(\frac{\text{kg humedad}}{\text{kg sólido húmedo}} \right) * 100 \quad (5.4)$$

$W(\%)$: Contenido de humedad en base húmeda (%).

Ambos contenidos de humedad se relacionan a través de la siguiente expresión (Mujumdar, 2015):

$$X = \frac{W}{(1 - W)} \quad (5.5)$$

5.2.2. Mecanismo de secado

La humedad no ligada en los sólidos se puede eliminar mediante dos métodos diferentes: por evaporación o por vaporización (Mujumdar, 2015).

El proceso de secado de los sólidos por evaporación se puede considerar como dos procesos que se realizan de forma simultánea: un proceso de transferencia de calor, en el que el calor se transfiere al sólido húmedo con el fin de evaporar el líquido, y un proceso de transferencia de masa, en el cual el líquido o vapor se mueve dentro del sólido y el vapor sale de la superficie sólida (Brammer y Bridgwater, 1999). Estos procesos se representan en la Figura 5.1.

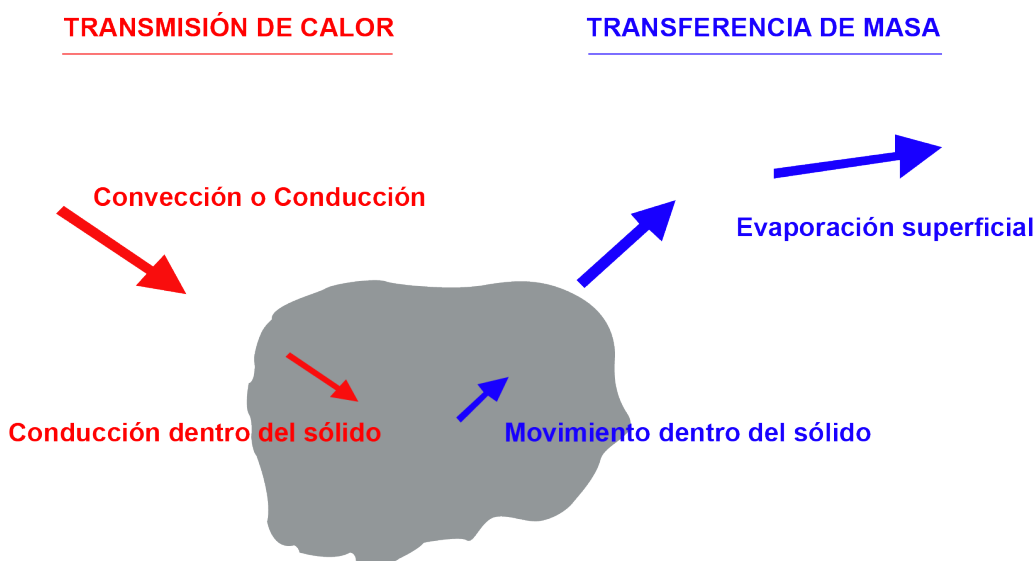


Figura 5.1. Procesos que intervienen en el secado de sólidos por evaporación (Brammer y Bridgwater, 1999).

Como se puede observar en la Figura 5.1 los procesos de transferencia de calor y de masa que se producen en el proceso de secado de un sólido tienen direcciones diferentes. Cuando se utilizan los métodos de secado convencionales, la humedad que contiene el producto a secar se evapora desde su superficie externa, mientras que el agua (humedad) contenida en su interior se difunde lentamente hacia la superficie externa (Ver Figura 5.1).

El potencial para el proceso de transferencia de calor es el gradiente de temperatura existente entre la temperatura de la superficie externa y la existente en el interior de la partícula, lo que origina la transferencia de calor hacia el interior del material; mientras que el potencial para la transferencia de masa es el gradiente de concentración de masa existente entre el interior de la partícula húmeda y la superficie externa más seca. Este último proceso, por lo general, es un proceso lento, que está limitado por la velocidad de la difusión, y que requiere de altas temperaturas externas para generar la diferencia de temperatura requerida.

La eliminación de la humedad por evaporación se produce cuando se iguala la presión de vapor de la humedad contenida en la superficie del sólido con la presión atmosférica (Mujumdar, 2015). Para alcanzar esta igualdad es necesario aumentar la temperatura de la humedad hasta su temperatura de ebullición (Mujumdar, 2015).

Cuando los productos a secar son sensibles a altas temperaturas, como es el caso de las semillas agrícolas y de los productos hortofrutícolas, que solo pueden tolerar bajas temperaturas, entonces la temperatura a la que se produce la evaporación de la humedad (punto de ebullición) se puede disminuir mediante la disminución de la presión por debajo de la presión atmosférica. A este método de evaporación de la humedad se denomina “**evaporación al vacío**” (Mujumdar, 2015).

Otro método de eliminación de la humedad de los sólidos por evaporación es el conocido como “**secado por congelación**” o “**secado criogénico**”. Este método consiste en disminuir la presión por debajo del punto triple, donde la fase líquida no puede existir, congelar la humedad del producto y eliminarla por sublimación, o sea, por el paso del hielo a vapor mediante la adición de calor (Mujumdar, 2015).

Por otra parte, la eliminación de la humedad por vaporización se lleva a cabo por convección, al pasar una corriente de aire caliente sobre el producto a secar. Cuando esto sucede, la humedad del producto se transfiere al aire y es arrastrada por él, lo que origina una disminución de su temperatura (Mujumdar, 2015). En este caso la presión de vapor de saturación de la humedad sobre el sólido es menor que la presión atmosférica.

5.2.3. El medio de calentamiento o secado

El medio de secado se refiere al medio gaseoso que rodea al producto a secar. Dicho medio puede ser un vapor puro, por ejemplo el vapor de agua, o una mezcla de vapor y un gas no condensable, tal como el aire o los productos de la combustión (Brammer y Bridgwater, 1999). El medio de calentamiento que se puede utilizar en los secadores puede variar de acuerdo a las demandas de proceso y a la disponibilidad de las corrientes en la instalación de secado (Nikolopoulos *et al.*, 2015).

5.2.4. Curvas de secado

El conocimiento de las características del proceso de secado de un sólido es muy importante, tanto para la selección del tipo de secador más adecuado para realizar este proceso como para el diseño y el dimensionamiento de un secador. Además, para realizar estas tareas también se requiere conocer las características de manejo de sólidos, la humedad de equilibrio del sólido, la sensibilidad del material a la temperatura, así como los límites de temperatura que se pueden alcanzar con una fuente de calor en particular (Mujumdar, 2015).

El comportamiento de los sólidos durante el proceso de secado se puede caracterizar mediante la medición de la pérdida de humedad del sólido como una función del tiempo. Para ello, los métodos que se utilizan son la diferencia de humedad, y el pesaje continuo o intermitente (Mujumdar, 2015). Cada material posee una curva representativa que describe las características de secado de ese material en condiciones específicas de temperatura, velocidad y presión (Ver Figura 5.2). Dicha curva se denomina **curva de secado** y se obtiene al representar la velocidad de pérdida de masa (humedad) en función del tiempo, para una muestra del material expuesto al medio de secado en condiciones controladas y constantes (Brammer y Bridgwater, 1999; Mujumdar, 2015). La forma de la curva y los valores que representan la velocidad de secado dependen de la velocidad del medio de secado, la temperatura del medio de calentamiento, la distribución del tamaño de partículas, y las características de la estructura de las partículas, tales como el tamaño y la distribución del tamaño de poros (Nikolopoulos *et al.*, 2015).

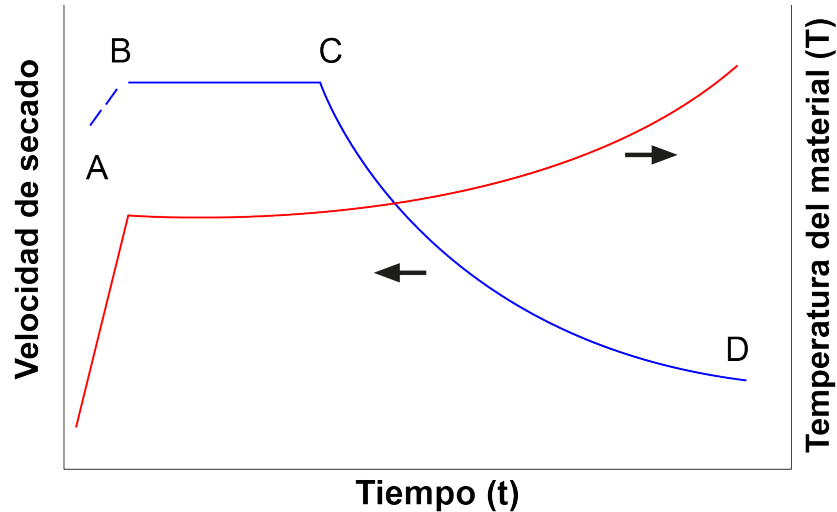


Figura 5.2. Curva de secado de un sólido húmedo (Brammer y Bridgwater, 1999).

