

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Departamento de Tecnología de Alimentos



**CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO Y OPTIMIZACIÓN DEL
SECADO INTERMITENTE: APLICACIÓN AL SECADO DE
MANGO (*Mangifera indica* L var. Tommy Atkins)**

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

Henry Alexander Váquiro Herrera

Dirigida por:

Dr. D. José Bon Corbín

Dr. D. Antonio Mulet Pons

Valencia, 2009



DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS
UNIVERSIDAD POLITÈCNICA DE VALENCIA

D. JOSÉ BON CORBÍN, PROFESOR TITULAR DE UNIVERSIDAD DEL DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS, Y D. ANTONIO MULET PONS, CATEDRÁTICO DE UNIVERSIDAD DEL DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS DE LA UNIVERSIDAD POLITÈCNICA DE VALENCIA

CERTIFICAN: que la memoria titulada “CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO Y OPTIMIZACIÓN DEL SECADO INTERMITENTE: APLICACIÓN AL SECADO DE MANGO (*Mangifera indica* L var. Tommy Atkins)”, que para aspirar al grado de Doctor en Ciencia y Tecnología de Alimentos presenta D. Henry Alexander Váquiro Herrera, realizada bajo nuestra dirección en el Departamento de Tecnología de Alimentos de la Universidad Politécnica de Valencia, cumple las condiciones adecuadas para su aceptación como Tesis Doctoral, por lo que

AUTORIZAN: Al interesado a su presentación en el Departamento de Tecnología de Alimentos de la Universidad Politécnica de Valencia.

Y para que conste a los efectos oportunos, presentamos la referida memoria, firmando el presente certificado en Valencia a 27 de abril de 2009.

Fdo. Dr. D. José Bon Corbín

Fdo. Dr. D. Antonio Mulet Pons

A Inés y Enrique

*por su intachable labor como padres,
porque su generosidad y esfuerzo
han sido la fuente de mis éxitos.*

A Johana

*por apoyarme y acompañarme
siempre, por llenar de alegría mi
presente y de inspiración mi futuro.*

Este trabajo se realizó en el Grupo de Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios (ASPA) del Departamento de Tecnología de Alimentos de la Universidad Politécnica de Valencia, gracias al apoyo de personas e instituciones a las cuales quiero expresar mi más sincero agradecimiento:

A los doctores José Bon Corbín y Antonio Mulet Pons, directores de esta tesis, por su apoyo y orientación durante el desarrollo de la misma. Su experiencia, dedicación y colaboración han sido imprescindibles para la realización de este trabajo.

A la Universidad del Tolima y al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias) de Colombia, por el apoyo financiero, que en calidad de becario, recibí para la realización de los estudios de doctorado.

A los investigadores del Departamento de Química de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de las Islas Baleares (Palma de Mallorca, España), en especial a las doctoras Carmen Rosselló y Susana Simal por sus contribuciones a este estudio.

A los investigadores del Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos de la Universidade Estadual Paulista (São Paulo, Brasil), en especial al doctor Javier Telis Romero por haberme ofrecido su experiencia y amistad, y al doctor Renato Alexandre Ferreira Cabral por su aporte en la fase experimental de este trabajo.

Al doctor Gianpaolo Ruocco y la doctora Maria Valeria De Bonis del Grupo de Fluido-dinámica Computacional en Alimentos (CFDFOOD) de la Università Degli Studi Della Basilicata (Potenza, Italia) por su amistad y colaboración.

A los técnicos de laboratorio, Ramón y Nieves, en quienes siempre hallé una abundante mezcla de colaboración y paciencia.

A todos los compañeros y excompañeros del grupo ASPA: Juan, José, Neus, Gabriela, José Vicente, Edith, Julián, Carmina, Leticia, Laura, Tania, Gracia, África, Ciro y Eva por todos los momentos compartidos y por que su compañía hacía del “laboratorio” el lugar más agradable para trabajar.

A mis amigos colombianos por su grata compañía lejos de casa, por todas aquellas conversaciones en las que siempre concluimos la necesidad de construir un país más humano, más generoso y más solidario.