Cómo se puede observar en la Figura 5.2, en la curva de secado existe un período inicial (tramo A – B) en el que se produce un calentamiento del material a secar y un aumento de la velocidad de secado (Brammer y Bridgwater, 1999). A este período le sigue otro en el que la velocidad de secado se mantiene constante (tramo B – C), denominado como **período de velocidad constante**, durante el cual la difusión del agua a través del sólido es lo suficientemente rápida para mantener las condiciones saturadas en su superficie (Brammer y Bridgwater, 1999). Por último, durante su etapa final, la difusión interna de agua no puede mantener las condiciones de saturación en la superficie de la partícula y comienza un período que se caracteriza por una disminución de la velocidad de secado (tramo C – D), conocido como **período de velocidad decreciente** (Brammer y Bridgwater, 1999). Este último período, a menudo, se divide en un período durante el cual la superficie del material está parcialmente húmeda y ningún mecanismo domina por completo; seguido por un período en el que la superficie del material está completamente seca y la difusión del agua a través del sólido es el mecanismo controlante de la velocidad de secado (Brammer y Bridgwater, 1999).

Las velocidades de secado son muy difíciles de predecir para un determinado producto, sobre todo durante el periodo de velocidad decreciente (C – D); y para determinarlas se requieren, por lo general, de métodos experimentales en condiciones controladas (Brammer y Bridgwater, 1999).

El **contenido crítico de humedad** constituye una de las variables clave que hay que determinar. Éste se define como el contenido de humedad a la que finaliza el período de secado a velocidad constante y comienza el período de velocidad de secado decreciente (Brammer y Bridgwater, 1999). El contenido crítico de humedad depende de varios parámetros, tales como la estructura y el espesor del material, y el contenido inicial de humedad (Brammer y Bridgwater, 1999).

Resulta evidente que el secado a bajos niveles de humedad implica un mayor tiempo de secado y, por lo tanto, un mayor tamaño del equipo para alcanzar el nivel de humedad final deseado, con el consiguiente incremento del costo capital del secador (Brammer y Bridgwater, 1999). Por ello, el secado de los productos más allá de un límite predefinido se debe evitar, debido a que un mayor tiempo de secado requiere de instalaciones industriales muy grandes y con un alto consumo energético (Brammer y Bridgwater, 1999; Nikolopoulos *et al.*, 2015).

5.3. Fundamentos del secado asistido con energía microondas

El secado asistido con energía microondas ha surgido y se ha desarrollado como un método alternativo a los métodos convencionales de secado, debido a todas las ventajas que ofrece, y en la actualidad se utiliza en muchos procesos industriales para el secado de diversos materiales y productos.

5.3.1. Mecanismo de secado con energía microondas

El mecanismo de secado y la dirección de la transferencia de calor cuando se utiliza la energía microondas difieren, de forma significativa, de los métodos convencionales de secado analizados en el Apartado 5.2.2.

A diferencia de lo que sucede en los métodos de secado convencionales, en los sistemas de secado que utilizan energía microondas, debido a la generación de calor interna, la transferencia de masa se debe principalmente al gradiente de presión total establecido, debido a la rápida generación de vapor dentro del material. La mayor parte de la humedad se vaporiza antes de salir de la muestra.

Si el contenido inicial de humedad del producto a secar es muy alto y la presión dentro de él se eleva rápidamente, el líquido se puede eliminar de la muestra bajo la influencia de un gradiente de presión total. Cuanto mayor sea la humedad inicial del producto a secar, mayor es la influencia del gradiente de presión en la eliminación de masa total. Por lo tanto, existe, una especie de acción de bombeo, que fuerza al líquido hacia la superficie, por lo general en forma de vapor. Esto origina un secado muy rápido, sin la necesidad de recalentar la atmósfera ni causar el endurecimiento u otros fenómenos de sobrecalentamiento en la superficie.

5.3.2. Ventajas del secado con energía microondas

Un aspecto que ha despertado un gran interés en la utilización del secado con energía microondas es la mejora en la eficiencia energética que se puede alcanzar con su uso. El ahorro de energía que se logra en estos sistemas se debe, fundamentalmente, a: las velocidades de secado más altas, la interacción directa de la energía con el disolvente, las temperaturas de secado más bajas y a las menores pérdidas de calor que se producen en ellos (Schiffmann, 2015).

Otra de las ventajas que se le atribuye al uso de la energía de microondas es que con su utilización se puede disminuir la temperatura de secado para varios materiales dieléctricos, reduciendo de esta forma la incidencia de las imperfecciones de secado, en comparación con los métodos convencionales de secado (Rattanadecho y Makul, 2016).

En la Tabla 5.6. se recogen las principales ventajas que se le atribuyen al secado con energía microondas así como las causas que las originan.

Tabla 5.6. Ventajas del secado con energía microondas (Schiffmann, 2015; Rattanadecho y Makul 2016).

| Ventajas | Debido a: |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mayor eficiencia energética | Que, en la mayoría de los casos, la energía interactúa con el disolvente y no con el sustrato. |
| No Destructivos | Que el secado se puede realizar a bajas temperaturas; no hay necesidad para mantener altas temperaturas en la superficie, lo que permite disminuir los gradientes térmicos. |
| Reducción de la migración | Que el solvente, generalmente, se elimina en forma de vapor, por lo que no arrastra otros materiales a la superficie. |
| Nivelación de efectos | La interacción tiende hacia las zonas más húmedas. |
| Velocidad | Los tiempos de secado se pueden disminuir en un 50% o más. |
| Uniformidad de secado | Mediante una combinación de perfiles térmicos más uniformes y a la nivelación. |
| Sistemas con cintas transportadoras | Que requieren menos espacio y una manipulación reducida |
| Mejora la calidad del producto, en algunos casos | Elimina el endurecimiento, las tensiones internas y otros problemas. |

5.3.3. Desventajas del secado con energía microondas

A pesar de todas las ventajas que se obtienen al realizar el proceso de secado con energía microondas, analizadas anteriormente, algunos investigadores (Zhang *et al.*, 2006; Schiffmann, 2015; Wray y Ramaswamy, 2015; Rattanadecho y Makul 2016) le atribuyen varias desventajas que, según argumentan, limitan su aplicación en solitario a dicho proceso.

Una de las principales desventajas que se le imputa al proceso de secado con energía microondas es la no uniformidad inherente del campo electromagnético dentro de una cavidad microondas (Zhang *et al.*, 2006; Rattanadecho y Makul, 2016), lo que origina una distribución de temperatura no uniforme (Wray y Ramaswamy, 2015). El patrón de onda existente dentro de la cavidad de microondas puede producir puntos calientes en la muestra, lo que origina que la misma se caliente rápidamente a temperaturas inaceptables, trayendo consigo daños, como su carbonización (Wray y Ramaswamy, 2015). Debido a ello, los productos a secar deben estar en constante movimiento dentro de la cavidad para evitar puntos calientes (Zhang *et al.*, 2006). Además, la temperatura del producto puede aumentar hasta valores que pueden causar que se queme, debido a la limitada cantidad de agua existente durante la etapa final del proceso de secado (Zhang *et al.*, 2006). Así, la temperatura del producto final durante el proceso de secado con energía microondas resulta difícil de controlar en comparación con los métodos de secado con aire caliente, en los que la temperatura del producto a secar nunca es mayor que la temperatura del aire (Zhang *et al.*, 2006).

Por otra parte, el calentamiento demasiado rápido también puede afectar la calidad del producto a secar (Schiffmann, 2015). Por ello, se debe tener mucho cuidado de no calentar muy rápido los materiales porque se pueden quemar, dañar o secar tan rápido que el vapor de agua u otros vapores no tengan el tiempo necesario para que puedan escapar con la suficiente rapidez, lo que origina un incremento de la presión interna, que puede conducir a la ruptura de la pieza o a una explosión (Schiffmann, 2015).

Otra de las desventajas que se le atribuye a este tipo de secado es la profundidad de penetración de la energía microondas en los productos a secar (Zhang *et al.*, 2006). La profundidad de penetración, aunque no es una propiedad del material a secar sino una consecuencia de varias de sus propiedades, es de gran importancia en los procesos de calentamiento y secado con energía microondas. Como se ha explicado anteriormente, el calentamiento electromagnético es un calentamiento volumétrico, por lo que resulta muy importante que la energía microondas penetre tan profundamente como sea posible en el material a secar; y si no lo hace, el calentamiento se limita a la superficie, produciéndose solamente un calentamiento superficial (Schiffmann, 2015). La profundidad de penetración de la energía microondas en el material depende de los siguientes parámetros: la longitud de onda, la constante dieléctrica del material y del factor de pérdida (Schiffmann, 2015). En los materiales con altas constantes dieléctricas y factores de pérdida se producen menores profundidades de penetración que los que tienen valores más bajos (Schiffmann, 2015). Además, la profundidad de penetración se ve afectada en gran medida por la longitud de onda y, por tanto, por la frecuencia del campo aplicado. Al aumentar la frecuencia del campo electromagnético aplicado disminuye la profundidad de penetración de la energía microondas en el material (Schiffmann, 2015). Por ello, la profundidad de penetración que se obtiene en los materiales que son secados en hornos microondas que operan a una frecuencia de 915 MHz es mayor que la que se obtiene en los microondas que trabajan a 2,45 GHz (Schiffmann, 2015).

Los daños de la calidad o las posibles variaciones indeseables de la textura de los alimentos, debido al transporte de masa demasiado rápido, originado por la potencia de los microondas, han sido señalados como otra de las desventajas atribuidas al secado con energía microondas (Zhang *et al.*, 2006). Sin embargo, esto puede o no constituir una limitación, porque depende de los parámetros de calidad deseados en los productos finales.

Debido a todas las desventajas analizadas anteriormente, que pueden limitar la aplicación en solitario del calentamiento con microondas en el proceso de secado, algunos investigadores (Zhang *et al.*, 2006; Schiffmann, 2015; Wray y Ramaswamy, 2015; Rattanadecho y Makul, 2016) recomiendan combinar el secado con energía microondas con los métodos de aire caliente. Esto se debe a que, por lo general, mejora la eficiencia y la economía del proceso de secado.

El aire caliente es relativamente eficiente para la eliminación del agua libre, que está en o cerca de la superficie externa, mientras que la acción de bombeo que se produce en el secado con energía microondas constituye una manera eficiente para la eliminación del agua libre que se encuentra en la superficie interna, así como del agua ligada a la estructura del material. Al combinar estos métodos correctamente, es posible obtener los beneficios de cada uno, maximizar la eficiencia y bajar los costos de secado (Schiffmann, 2015).

5.4. Aplicaciones industriales del calentamiento y secado con energía microondas

5.4.1. Aplicaciones industriales del calentamiento con energía microondas

El calentamiento con microondas, debido a las ventajas que tiene, ha encontrado muchas aplicaciones en diferentes sectores, tales como el doméstico, comercial, de la salud, científico e industrial. En la Tabla 5.7 se pueden apreciar algunas de las principales aplicaciones en las que ha sido utilizado a nivel industrial.

Tabla 5.7. Aplicaciones industriales del calentamiento con microondas.

| Procesos y aplicaciones industriales | Fuente |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Procesamiento de alimentos y productos agrícolas | Ohlsson y Bengtsson (2001) |
| | Venkatesh y Raghavan (2004). |
| | Chandrasekaran <i>et al.</i> , (2012) |
| | Kim <i>et al.</i> , (2012) |
| Industrias agrícolas y forestales | Shaheen <i>et al.</i> , (2012) |
| | Brodie (2012) |
| Procesamiento de minerales | Jones <i>et al.</i> , (2002), Chandrasekaran <i>et al.</i> , (2012), Koleini y Barani (2012) |
| Procesamiento de materiales cerámicos, polímeros, materiales compuestos y metales | Thostenson y Chou (1999) |
| | Chandrasekaran <i>et al.</i> , (2012) |
| Procesos en los que intervienen materiales carbonosos | Menéndez <i>et al.</i> , (2010) |
| Cemento y concreto | Makul <i>et al.</i> , (2014) |
| Tratamiento de residuos, mejoramiento de suelos contaminados y aplicaciones medioambientales | Jones <i>et al.</i> , (2002) |
| | Chandrasekaran <i>et al.</i> , (2012) |
| | Kim <i>et al.</i> , (2012) |
| Procesamiento del vidrio | Clark <i>et al.</i> , (2000) |
| | Chandrasekaran <i>et al.</i> , (2012) |
| Procesamiento de materiales | CMF (1993) |
| | Kim <i>et al.</i> , (2012) |
| Procesos de fabricación | CMF (1993) |
| | Kim <i>et al.</i> (2012) |
| Sistema de reacción química | Chandrasekaran <i>et al.</i> , (2012) |
| Intensificación de los procesos de desorción | Cherbanski y Molga (2009) |
| Aplicaciones biomédicas | Chandrasekaran <i>et al.</i> , (2012) |
| Aplicaciones de biomateriales | Chandrasekaran <i>et al.</i> , (2012) |
| Aplicaciones no térmicas | Chandrasekaran <i>et al.</i> , (2012) |

5.4.2. Aplicaciones industriales del secado con energía microondas

El secado mediante energía microondas, como una de las aplicaciones del calentamiento con microondas, también ha encontrado diversas aplicaciones en sectores tales como el científico e industrial. En la Tabla 5.8 se pueden apreciar algunas de las numerosas industrias que utilizan la tecnología microondas en sus procesos de secado.

Tabla 5.8. Aplicaciones industriales del secado con energía microondas.

| Industria | Para el secado de: | Fuente |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Madera | Chapas en el proceso de fabricación de madera contrachapada | Schiffmann (2015) |
| | Partes de los muebles, en la fabricación de muebles | |
| | Madera para bates de béisbol | |
| Textil | Paquetes de textiles, madejas, ovillos, las tapas y material suelto | Schiffmann (2015) |
| Papel | Tintas de impresión, adhesivos y materiales de revestimiento y papel. | Schiffmann (2015) |
| Alimenticia | Pasta, cebollas, algas marinas y patatas fritas, concentrados de zumo de frutas, polvo de té, y enzimas. | Schiffmann (2015) |
| Análisis de laboratorio | Determinación de sólidos y el contenido de humedad | Schiffmann (2015) |
| Agrícola | Verduras como champiñones, cebollas y espárragos, secado de granos | Schiffmann (2015) |
| Farmacéutica | Píldoras | Schiffmann (2015) |
| Recubrimiento industrial | Revestimientos de plástico y papel. Incluidos en estos el secado de haluro de plata | Schiffmann (2015) |
| Cerámica | Pequeños accesorios de baño como de barras de colgar toallas y jaboneras | Schiffmann (2015) |
| Fundición | Secado y polimerización de los moldes de arena | Schiffmann (2015) |
| Carbón | Secado de carbones de bajo rango | Graham (2007), Nikolopoulos et al., (2015); Rao <i>et al.</i> , (2015) |

De las diferentes aplicaciones del secado industrial con energía microondas, mostradas en la Tabla 5.8, en este capítulo se hace especial énfasis en las investigaciones realizadas sobre las aplicaciones de esta tecnología en el secado de semillas y productos hortofrutícolas, dada la importancia que tiene la producción agrícola en Ecuador, país donde se pretende implementar esta técnica.

5.5. Secado de semillas con energía microondas

La provincia de Cotopaxi, en Ecuador, es una provincia eminentemente agrícola, por lo que la actividad en este sector constituye una de sus principales actividades económicas (GAD-Cotopaxi, 2015). Entre los principales cultivos de que se siembran en Cotopaxi se destacan los siguientes: maíz suave seco, cacao, maíz suave choclo, caña de azúcar, papa, cebada, banano, maíz duro seco, habas secas y plátano (GAD-Cotopaxi, 2015). La mayoría de ellos requieren de un proceso de secado para la conservación de semillas, el control de plagas y el aumento de la vida útil de los productos.

Por otra parte, la conservación de semillas, en Ecuador, no solo es importante desde un punto de vista agrícola, sino también como una estrategia para la conservación de la gran biodiversidad de especies vegetales silvestres que dispone el país (SENPLADES, 2013). Además, el gobierno ecuatoriano está fomentando el comercio de productos hortofrutícolas deshidratados en el país, tanto para su consumo interno como para la exportación, y para ello impulsó recientemente la creación del Consorcio Ecuatoriano de Frutas y Vegetales Deshidratados (Ecuadehyd) (SENPLADES, 2013). Ambas cuestiones son prioritarias para el Estado Ecuatoriano, tal y como se refleja en el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2017 (Plan del Buen Vivir) (SENPLADES, 2013). En el primer caso para garantizar los derechos de la naturaleza (Objetivo 7 del Plan) y en el segundo para favorecer el cambio de la Matriz Productiva (Objetivo 10). Otro de los objetivos nacionales de desarrollo del Ecuador es asegurar la soberanía y eficiencia de los sectores estratégicos para la transformación industrial y tecnológica (Objetivo 11), en el que se contempla el cambio de la Matriz Energética.

Las técnicas de secado de semillas y productos hortofrutícolas, basadas en la tecnología microondas, tienen un gran potencial para contribuir al mejoramiento de la conservación de semillas, la calidad de los productos vegetales deshidratados y mejorar la eficiencia energética del proceso de secado.

Por todo lo anteriormente expuesto estos aspectos se analizan en los siguientes epígrafes.

5.5.1. La conservación de semillas

La importancia de la conservación de semillas radica en la posibilidad de disponer de este recurso en el tiempo.

En el contexto de Ecuador, las semillas son parte fundamental del patrimonio natural y su manejo está muy vinculado a los conocimientos y prácticas de pueblos y comunidades, que durante siglos han permitido el uso y preservación de distintas especies vegetales de interés agrícola.

Tradicionalmente, para el secado de semillas se ha empleado la técnica de secado natural al sol debido principalmente a su disponibilidad, abundancia y a que no se requiere ningún tipo de conocimiento especializado para su manejo. Sin embargo, este método de secado trae consigo algunas desventajas como son los tiempos de secado largos, la necesidad de disponer de espacios grandes y, principalmente, la dependencia de las condiciones climáticas que trae consigo un control insuficiente sobre el proceso de secado, lo que implica una disminución de la viabilidad de las semillas al estar expuestas a cambios bruscos de temperatura y humedad, a contaminantes ambientales, a plagas y a enfermedades.