Índice General

Resumen	i
Resum	ix
Abstract.....	xv
1. JUSTIFICACIÓN E INTERÉS DE LA INVESTIGACIÓN	1
2. INTRODUCCIÓN	7
2.1. Aspectos generales del secado convectivo	9
2.1.1. Fundamentos del secado por aire caliente	10
2.1.2. Etapas del proceso.....	11
2.1.3. Eficiencia del proceso.....	13
2.1.4. Aspectos de calidad relacionados con el secado	17
2.1.5. Modelización del proceso.....	19
2.1.6. Propiedades físicas relevantes en el secado de alimentos.....	23
2.2. Secado intermitente	39
2.2.1. Secado intermitente por suministro periódico de energía térmica.....	40
2.2.2. Estudio de la influencia de la intermitencia sobre la eficiencia del proceso y sobre la calidad del producto	44
2.2.3. Modelización y simulación del proceso de secado intermitente.....	49
2.3. El mango	54
2.3.1. Características generales	54
2.3.2. Importancia económica	55
2.3.3. Secado de mango	56
2.4. Consideraciones finales.....	61
3. OBJETO Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	65
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	69
4.1. Experiencias de secado	71
4.1.1. Descripción de los esquemas de operación	71
4.1.2. Descripción del sistema de secado	73
4.1.3. Materia prima	76

4.1.4. Preparación de las muestras	77
4.1.5. Cinéticas de secado	78
4.2. Modelización de las cinéticas de secado	84
4.2.1. Transferencia de materia	85
4.2.2. Transferencia de calor	86
4.2.3. Condiciones iniciales y de contorno	89
4.3. Propiedades físicas del mango.....	94
4.3.1. Conductividad térmica.....	94
4.3.2. Calor específico	97
4.3.3. Isotermas de sorción y calor isostérico de sorción	102
4.3.4. Coeficientes de transferencia interfaciales.....	105
4.4. Identificación paramétrica y validación del modelo difusional..	108
4.4.1. Experiencias de secado utilizadas en la identificación y la validación	108
4.4.2. Modelo de la difusividad efectiva	109
4.4.3. Definición de los criterios de ajuste.....	110
4.4.4. Procedimiento de identificación.....	111
4.5. Optimización del proceso de secado intermitente	113
4.5.1. Formulación de la función objetivo	113
4.5.2. Formulación del problema de optimización	116
4.6. Simulación y optimización computacional.....	118
4.6.1. Modelización mediante COMSOL Multiphysics®	118
4.6.2. Desarrollo de algoritmos en Matlab® para la identificación del modelo, y la simulación y optimización del proceso.....	122
4.7. Análisis estadístico y estimación de parámetros	124
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	125
5.1. Propiedades físicas del mango.....	128
5.1.1. Conductividad térmica.....	128
5.1.2. Calor específico	130
5.1.3. Isotermas de sorción y calor isostérico de sorción	134
5.2. Algoritmos computacionales	139
5.2.1. Algoritmos para la resolución del modelo del proceso ...	139
5.2.2. Algoritmos para la identificación paramétrica.....	143
5.2.3. Algoritmos para la optimización del proceso.....	143

5.3. Experiencias de secado	147
5.3.1. Materia prima	147
5.3.2. Cinéticas de secado.....	147
5.4. Identificación paramétrica y validación del modelo	151
5.4.1. Identificación paramétrica de la difusividad efectiva	151
5.4.2. Validación del modelo difusivo	159
5.5. Influencia de las condiciones de operación sobre la cinética del proceso	163
5.6. Análisis del proceso de secado intermitente: Optimización.....	170
5.6.1. Duración óptima de los periodos de calentamiento y reposo	170
5.6.2. Comparación entre procesos de secado continuo e intermitente.....	173
6. CONCLUSIONES	189
7. RECOMENDACIONES	195
8. NOMENCLATURA.....	199
9. BIBLIOGRAFÍA.....	207
10. ANEXOS	219
Anexo 1. Cámara de secado del equipo de laboratorio utilizado en las experiencias.....	221
Anexo 2. Tránsito de calor por conducción a través de la celda utilizada en la medición del calor específico.....	223
Anexo 3. Conductividad térmica de la pulpa de mango	225
Anexo 4. Calor específico de la materia seca del mango	227
Anexo 5. Calor específico de la pulpa de mango	229
Anexo 6. Densidad de la pulpa de mango	231
Anexo 7. Isotermas de sorción de la pulpa de mango	235
Anexo 8. Programas desarrollados en MATLAB	239
Anexo 8.1. Módulo para la simulación de los periodos de calentamiento.....	239
Anexo 8.2. Módulo para la simulación de los periodos de Reposo	243