Para evitar estos inconvenientes, se han desarrollado distintos métodos artificiales de secado, como la convección por aire caliente, cuyas técnicas y efectos sobre la calidad de la semilla pueden ser consultados en Barrozo y Mujumdar (2014), donde se recogen los principales aportes de distintos autores al respecto. Aunque estas técnicas reducen los tiempos de secado considerablemente, no se obtienen los resultados deseados en cuanto a la viabilidad de las semillas, debido principalmente a la falta de uniformidad de la temperatura en el proceso de secado. Es por ello que se requieren nuevas técnicas y enfoques que ayuden a solventar estos inconvenientes. En este sentido, la técnica microondas ofrece algunas ventajas como la disminución de los tiempos de secado y una mayor eficiencia energética. Por este motivo se ha incrementado recientemente el número de investigaciones con vistas a evaluar si esta técnica es eficaz para el proceso de secado de material vegetal. En este apartado analizaremos la técnica del secado en microondas y sus efectos en las propiedades de la semilla, en base a los distintos trabajos realizados, para evaluar su idoneidad en este proceso.

5.5.2. Algunas cuestiones clave sobre el secado de semillas

Los tres parámetros principales que se deben tener en cuenta en la conservación de semillas son: la capacidad de germinar (*viabilidad*), la capacidad para dar lugar a plantas sanas (*vigor*) y el tiempo que mantienen su viabilidad (*longevidad*) (Pérez-García, 2002).

Estos parámetros están influenciados tanto por factores internos como la genética de la propia semilla y el metabolismo de la propia especie, así como por factores externos como la humedad y la temperatura.

Las semillas sufren un proceso natural de deterioro desde el momento en que son separadas de la planta madre. Esto implica distintos procesos fisiológicos que abarcan desde la disminución de reservas, alteraciones del material genético y acumulación de metabolitos tóxicos que condicionan tanto la viabilidad como la longevidad de las semillas (Rajjou y Debeaujon, 2008). El secado supone un aumento de la longevidad de las semillas al disminuir los procesos que favorecen el deterioro de las mismas. Para conseguirlo, se debe actuar sobre dos factores principales: la humedad y la temperatura, tal y como estableció Harrington (1972), a través de sus postulados, más conocidos como reglas de Harrington y que establecen, en resumen, que la longevidad es inversamente proporcional a la temperatura de conservación y al contenido en humedad, considerando que una humedad por debajo del 3% o una temperatura baja producen una serie de cambios a nivel metabólico que aumentan el porcentaje de semillas inviables. Si bien es difícil establecer una regla general que pueda aplicarse a todas las semillas, se considera que un porcentaje de humedad en torno al 14-15% es el óptimo para el estado de conservación, tal y como se establece en el *Codex alimentarius* (OMS-FAO, 2007).

La temperatura, por su parte, influye sobre las enzimas involucradas en las reacciones bioquímicas que suceden durante el proceso de germinación. La actividad de estas enzimas se establece en un rango determinado de temperatura. Si la temperatura es muy alta, las enzimas pueden sufrir procesos de desnaturalización que afectarían a la eficacia de la germinación. Arora *et al.*, (1973) en un estudio clásico sobre el maíz, establecieron que a temperaturas por encima de 60 °C la capacidad de germinación se reduce considerablemente.

Si bien esta cifra puede variar en función de la especie analizada es una referencia que la mayoría de los autores han considerado a la hora de realizar sus investigaciones.

Otro factor a tener en cuenta en este proceso es el tipo de semilla con la que estamos trabajando. La biodiversidad implica distintas adaptaciones para sobrevivir en distintos ambientes, en consecuencia la capacidad de una semilla para germinar dependerá de un ambiente favorable para su desarrollo. En función de este concepto se definen por un lado las *semillas ortodoxas* a aquellas que son tolerantes al secado y que se conservan después de alcanzar un bajo porcentaje de humedad y, por otro, las *semillas recalcitrantes* que son muy sensibles a la desecación y su viabilidad depende de un alto porcentaje de humedad.

Tener estas cuestiones presentes, es básico a la hora de diseñar un método de secado que pretenda ser efectivo, puesto que de la interacción de todos estos factores dependerá en gran medida la eficacia de la técnica de secado empleada.

5.5.3. Efecto del secado de semillas con energía microondas

Si bien existe una proliferación de trabajos sobre el secado en microondas de material vegetal, en lo que respecta al secado de semillas con propósitos de conservación, los estudios se reducen considerablemente.

Hay que tener en cuenta, además, que dichos estudios se basan en un número reducido de especies (menos de veinte) y que la mayoría tratan sobre el maíz (*Zea mays* L.) y el trigo (*Triticum* sp.).

Otra cuestión importante es que los estudios están basados en una metodología muy heterogénea. Se emplean cantidades de semillas muy variables, las potencias analizadas varían mucho, incluso para una misma especie, dependiendo del trabajo, y los parámetros de calidad evaluados son también distintos entre sí, lo que dificulta en su conjunto alcanzar reglas generales respecto a la idoneidad del empleo de la técnica microondas para el secado de semillas. Sin embargo, hay una serie de cuestiones comunes que se derivan de los trabajos realizados.

En primer lugar se observa que el secado de semillas asistido por microondas reduce considerablemente el tiempo de secado con respecto a otras técnicas, aunque la mayoría de autores mencionan este hecho de manera muy superficial a excepción de Shivhare *et al.*, (1993) y de Gursoy *et al.*, (2013).

A su vez, en todos los trabajos analizados, el aumento de la potencia supone un aumento de la velocidad de secado y, en consecuencia, una reducción del tiempo de secado.

Una cuestión clave a la hora de trabajar con material biológico, es que las distintas técnicas empleadas deben ser evaluadas bajo algún criterio de calidad. En el caso de las semillas los criterios de calidad deberán demostrar que la viabilidad y/o vigor no se han visto alterados tras el proceso de secado. Algunos estudios, sobre todo aquellos de mayor antigüedad, se centraron más en aspectos técnicos como la cinética de secado, sin establecer criterios de calidad (Bengtsson y Ohlsson, 1974; Gunasekaran, 1990; Tian *et al.*, 2013). Sin embargo, esto no es lo común de los distintos trabajos consultados y la mayoría de autores analizan algún aspecto que, en conjunto con parámetros como la velocidad de secado y la eficiencia energética permiten considerar la eficiencia de la técnica de secado con microondas en semillas.

Los aspectos que mayoritariamente se han analizado para asegurar la calidad de las semillas son: porcentaje de germinación de semillas, vigor, propiedades físico-químicas y la eficiencia en el control de distintas plagas.

Para establecer la viabilidad de una semilla se realizan ensayos basados en su capacidad de germinación tras el proceso de secado. Para este tipo de ensayos, se cultivan las semillas en placas Petri sobre un papel de filtro humedecido en agua destilada. Posteriormente se incuban a temperatura controlada. La emergencia de la radícula es el criterio empleado para determinar el éxito de la germinación. Los resultados se expresan en porcentaje de semillas germinadas.

En el estudio de Nair *et al.* (2011) determinaron que un flujo continuo de potencia por encima de 2 W/g disminuía drásticamente la viabilidad de semillas (16%) debido principalmente a que se alcanzaban picos de temperatura por encima de 67 °C coincidiendo con el estudio clásico de Arora *et al.*, (1973) que establecía un límite de 60 °C para la germinación de semillas de maíz. También en maíz, Gursoy *et al.* (2013) obtuvieron los mejores porcentajes de germinación para potencias de 70 W. alcanzándose los peores resultados a medida que incrementaban la potencia por encima de ese valor.

Hay que tener en cuenta, a su vez, que el tiempo de exposición a las ondas microondas disminuye la capacidad de germinación (Wesley *et al.*, 1974; Warchalewski *et al.*, 2011; Gursoy *et al.*, 2013). Esta cuestión es importante en los casos donde la humedad inicial es alta, como sucede en las zonas tropicales o subtropicales. La mayoría de los estudios se basan en semillas que parten de un contenido de humedad inicial del 30-35%. Sin embargo, Gursoy *et al.* (2013) establecieron distintas curvas de secado a distintos contenidos de humedad inicial y comprobaron que semillas con una humedad inicial por encima del 40%, disminuyen su capacidad de germinación tras el proceso de secado, al aumentar el tiempo de exposición a las microondas.

La densidad de potencia (Watios/gramo) óptima para asegurar el menor tiempo de secado y el máximo porcentaje de germinación varían según la especie analizada: en semillas de soja (*Glycine max.L*) a 0,13 W/g (Shivhare *et al.*, 1993), en algodón (*Gossypium sp.*) a 0,28 W/g (Wesley *et al.*, 1974), en el fréjol indio (*Vigna aconitifolia* (Jacq.) Marechal, así como en garbanzo (*Cicer arietinum* L.) a 6 W/g (Ragha, 2011). En algunos casos, como sucede en semillas de maíz, se aprecian grandes variaciones en los valores de densidad de potencia debido principalmente a las diferencias respecto al procedimiento empleado: desde 0,25 W/g (Nair *et al.*, 2011) hasta 2 W/g (Gursoy *et al.*, 2013), al igual que ocurre en trigo con variaciones que van desde 0,25 W/g (Reddy *et al.*, 1998; Manickavasagan *et al.*, 2007) hasta 8 W/g (Warchalewski *et al.*, 2011).