Anexo 8.3.	Simulación del proceso de secado continuo	245
Anexo 8.4.	Simulación del proceso de secado intermitente ...	246
Anexo 8.5.	Cálculo de la función objetivo para la identificación de los parámetros y la validación del modelo.....	247
Anexo 8.6.	Cálculo de la función objetivo para la optimización del proceso de secado intermitente .	248
Anexo 8.7.	Identificación de los parámetros y validación del modelo	249
Anexo 8.8.	Optimización del proceso de secado intermitente	250
Anexo 9.	Información experimental para la validación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva	251
Anexo 10.	Resultados de la validación del modelo de la difusividad efectiva en experiencias de secado intermitente	255
Anexo 11.	Evolución de la ganancia entálpica en procesos de secado continuo e intermitente	257
Anexo 12.	Evolución del contenido de humedad y la temperatura local en procesos de secado intermitente.....	259
Anexo 13.	Evolución de la velocidad de secado en procesos de secado continuo e intermitente	261
Anexo 14.	Contribución científica asociada al desarrollo de la tesis	263

Índice de Figuras

Figura 2.1.	Curva de secado típica	12
Figura 2.2.	Clasificación general de los esquemas de intermitencia aplicados al proceso de secado.....	40
Figura 2.3.	Evolución del contenido de humedad y la temperatura del producto en un proceso de secado intermitente por suministro periódico de energía térmica	42
Figura 2.4.	Distribución del contenido de humedad durante los periodos de calentamiento y reposo en el secado intermitente de un producto agroalimentario.....	43
Figura 2.5.	Fotografía de la sección transversal de un fruto de mango en la que se indican las distintas partes que componen su estructura.	54
Figura 4.1.	Esquema de las condiciones del aire empleadas en las experiencias de secado continuo e intermitente.....	72
Figura 4.2.	Esquema del secadero convectivo a escala de laboratorio empleado en las experiencias de secado.....	74
Figura 4.3.	Preparación de las muestras para las experiencias de secado.....	78
Figura 4.4.	Esquema de la medición de temperaturas en el centro y la superficie de la muestra.	82
Figura 4.5.	Volumen de control diferencial para el análisis de transferencia de materia	85
Figura 4.6.	Volumen de control diferencial para el análisis de transferencia de calor	87
Figura 4.7.	Transferencia de materia y calor a través de la superficie del material en la dirección x	91
Figura 4.8.	Esquema de la sección transversal de la celda usada para medir la conductividad térmica de la pulpa de mango	96
Figura 4.9.	Flujos de calor neto a través de la superficie del cubo...	114

Figura 4.10.	Discretización de la geometría usada en la modelización mediante COMSOL Multiphysics®	121
Figura 5.1.	Influencia del contenido de humedad y la temperatura en la conductividad térmica de la pulpa de mango	129
Figura 5.2.	Influencia de la temperatura en el calor específico de la materia seca del mango	131
Figura 5.3.	Influencia del contenido de humedad y de la temperatura en el calor específico de la pulpa de mango	133
Figura 5.4.	Influencia de la actividad de agua y la temperatura en el contenido de humedad de equilibrio de la pulpa de mango.	136
Figura 5.5.	Influencia del contenido de humedad y la temperatura en el calor isostérico de sorción de la pulpa de mango.....	137
Figura 5.6.	Resultado de la modelización mediante COMSOL Multiphysics®	140
Figura 5.7.	Organigrama del algoritmo para la simulación del proceso de secado intermitente	141
Figura 5.8.	Organigrama del algoritmo para la identificación de los parámetros del modelo	144
Figura 5.9.	Organigrama del algoritmo para la optimización del proceso de secado intermitente	145
Figura 5.10.	Experiencias de secado continuo empleadas en la identificación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva (grupo 1).....	148
Figura 5.11.	Experiencias de secado intermitente empleadas en la identificación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva (grupo 2)	149
Figura 5.12.	Influencia del contenido de humedad y la temperatura sobre la difusividad efectiva	153
Figura 5.13.	Influencia del contenido de humedad sobre la energía de activación	155