En algunos casos, como sucede en la colza (*Brassica oleífera.L*), no se produce germinación en ninguna de las potencias analizadas, todas ellas por encima de 1 W/g (Łupińska *et al.*, 2009).

Una de las cuestiones más problemáticas que producen un descenso considerable del porcentaje de germinación es la presencia de puntos calientes durante el proceso de secado. Esta cuestión fue discutida por Manickavasagan *et al.* (2007), quienes observaron que la presencia de picos de temperatura por encima de 65 °C imposibilitaba la germinación. Para solucionar el problema de la estandarización del campo electromagnético y el térmico algunos autores, como Soproni *et al.* (2009), Hemis *et al.*, (2015), proponen una técnica de secado combinada de energía microondas y aire caliente.

Por otro lado, las propiedades físico-químicas pueden servir para determinar el vigor de una planta. Para este propósito se suelen realizar ensayos de crecimiento y de respuesta al frío (Pérez-García, 2002). Sin embargo, algunas propiedades físicas de la semilla como el tamaño, la densidad aparente o el estado de conservación de la teca o tegumento parecen estar relacionadas con la viabilidad y el vigor de una semilla (Rajjou y Debeaujon, 2008) y pueden aportar información del estado de conservación sin necesidad de realizar ensayos de crecimiento. Los resultados indicaron que el incremento de la velocidad de secado a altas potencias reducía la densidad aparente en maíz (Shivare *et al.*, 1991, 1992 a,b y Gursoy *et al.*, 2013).

Warchalewski *et al.* (2011) observaron que por encima de 64 °C aumentaban considerablemente las grietas sobre el tegumento. En semillas de colza (Łupińska *et al.*, 2009) se registraron el mayor número de semillas fracturadas (60%) entre potencias de 400 W a 800 W.

Gursoy *et al.* (2013), en su estudio sobre el maíz, concluyen que si bien el incremento de la potencia empleada disminuye el contenido de humedad del grano, produce también un descenso en los parámetros de calidad (disminución de la densidad aparente del maíz y un incremento de fracturas en la teca); por ello, recomiendan el empleo de técnicas combinadas basadas en aire caliente y microondas para paliar este efecto.

Respecto al contenido proteico se observaron resultados contradictorios en distintos estudios sobre el trigo. Hamada (2007) observó que la radiación por microondas incrementaba la concentración de aminoácidos y proteínas de las semillas, aunque disminuía el contenido de sacáridos, ácidos nucleicos y compuestos fenólicos. Sin embargo, Soproni *et al.* (2012) no encontraron diferencias significativas en el contenido proteico tras el proceso de secado, mientras que Warchalewski *et al.* (2011) observaron que se producía desnaturalización de proteínas cuando se alcanzaban picos de temperatura por encima de 79 °C. Por último, la técnica de secado con microondas también se ha empleado para evaluar su efecto en el control de distintos tipos de plagas con resultados prometedores.

Reddy (1998) pudo reducir el porcentaje de semillas de trigo infectadas por *Fusarium graminearum* hasta un 7% (respecto del 36% del testigo), sin reducir su calidad, manteniendo un porcentaje de germinación de semillas por encima del 85%. Warchalewski *et al.* (2011) obtuvieron resultados similares con tiempos de exposición intermitente a las microondas de 90 segundos, evitando que se alcanzaran temperaturas más altas de 64 °C. También Pande *et al.* (2012) alcanzaron un 99,5% de mortalidad de insectos estudiando el fréjol indio a potencias altas (808 W en pulsos de 80 segundos), sin embargo, en este estudio no se realizaron pruebas de germinación para evaluar cómo esas potencias elevadas podrían afectar a la viabilidad de las semillas.

5.6. El secado de productos hortofrutícolas

5.6.1. Generalidades sobre la deshidratación de productos hortofrutícolas

El secado o deshidratado es una de las principales técnicas para conservar los productos agrícolas y alimentarios. El principal objetivo es aumentar la vida útil del producto a través de la reducción de la actividad acuosa extrayendo el agua de constitución del vegetal de manera controlada.

La importancia de la reducción de la actividad acuosa en la conservación de alimentos se basa en su efecto en la supresión del crecimiento de microorganismos e inhibición de reacciones químicas y enzimáticas. Para asegurar la estabilidad durante el almacenamiento la actividad acuosa normalmente ha de ser inferior al 0,7 (Sunjka *et al.*, 2004; Ramaswamy y Marcotte, 2005). Mediante este procesamiento, el material vegetal sufre un deterioro limitado durante el almacenamiento lo que permite la disponibilidad del producto fuera de la época de cosecha sin necesidad de refrigeración o congelación continua, métodos de conservación que conllevan mayores costos económicos y energéticos.

Existen otros beneficios derivados del secado o deshidratación de alimentos, como la reducción del peso y el volumen, lo que conlleva menores costes de transporte y almacenamiento. Por otro lado, los vegetales deshidratados se pueden incorporar fácilmente como aditivos en los alimentos procesados y manufacturados, tales como vegetales en sopas instantáneas, frutas para pasteles y aperitivos, colorantes alimentarios, etc.

El mercado mundial de alimentos deshidratados es de gran importancia para la mayoría de los países. La producción y comercialización de alimentos procesados secos o deshidratados ha experimentado en los últimos años un alto crecimiento, registrándose un consumo global valorizado en 157,3 mil de millones USD al 2014. En productos hortofrutícolas deshidratados, los principales exportadores son Estados Unidos (24,3% del valor total exportado en 2009), China (14,2%), Turquía (11,3%), Alemania (4,4%), España (3,5%), Irán (3,4%), India (3,2%), Chile (2,8%), Países Bajos (2,4%) y Hong Kong (2,1%). Se espera que esta categoría muestre un crecimiento en los próximos cuatro años, a una tasa promedio anual del 3%, como parte de una fuerte competencia con la categoría de alimentos congelados.

Sin embargo, el secado de alimentos conlleva una serie de inconvenientes ya que este proceso ocasiona alteraciones en las características químicas y físicas del producto, las cuales repercuten en la calidad final del mismo. En lo concerniente a productos de alimentación la calidad se refiere, en primer lugar, a la seguridad y en segundo término a las propiedades nutritivas y sensoriales (Bonazzi y Dumoulin, 2011). Un mayor procesamiento supone una mayor seguridad del alimento, pero suele ir asociado a mayor pérdida de características nutricionales y organolépticas. Entre las alteraciones sufridas por el secado se incluyen el endurecimiento superficial del alimento, debido principalmente a un exceso de calentamiento de las capas superficiales durante la eliminación de la humedad del núcleo más interno, junto con una disminución del volumen o retracción. Por otro lado, se pueden producir cambios en cuanto a pérdida de sabor y olor, deterioro de color y textura, y una pérdida general del valor nutricional.

Estos efectos están relacionados con la temperatura y el tiempo del proceso de secado, siendo agravados por el método de secado más usado en la industria alimentaria, el secado por convección con aire caliente (Nijhuis *et al.*, 1998; Li *et al.*, 2009). Este método ha proliferado por su simplicidad, bajo coste de construcción y la buena caracterización de sus procedimientos operativos, sin embargo, se ha mostrado que el secado por convección es ineficiente energéticamente y afecta a la calidad del producto (Lin *et al.*, 1998; Durance y Wang, 2002; Grabowski y Kudra, 2002; Fu *et al.*, 2005).

La necesidad de eliminar estos problemas, previniendo una pérdida significativa de calidad y alcanzando procesos térmicos más rápidos y efectivos, ha llevado a la búsqueda y desarrollo de nuevos métodos de procesamiento térmico para el secado de productos hortofrutícolas y alimentarios. Como ya se ha descrito en apartados anteriores el secado por microondas presenta ciertas ventajas como una alta velocidad de secado, menor consumo energético y mejor calidad de los productos. Por ello, en los últimos años el secado por microondas ha ganado gran popularidad como método de secado alternativo aplicado a una amplia variedad de productos, tales como frutas (Funebo y Ohlsson, 1998; Maskan, 2000; Maskan, 2001; Mohammad *et al.*, 2008) y vegetales (Khraisheh *et al.*, 2004; Alibas, 2007; Li *et al.*, 2010).

5.6.2. Efecto del secado con energía microondas en productos hortofrutícolas

Como se ha expuesto anteriormente, las técnicas de secado basadas en microondas ofrecen un gran potencial para el incremento de la calidad final de los productos deshidratados con una disminución del tiempo de secado y, consecuente, una reducción del consumo energético.

En las investigaciones realizadas sobre el uso de microondas para el secado de productos hortofrutícolas es crucial la determinación de las curvas de secado del material analizado con cada uno de los métodos de secado a evaluar. La comparación de estas curvas de secado obtenidas con el método por convección con aire caliente y con microondas muestra una importante disminución del tiempo y de la energía consumida al aplicar la tecnología microondas. En el trabajo de Maskan (2000), en el que analiza el secado de muestras de banana, se observó una reducción del tiempo necesario para alcanzar una humedad de 0,1 Kg H₂O/kg sólido seco, desde 482 minutos para el secado con aire caliente a 13-27 minutos con microondas en muestras de 4,3 mm de espesor. Otros autores han obtenido resultados similares (Giri y Prasad, 2007; Therdthai y Zhou, 2009; Akoy y von Höresten, 2015). Por otro lado, en estos trabajos también se evidencia una disminución del tiempo empleado con el aumento de la potencia microondas del tratamiento o la temperatura (Ozkan *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2010; Akoy y von Höresten 2015). No obstante, el uso de altas potencias de microondas o temperaturas tiene como resultado, habitualmente, un producto de poca aceptación, debido a que se puede producir la carbonización del tejido de la muestra (Ohlsson y Bengtsson, 2001; Wray y Ramaswamy, 2015). El control de la temperatura así como la densidad de potencia (vatios de potencia microondas por gramo de muestra) son aspectos cruciales para minimizar el daño potencial por exceso de calor.

En la evaluación de los métodos de secado asistido por microondas aplicado a productos hortofrutícolas resulta imprescindible realizar una valoración de la calidad del producto seco final obtenido. Es necesario destacar que para frutas y vegetales la calidad de la materia prima (variedad, madurez,...) es la principal condicionante para la obtención de un producto deshidratado de primera calidad. Desde el punto de vista del consumidor, la calidad de los productos deshidratados depende de aspectos sensoriales (color, olor, sabor, textura), microbiológicos y nutricionales. Desde el punto de vista sensorial el color supone el criterio más importante para la apreciación global del producto. Es un hecho que el sabor, olor y la textura no pueden ser percibidos por el consumidor cuando compran por primera vez un producto deshidratado empaquetado, siendo el color su única guía de la calidad del mismo (Bonazzi y Dumoulin, 2011).

El procesado térmico puede afectar al color debido, fundamentalmente, a la degradación de pigmentos (carotenoides, antocianina, clorofilas) susceptibles a degradación y por reacciones de oscurecimiento no enzimáticas (reacciones de Maillard y oxidación del ácido ascórbico). Estos procesos son inducidos por el secado y pueden continuar desarrollándose durante el almacenamiento.

La medición del color del producto antes y después del secado se usa como un método indirecto para estimar los cambios de color de los alimentos, siendo un método ampliamente analizado para la estimación de la calidad del producto final tras los procesos de secado. Las coordenadas de color de Hunter (L , a , b) han sido empleadas con éxito para describir el deterioro visual de color en alimentos, aportando información de gran utilidad en el control de calidad en frutas y derivados (Maskan, 2000; Maskan, 2001; Sunjka *et al.*, 2004; Mohammad *et al.*, 2008).

Maskan (2001) estudió la cinética de la degradación de color durante el secado de kiwi con microondas, aire caliente y aire caliente terminado con microondas; y concluyó que el uso de microondas, a una potencia de 210 W, tiene un efecto más negativo en el color de la muestra respecto al secado por aire caliente (60 °C). Sin embargo, en manzana Feng y Tang (1998) encontraron una mayor reducción por secado con aire caliente que con microondas. Un resultado similar fue obtenido por el propio Maskan (2001) en banana, mostrando una reducción menor del color con el secado por microondas respecto al secado por aire caliente; aunque la combinación de ambos (secado por aire caliente finalizado con microondas) resultó ser el mejor tratamiento para mantener la calidad del color respecto al producto fresco. En otros trabajos se ha analizado el efecto del secado de microondas a distintas potencias. Chua y Chou (2005) evaluaron el cambio de color en zanahoria y Ozkan y colaboradores (2007) en espinaca, obteniendo ambos los mejores resultados en términos de color en el rango de potencias entre 500 W y 750 W.

El aroma y el sabor de los productos vegetales vienen determinados por componentes volátiles que pueden sufrir evaporación durante el proceso de secado, debido al calentamiento del producto y la eliminación del agua. El aroma es una característica importante de la calidad de los productos alimentarios que determina, en gran medida, la aceptación y preferencia del producto por parte del consumidor. La preservación del aroma y evitar la aparición de aromas indeseados es una tarea relevante. Sin embargo, la mayor parte de los equipos disponibles para el análisis de los compuestos aromáticos son costosos, lentos y complejos (Li *et al.*, 2006) lo que dificulta la detección de volátiles en tiempo real en alimentos. Hasta el momento hay pocos trabajos que analicen la variación de los compuestos volátiles de un producto alimenticio durante el proceso de secado por microondas. En albahaca se ha evaluado la influencia de distintos métodos de secado en los compuestos aromáticos y se ha comprobado la ventaja del uso de la técnica de microondas en la obtención de un producto seco de buena calidad aromática, aunque el proceso de deshidratación con microondas al vacío resultó el método más efectivo (Yousif *et al.*, 1999, Calín-Sánchez *et al.*, 2012). Li y colaboradores (2009 y 2010) han desarrollado un método para la detección en tiempo real de la variación de compuestos volátiles en zanahoria durante el secado con microondas. Los resultados mostraron que la mejor estrategia para preservar los compuestos volátiles es la implementación de un método de control de lógica difusa de secado por microondas, basado en la detección en tiempo real de los compuestos volátiles. El sistema diseñado por estos autores permite alcanzar la temperatura, potencia y control de volátiles requeridos para lograr un producto de primera calidad.

Respecto al efecto de la composición nutricional de los productos vegetales sometidos al proceso de secado por microondas, el análisis más frecuente que realiza los investigadores que trabajan en este campo es la evaluación de la retención de vitamina C (ácido ascórbico) tras el proceso de secado. Este elemento es seleccionado como un indicador de calidad, debido a su naturaleza termolábil. Su deterioro depende de la temperatura del aire, la potencia del microondas y el contenido de humedad.

Se ha determinado la variación del contenido en vitamina C en frutas y vegetales deshidratados con microondas, tales como hojas de espinaca (Ozkan *et al.*, 2007), albaricoques (Karatas y Kanişlı, 2007), patata (Khraisheh *et al.*, 2004) y zanahoria (Lin *et al.*, 1998). Estos autores alcanzaron resultados similares y concluyeron que la técnica de secado por microondas es más efectiva frente al secado por aire caliente en términos de pérdida de vitamina C.

Según Khraisheh y colaboradores (2004), el contenido de ácido ascórbico total decrece progresivamente con el incremento del tiempo de procesado, a una temperatura o potencia constante. La estabilidad y retención de la vitamina C no depende únicamente de las condiciones de secado, sino también del porcentaje de humedad de la muestra. Las muestras secadas en microondas retienen una concentración mayor de ácido ascórbico en comparación con las muestras secadas por convección, para un contenido específico de humedad.

Otra de las desventajas asociadas al secado de productos de origen vegetal es la disminución de volumen que sufren durante este proceso, por lo que el estudio de este fenómeno es relevante para alcanzar un buen conocimiento del proceso de secado y controlar las características del producto. La evaluación cuantitativa de la disminución de volumen sufrida por la pérdida de agua se basa en el coeficiente de retracción (S_b). Varios autores han mostrado en sus trabajos que las muestras secadas con microondas sufren menos retracción (disminución de volumen) que aquellas secadas mediante los métodos convencionales por aire caliente, lo cual supone una ventaja para la utilización del microondas en el secado de alimentos (Khraisheh *et al.*, 2004; Hu *et al.*, 2006; Rattanadecho y Makul, 2015).

Otra de las características ampliamente usada para evaluar la calidad de un producto vegetal deshidratado es su capacidad de rehidratación. Una gran parte de los productos deshidratados requieren la rehidratación para su consumo, como por ejemplo las sopas instantáneas que contienen alimentos vegetales. La rehidratación implica una reversión de algunos cambios fisicoquímicos que se producen durante el proceso de secado. En general, la tasa de absorción de agua y el grado de recuperación del producto seco está influenciado por el grado de sequedad y la alteración de la integridad celular. Esta propiedad está relacionada con las propiedades físicas del alimento secado y con las características de retracción sufrida durante el proceso. Los menores valores de capacidad de rehidratación ponen de manifiesto una retracción del producto por calor severo y/o secado prolongado, resultando en cambios fisicoquímicos irreversibles. La rehidratación normalmente no conlleva la recuperación del producto inicial. El secado provoca transformaciones irreversibles, tales como desnaturalización de proteínas, modificaciones del aroma y del color, y la pérdida de firmeza y forma del producto. Para comparar las capacidades de rehidratación se han definido diferentes criterios y estándares, como temperatura o agitación, de acuerdo a tipo de producto y su uso final (Bonazzi y Dumoulin, 2011).