Figura 5.14.	Resultados de la identificación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva en experiencias de secado continuo (grupo 1) a temperaturas de calentamiento de 45, 55 y 65 °C, y velocidad de aire de 4 m s ⁻¹	157
Figura 5.15.	Resultados de la identificación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva en experiencias de secado intermitente (grupo 2) a temperaturas de calentamiento de 45, 55 y 65 °C, y velocidad de aire de 4 m s ⁻¹	158
Figura 5.16.	Resultados de la validación del modelo de la difusividad efectiva en experiencias de secado intermitente (grupo 3) a temperaturas de calentamiento de 45, 55 y 65 °C, y velocidad de aire de 4 m s ⁻¹	161
Figura 5.17.	Resultados de la validación del modelo de la difusividad efectiva en experiencias de secado intermitente (grupo 5) a temperaturas de calentamiento de 50, 60 y 70 °C, y velocidad de aire de 3 m s ⁻¹	162
Figura 5.18.	Influencia de la temperatura de calentamiento sobre la velocidad de secado	164
Figura 5.19.	Influencia de la velocidad del aire sobre la velocidad de secado.....	164
Figura 5.20.	Evolución de la humedad superficial durante periodos de reposo posteriores a periodos de calentamiento de diferente duración.....	166
Figura 5.21.	Evolución del contenido de humedad superficial promedio durante periodos de reposo posteriores a periodos de calentamiento realizados a diferentes temperaturas.....	168
Figura 5.22.	Evolución del contenido de humedad superficial promedio durante periodos de reposo realizados a diferentes temperaturas	169
Figura 5.23.	Ganancia entálpica media y tiempo de calentamiento en procesos de secado continuo e intermitente a diferentes temperaturas de calentamiento, velocidades de aire y número de ciclos de intermitencia	176

Figura 5.24.	Evolución de la ganancia entálpica en procesos de secado continuo e intermitente a diferentes ciclos de intermitencia ($T_H = 60\text{ °C}$, $v_\infty = 4\text{ m s}^{-1}$, $N = 1$ y 3) 179
Figura 5.25.	Evolución del contenido de humedad y la temperatura a través del eje central del cubo sobre la coordenada x ($T_H = 60\text{ °C}$, $v_\infty = 4\text{ m s}^{-1}$, $N = 1$)..... 181
Figura 5.26.	Evolución de los gradientes de humedad y temperatura a través del eje central del cubo sobre la coordenada x ($T_H = 60\text{ °C}$, $v_\infty = 4\text{ m s}^{-1}$, $N = 1$)..... 182
Figura 5.27.	Evolución del flujo de ganancia entálpica del producto ($T_H = 60\text{ °C}$, $v_\infty = 4\text{ m s}^{-1}$, $N = 1$) 184
Figura 5.28.	Contenido de humedad y temperatura superficiales en procesos de secado continuo e intermitente. Resultados para un proceso de secado intermitente optimizado a una temperatura de calentamiento de 60 °C , velocidad de aire de 4 m s^{-1} , y tres ciclos de intermitencia..... 186
Figura 5.29.	Evolución de la velocidad de secado en procesos de secado continuo e intermitente a diferentes ciclos de intermitencia 187
Figura A1.1.	Detalle de la cámara de secado del equipo de laboratorio utilizado en las experiencias..... 221
Figura A3.1.	Conductividad térmica de la pulpa de mango. Valores experimentales y estimados..... 225
Figura A4.1.	Calor específico de la materia seca del mango. Valores experimentales y estimados 227
Figura A5.1.	Calor específico de la pulpa de mango. Valores experimentales y estimados 229
Figura A7.1.	Contenido de humedad de equilibrio de la pulpa de mango. Valores experimentales y valores estimados con el modelo de GAB..... 235
Figura A7.2.	Isotermas de sorción estimadas para diferentes variedades de mango 236
Figura A9.1.	Experiencias de secado intermitente empleadas en la validación del modelo (grupo 3)..... 251

Figura A9.2.	Experiencias de secado intermitente empleadas en la validación del modelo (grupo 4)	252
Figura A9.3.	Experiencias de secado intermitente empleadas en la validación del modelo (grupo 5)	253
Figura A9.4.	Experiencias de secado intermitente empleadas en la validación del modelo (grupo 6)	254
Figura A10.1.	Resultados de la validación del modelo de la difusividad efectiva en experiencias de secado intermitente (grupo 4) a temperaturas de calentamiento de 50, 60 y 70 °C, y velocidad de aire de 4 m s ⁻¹	255
Figura A10.2.	Resultados de la validación del modelo de la difusividad efectiva en experiencias de secado intermitente (grupo 6) a temperaturas de calentamiento de 50, 60 y 70 °C, y velocidad de aire de 2 m s ⁻¹	256
Figura A11.1.	Evolución de la ganancia entálpica en procesos de secado continuo e intermitente a diferentes ciclos de intermitencia ($T_H = 50$ °C, $v_\infty = 4$ m s ⁻¹ , $N = 1$ y 3)	257
Figura A11.2.	Evolución de la ganancia entálpica en procesos de secado continuo e intermitente a diferentes ciclos de intermitencia ($T_H = 70$ °C, $v_\infty = 4$ m s ⁻¹ , $N = 1$ y 3)	258
Figura A12.1.	Evolución del contenido de humedad y la temperatura a través del eje central del cubo sobre la coordenada x ($T_H = 60$ °C, $v_\infty = 4$ m s ⁻¹ , $N = 2$)	259
Figura A12.2.	Evolución del contenido de humedad y la temperatura a través del eje central del cubo sobre la coordenada x ($T_H = 60$ °C, $v_\infty = 4$ m s ⁻¹ , $N = 3$)	260
Figura A13.1.	Evolución de la velocidad de secado en procesos de secado continuo e intermitente a diferentes ciclos de intermitencia ($T_H = 50$ °C, $v_\infty = 4$ m s ⁻¹ , $N = 1$ y 3)	261
Figura A13.2.	Evolución de la velocidad de secado en procesos de secado continuo e intermitente a diferentes ciclos de intermitencia ($T_H = 70$ °C, $v_\infty = 4$ m s ⁻¹ , $N = 1$ y 3)	262

Índice de Tablas

Tabla 4.1. Resumen de las condiciones experimentales aplicadas durante las experiencias de secado continuo e intermitente	79
Tabla 4.2. Criterios de finalización de las experiencias de secado continuo e intermitente	80
Tabla 4.3. Especificaciones de las ecuaciones de gobierno en los modos de aplicación de COMSOL Multiphysics® para difusión y transferencia de calor por conducción	119
Tabla 4.4. Especificaciones de las condiciones de contorno en los modos de aplicación de COMSOL Multiphysics® para difusión y para transferencia de calor por conducción.....	120
Tabla 5.1. Resultado del ajuste de los modelos de GAB, Oswin, Henderson y Halsey.....	135
Tabla 5.2. Resultados estadísticos de la identificación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva.....	155
Tabla 5.3. Resultados estadísticos de la validación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva.....	160
Tabla 5.4. Resultados de la optimización de procesos de secado intermitente a diferentes temperaturas de calentamiento, velocidades de aire y número de ciclos de intermitencia.....	172
Tabla 5.5. Comparación de la ganancia entálpica media entre procesos de secado continuo e intermitente a diferentes temperaturas de calentamiento, velocidades de aire y número de ciclos de intermitencia	174
Tabla 5.6. Comparación del tiempo de calentamiento entre procesos de secado continuo e intermitente a diferentes temperaturas de calentamiento, velocidades de aire y número de ciclos de intermitencia	175
Tabla A3.1. Conductividad térmica de la pulpa de mango variedad “Tommy Atkins” a diferentes contenidos de humedad y temperaturas.	225

Tabla A4.1. Calor específico de la materia seca del mango variedad “Tommy Atkins” a diferentes contenidos de humedad y temperaturas	227
Tabla A5.1. Calor específico de la pulpa de mango variedad “Tommy Atkins” a diferentes contenidos de humedad y temperaturas	229
Tabla A6.1. Densidad de la pulpa de mango variedad “Tommy Atkins” a diferentes contenidos de humedad y temperaturas	231
Tabla A7.1. Actividad de agua de la pulpa de mango variedad “Tommy Atkins” a diferentes contenidos de humedad y temperaturas	235

Resumen

Resumen

El avance tecnológico en los procesos de deshidratación ha llevado al estudio de técnicas para la obtención de productos de calidad que al mismo tiempo contribuyan con la reducción del consumo energético a través del mejoramiento de la eficiencia de los procesos y equipos. Uno de los procesos donde se persiguen tales intereses es el secado por aire caliente ya que, además de ocupar un importante lugar en la transformación de productos agroalimentarios y en los sistemas de tratamiento poscosecha, es una de las actividades industriales que supone mayor consumo energético. En tal sentido, la tecnología del secado intermitente ha sido empleada con el fin de disminuir el tiempo de calentamiento, preservar la calidad y minimizar el consumo energético en el secado de materiales sensibles al calor y donde la cinética está controlada por mecanismos de transferencia internos.