Los trabajos realizados en patata (Khraisheh et al., 2004) y tomate (Durance y Wang, 2002) muestran un incremento en el índice de rehidratación en las muestras en cuyo secado se ha utilizado la técnica de microondas en comparación con aquellas secadas por convección con aire caliente.

Sin embargo, en cuanto a banana se han obtenido resultados dispares. Maskan (2000) comparó la capacidad de rehidratación de muestras de banana a distintas potencias de microondas, secado al aire y mediante la combinación de ambos métodos y no se observaron diferencias significativas en los resultados obtenidos con cada uno de los métodos. No obstante, otros autores (Drouzas y Schubert, 1996) habían realizado con anterioridad experimentos de secado de muestras de banana con microondas en los que controlaron y monitorearon la temperatura y la presión, lo que les permitió obtener productos con buena capacidad de rehidratación.

5.7. Conclusiones

La tecnología microondas se ha empleado con éxito en distintos procesos de calentamiento y secado industrial, debido a su mayor rendimiento energético y mayores velocidades de secado, lo que trae consigo una disminución del tiempo de secado. Sin embargo, esta tecnología presenta algunas limitaciones para su aplicación en el proceso de secado industrial, tales como la no uniformidad inherente del campo electromagnético dentro de una cavidad microondas, lo que origina una distribución de temperaturas no uniforme y la creación de puntos calientes que podría derivar en la carbonización o quemado del producto. Además, las altas velocidades de calentamiento pueden afectar a la calidad del producto seco final. Los ensayos realizados en este campo ponen de manifiesto la posibilidad de superar estas desventajas usando bajas potencias o controlando la temperatura de secado. En cuanto a los experimentos realizados para evaluar el efecto del secado por microondas, se observa una gran heterogeneidad en los tratamientos realizados. En la mayoría de los casos hay ausencia de datos de la temperatura alcanzada durante el transcurso del proceso, lo que constituye un factor limitante, dada la importancia que tiene este parámetro para el secado de los tejidos vegetales. Por tanto, el control de la temperatura es imprescindible para evitar los efectos adversos derivados del proceso de secado. Muchos de los trabajos se centran en la cinética del proceso secado y hacen especial énfasis en el tiempo y la velocidad. Sin embargo, se detecta una ausencia de datos referentes al efecto del proceso secado en la calidad del producto final. En el caso del secado de semillas los estudios se limitan, principalmente, a la evaluación de la tasa de germinación, evidenciándose una carencia de estudios más profundos sobre los cambios a nivel tisular. En cuanto al efecto del secado por microondas en productos vegetales deshidratados se identifica un aumento de la evaluación de parámetros referentes a la calidad del producto en las investigaciones recientes, aunque sería recomendable analizar más a fondo el efecto en el contenido proteico, carbohidratos, retención de vitaminas hidrosolubles y cambios en el sabor.

En general, del análisis de los trabajos realizados en esta área se puede concluir que la tecnología microondas presenta un gran potencial para su uso en el secado de productos agrícolas. No obstante, es necesario avanzar en las investigaciones y utilizar procedimientos experimentales más estandarizados que permitan una mejor comparación de los resultados.

Referencias bibliográficas

- Akoy, E. O., von Höresten, D. (2015). Microwave drying of mango slices at controlled temperatures. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 12 (2), 374.
- Alibas, I. (2007). Microwave, air and combined microwave–air-drying parameters of pumpkin slices. *LWT - Food Science and Technology*, 40 (8), 1445-1451.
- Arora, B. K., Bhatnagar, A.P., Bakshi, A.S. (1973). Critical temperatures for drying maize seeds. *Journal of Agricultural Engineering*, 10, 14-19.
- Barrozo, M., Mujumdar, A. S. (2014). Air-drying of seeds: A review. *Drying Technology*, 32 (10), 1127-1141.
- Bengtsson, N. E., Ohlsson, T. (1974). Microwave heating in the food industry. *Proceedings of the IEEE*, 62 (1), 44-55.
- Bonazzi, C., Dumoulin, E. (2011). Quality changes in food materials as Influenced by drying processes. *Modern Drying Technology*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1-20.
- Brammer, J.G., Bridgwater, A.V. (1999). Drying technologies for an integrated gasification bio-energy plant, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 3, 243-289.
- Brodie, G. (2012). Applications of microwave heating in agricultural and forestry related industries. En: *The development and application of microwave heating*. W. Cao Editor, In Tech., Chapter 3, 45-78
- Calín-Sánchez, Á., Lech, K., Szumny, A., Figiel, A., Carbonell-Barrachina, Á.A. (2012). Volatile composition of sweet basil essential oil (*Ocimum basilicum* L.) as affected by drying method. *Food Research International*, 48 (1), 217-225.
- Chandrasekaran, S., Ramanathan, S., Basak, T. (2012). Microwave material processing—a review. *AIChE Journal*, 58 (2), 330-363.
- Cherbanski, R., Molga, E. (2009). Intensification of desorption processes by use of microwaves—An overview of possible applications and industrial perspectives. *Chemical Engineering and Processing*. 48, 48-58.
- Chua, K. J., Chou, S. K. (2005). A comparative study between intermittent microwave and infrared drying of bioproducts. *International Journal of Food Science & Technology*, 40 (1), 23-39.
- CMF (1993). Industrial microwave heating applications. EPRI Center for Materials Fabrication (CMF). 4 (3).
- Clark, D.E, Folz, D.C., West, J.K. (2000). Processing materials with microwave energy. *Materials Science and Engineering*. A287, 153–158.
- Drouzas, A. E., Schubert, H. (1996). Microwave application in vacuum drying of fruits. *Journal of Food Engineering*, 28 (2), 203-209.
- Durance, T. D., Wang, J. H. (2002). Energy consumption, density, and rehydration rate of vacuum microwave- and hot-air convection- dehydrated tomatoes. *Journal of Food Science*, 67 (6), 2212-2216.

- Feng, H., Tang, J. (1998). Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed. *Journal of Food Science*, 63 (4), 679-683.
- Fu, Y.C., Dai, L., Yang, B.B. (2005). Microwave finish drying of (tapioca) starch pearls. *International Journal of Food Science & Technology*, 40 (2), 119-132.
- Funebo, T., Ohlsson, T. (1998). Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. *Journal of Food Engineering*, 38 (3), 353-367.
- GAD-Cotopaxi (2015). Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Cotopaxi 2025. Latacunga, Ecuador, Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Cotopaxi: 166.
- Giri, S. K., Prasad, S. (2007). Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. *Journal of Food Engineering*, 78 (2), 512-521.
- Grabowski, Marcotte, M., Poirier, M., Kudra T. (2002). Drying characteristics of osmotically pretreated cranberries—energy and quality aspects. *Drying Technology*, 20 (10), 1989-2004.
- Graham, J. (2007). Microwaves for coal quality improvement: The DRYCOL project. SACPS/ International Pittsburgh Coal Conference 2007, Johannesburg, South Africa.
- Gunasekaran, S. (1990). Grain drying using continuous and pulsed microwave energy. *Drying Technology*, 8 (5), 1039-1047.
- Gursoy, S., Choudhary, R., Watson, D. G. (2013). Microwave drying kinetics and quality characteristics of corn. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 6 (1), 90-99.
- Hamada, E.A.M. (2007) Effects of microwave treatment on growth, photosynthetic pigments and some metabolites of wheat, *Biologia Plantarum*, 51 (2), 343–345.
- Harrington, J. F. (1972). Seed storage and longevity. *Seed biology*, 3, 145-245.
- Hemis, M., Choudary, R. Gariépy, Y., Raghavan, V. (2015). Experiments and modelling of the microwave assisted convective drying of canola seeds. *Biosystems Engineering*, 139, 121-127.
- Hu, Q., Zhang, M., Mujumdar, A.S., Xiao, G., Jin-cai, S., (2006). Drying of edamames by hot air and vacuum microwave combination. *Journal of Food Engineering*, 77 (4), 977-982.
- Jones, D.A., Lelyveld, T.P, Mavrofidis, S.D., Kingman, S.W., Miles, N.J. (2002). Microwave heating applications in environmental engineering—a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 34 (2), 75-90.
- Karatas, F., Kanişlı, F. (2007). Variations of vitamins (A, C and E) and MDA in apricots dried in IR and microwave. *Journal of Food Engineering*, 78 (2), 662-668
- Khraisheh, M., McMinn W., Magee, T. (2004). Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. *Food Research International*, 37 (5), 497-503.
- Kim, J., Mun, S.C., Ko, H.U., Kim, K.B., Khondoker, M.A.H, Zhai, L. (2012). Review of Microwave Assisted Manufacturing Technologies. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 13, (12), 2263-2272.

- Koleini, S. M. J., Barani, K. (2012). Microwave heating applications in mineral processing. En: *The Development and Application of Microwave Heating*. W. Cao, InTech, Chapter 4, 79-104.
- Li, Z., Raghavan, G.S.V., Wang, N. (2010). Carrot volatiles monitoring and control in microwave drying. *LWT - Food Science and Technology*, 43 (2), 291-297.
- Li, Z., Raghavan, G.S.V., Wang, N., Garipey, Y. (2009). Real-time, volatile-detection-assisted control for microwave drying. *Computers and Electronics in Agriculture*, 69 (2), 177-184.
- Li, Z., Wang, N.; Vigneault, C. (2006). Electronic nose and electronic tongue in food production and processing. *Stewart Postharvest Review*, 2 (4), 1-5.
- Lin, T. M., Durance T.D., Scaman, C.H. (1998). Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices. *Food Research International*, 31 (2), 111-117.
- Łupińska, A., Koziol, A., Araszkiewicz, M., Lupinski, M. (2009). The changes of quality in rapeseeds during microwave drying. *Drying Technology*, 27 (8), 857-862.
- Makul, N., Rattanadecho, P., Agrawal, D.K. (2014). Applications of microwave energy in cement and concrete – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 37, 715-733.
- Manickavasagan, A., Jayas, D.S., White, N.D.G. (2007). Germination of wheat grains from uneven microwave heating in an industrial microwave dryer. *Canadian Biosystems Engineering*, 49.
- Maskan, M. (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44 (2), 71-78.
- Maskan, M. (2001). Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48 (2), 169-175.
- McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriott, P. (1998). Secado de sólidos: En: *Operaciones unitarias en Ingeniería Química*. McGraw-Hill, Madrid, Cuarta Edición. Chapter 25, 821-866.
- Menéndez, J.A., Arenillas, A., Fidalgo, B., Fernández, Y. Zubizarreta, L., Calvo, E.G., Bermúdez, J.M. (2010). Microwave heating processes involving carbon materials. *Fuel Processing Technology*. 91, 1-8.
- Mohammad, A., Rafiee, S., Emam-Djomeh, Z., Keyhani, A. (2008). Kinetic models for colour changes in kiwifruit slices during hot air drying. *World Journal of Agricultural Sciences*, 4 (3), 376-383.
- Mujumdar, A. S. (2015). Principles, classification, and selection of dryers. En: *Handbook of Industrial Drying*, Fourth Edition. A. S. Mujumdar. Boca Raton, FL, CRC Press, Chapter 1, 3-29.
- Nair, G. R., Li, Z., Garipey, Y., Raghavan, V. (2011). Microwave drying of corn (*Zea mays* L. ssp.) for the seed industry. *Drying Technology*, 29 (11), 1291-1296.
- Nijhuis, H., Topping, H., Muresan, S., Yuksel, D., Leguijt, C., Klok, W. (1998). Approaches to improving the quality of dried fruit and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 9 (1), 13-20.
- Nikolopoulos, N., Violidakis, I., Karampinis, E., Agraniotis, M., Bergins, C., Grammelis, P., Kakaras, E. (2015). Report on comparison among current industrial scale lignite drying technologies (A critical review of current technologies). *Fuel*, 155, 86-114.

- Ohlsson, T., Bengtsson, N. (2001). Microwave technology and foods. *Advances in Food and Nutrition Research*, Academic Press. 43: 65-140.
- OMS-FAO. (2007). *Codex alimentarius, cereales, legumbres, leguminosas y productos proteínicos vegetales*. Organización Mundial de la Salud y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Osepchuk, J. M. (1984). A history of microwave heating applications. *Microwave Theory and Techniques*, IEEE Transactions on, 32 (9), 1200-1224.
- Ozkan, I.A., Akbudak, B., Akbudak, N. (2007). Microwave drying characteristics of spinach. *Journal of Food Engineering*, 78 (2), 577-583.
- Pande, R., Mishra, H.N., Singh, M.N. (2012). Microwave drying for safe storage and improved nutritional quality, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60 (14), 3809–3816.
- Pérez-García, F. (2002). Viabilidad, vigor, longevidad y conservación de semillas. *Conservación y caracterización de recursos fitogenéticos*. F. González-Andrés y J. M. Pita. Madrid: 51-68.
- Ragha, L. (2011). Effects of low-power microwave fields on seed germination and growth rate, *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 5 (3), 165–171.
- Rajjou, L., Debeaujon, I. (2008). Seed longevity: survival and maintenance of high germination ability of dry seeds. *Comptes rendus biologies*, 331 (10): 796-805.
- Ramaswamy, H. S., Marcotte, M. (2005). *Food Processing: Principles and Applications*.
- Rao, Z., Zhao, Y., Huang, C., Duan, C., He, J. (2015). Recent developments in drying and dewatering for low rank coals. *Progress in Energy and Combustion Science*, 46, 1-11.
- Rattanadecho, P., Makul, N. (2016). Microwave-assisted drying: A review of the state-of-the-art. *Drying Technology*, 34 (1), 1-38.
- Reddy, M.V.B., Raghavan, G.S.V., Kushalappa, A.C., Paulitz, T.C. (1998). Effect of microwave treatment on quality of wheat seeds infected with *Fusarium graminearum*, *J. Agric. Eng. Res.*, 71, 113–117.
- Richardson, J.F., Harker, J.H., Backhurst, J.R. (2002). Drying. En: Coulson and Richardson's *Chemical Engineering*. Vol. 2. Fifth Edition, Particle Technology and Separation Processes. Butterworth-Heinemann, Oxford. Chapter 16, pp. 961 – 969.
- Schiffmann, R. F. (2015). Microwave and Dielectric Drying. En: *Handbook of Industrial Drying*, Fourth Edition. A. S. Mujumdar. Boca Raton, FL, CRC Press, Chapter 13, 283-301.
- SENPLADES (2013). *Plan Nacional de Desarrollo /Plan Nacional para el Buen Vivir 2013-2017*. Quito, Ecuador, Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES).
- Shaheen M.S., El-massry, K.F., El-ghorab, A.H., Anjum, F.M. (2012). Microwave applications in thermal food processing. En: *The Development and Application of Microwave Heating*. W. Cao, InTech, Chapter 1, 3-16.

- Shivhare, U.S., Raghavan, G.S.V., Bosisio, R.G. (1991). Drying of corn using variable microwave power with a surface wave applicator, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 26 (1), 38–44.
- Shivhare, U.S., Raghavan, G.S.V., Bosisio, R.G. (1992a). Microwave drying of corn II: constant power, constant operation, *Transaction of The ASAE*, 35 (3), 951–957.
- Shivhare, U.S., Raghavan, G.S.V., Bosisio, R.G., Mujumdar, A.S. (1992b). Microwave drying of corn III: constant power, intermittent operation, *Transactions of the ASAE*, 35 (3), 959–962.
- Shivhare, U., Raghavan, G.S.V., Bosisio, R.G., Giroux, M. (1993). Microwave drying of soybean at 2.45 GHz. *Journal of microwave power and electromagnetic energy*, 28, 11-17.
- Soproni, V.D., Hathazi, F. I., Arion, M. N., Molnar C. O., Bandici, L. (2009) Aspects regarding the adapting and optimization of mixed drying systems microwave-hot air for the processing of agricultural seeds. *PIERS Proceedings*, 23-27.
- Soproni, V.D. Vicas, S.M. Leuca, T. Arion, M.N. Hathazi F.I., Molnar, C.O. (2012) High frequency electromagnetic field modeling and experimental validation of the microwave drying of wheat seeds, *Progress In Electromagnetics Research B*, 41, 419–439.
- Sunjka, P.S., Rennie, T.J., Beaudry, C., Raghavan, G.S.V. (2004). Microwave-convective and microwave-vacuum drying of cranberries: A comparative study. *Drying Technology*, 22 (5), 1217-1231.
- Therdthai, N., Zhou, W. (2009). Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen). *Journal of Food Engineering*, 91 (3), 482-489.
- Thostenson, E.T., Chou, T.W. (1999). Microwave processing: fundamentals and applications. *Composites: Part A*. 30, 1055-1071.
- Tian, Y., Liang, J., Zeng, H., Zheng, B. (2013). Microwave drying characteristics and kinetics of lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) seeds. *International Journal of Food Engineering*, 9 (1), 91-98.
- Treybal, R.E. (1980). Secado de sólidos: En: Operaciones de transferencia de masa. McGraw-Hill, Buenos Aires, Segunda edición. Chapter 12, pp. 723 – 791.
- Venkatesh, M.S.; Raghavan, G.S.V. (2004). An Overview of Microwave Processing and Dielectric Properties of Agri-food Materials. *Biosystems Engineering*. 88 (1), 1–18.
- Warchalewski, J. R., Gralik, J. Grundas, S., Pruska-Kedzior, A., Kedzior, Z. (2011). Changes in microwave-treated wheat grain properties. *Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials*. S. a. Grundas, InTech.
- Wray, D., Ramaswamy, H. S. (2015). Novel concepts in microwave drying of foods. *Drying Technology*, 33 (7), 769-783.
- Wesley, R., Lyons, D. W., Garner T. H., Garner, W. E. (1974). Some effects of microwave drying on cottonseed. *Journal of Microwave Power*, 9 (4), 329-340.

- Yousif, A.N., Scaman, C.H., Durance, T.D., Girard, B. (1999). Flavor volatiles and physical properties of vacuum-microwave- and air-dried sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47 (11), 4777-4781.
- Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A.S., Wang, S. (2006). Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 17 (10), 524-534.