El término intermitente agrupa aquellas tecnologías de secado que emplean condiciones de operación que varían durante el procesamiento. En el caso del secado por suministro periódico de energía térmica, la intermitencia se incluye mediante periodos consecutivos de calentamiento y reposo. Las ventajas que presenta este tipo de secado intermitente, respecto al secado donde el suministro de energía térmica es continuo, dependen de las condiciones, número y duración de los periodos de reposo. Durante el reposo aumenta la disponibilidad de agua cerca de la superficie del producto, con el consiguiente aumento de la velocidad de secado y la disminución del calentamiento del material, cuando el producto es calentado nuevamente. La aplicación de los periodos de reposo reduce el tiempo de calentamiento necesario para alcanzar un contenido de humedad deseado, disminuyendo así los requerimientos de energía y el tiempo de exposición del producto al efecto de la temperatura.

El objetivo del presente trabajo fue contribuir al estudio y optimización del secado intermitente a partir de su aplicación en mango, con el fin de mejorar la eficiencia energética del proceso mediante el suministro periódico de energía térmica.

El estudio fue desarrollado en una de las variedades más comerciales de mango (*Mangifera indica* L. var. Tommy Atkins), un producto agrícola de gran importancia económica a nivel mundial. Igualmente, porque los productos procesados a partir de esta fruta tropical, además de ser una alternativa para el aprovechamiento de los excedentes de producción y para la diversificación de la oferta de productos con valor agregado, han mostrado gran aceptabilidad en el mercado por sus propiedades nutricionales y características exóticas.

Para el estudio y optimización del secado intermitente de mango fue necesario el desarrollo previo y validación de un modelo que representara adecuadamente los fenómenos físicos que gobiernan el proceso. También fue necesaria la formulación de una función objetivo que permitiera optimizar tanto la eficiencia energética del proceso como la calidad del producto.

Con el fin de especificar el modelo del proceso, fueron analizados los fenómenos de transferencia de materia y calor en un sistema con geometría cúbica. La formulación del modelo fue realizada considerando que el material era homogéneo e isótropo; que el efecto de la contracción sobre los procesos de transferencia era despreciable; que las propiedades de transporte (difusividad efectiva y conductividad térmica) eran funciones de los valores locales de humedad y temperatura; y que las resistencias externas a la transferencia de materia y calor no eran despreciables.

Para completar la formulación del modelo del proceso, fueron consideradas ecuaciones para la estimación de las propiedades físicas

del producto y del aire. Las ecuaciones para estimar la conductividad térmica, el calor específico y las isotermas de sorción fueron definidas a partir de información experimental debido a la ausencia de información bibliográfica para estas propiedades en la variedad “Tommy Atkins”, y a la limitada información disponible para variedades similares respecto a las condiciones experimentales empleadas en este estudio.

La conductividad térmica de la pulpa de mango fue determinada a temperaturas entre 20 y 80 °C y contenidos de humedad entre 1.1 y 9 kg kg⁻¹ (b.s.) mediante el método de la celda. La conductividad térmica de la pulpa de mango presentó una mayor dependencia con el contenido de humedad que con la temperatura, un comportamiento usual en alimentos con alto contenido de agua.

El calor específico de la materia seca del mango fue determinado a temperaturas entre 20 y 70 °C mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC). El calor específico de la materia seca del mango presentó una mayor dependencia con la temperatura entre 20 y 50 °C.

Las isotermas de sorción de la pulpa de mango fueron determinadas a temperaturas entre 10 y 50 °C empleando higrómetros eléctricos. El modelo de GAB se consideró como el más adecuado para representar la influencia de la actividad de agua y la temperatura sobre el contenido de humedad de equilibrio de la pulpa de mango ($VAR = 99.6 \%$, $RMSE = 0.057$). Las isotermas y el calor isostérico de sorción de la pulpa de mango mostraron un comportamiento acorde al de los materiales agroalimentarios y similar al reportado para pulpa de mango de otras variedades.

El modelo del proceso fue ajustado con cinéticas de experiencias de secado continuo e intermitente a temperaturas de calentamiento entre 45 y 65 °C, y una velocidad de aire de 4 m s⁻¹, con el propósito de identificar la difusividad efectiva, la cual fue definida como una función

exponencial de tres parámetros en términos de la humedad y la temperatura. El ajuste se realizó minimizando la diferencia entre los datos experimentales y estimados para el contenido de humedad promedio y para la temperatura en el centro de las muestras, y considerando de forma simultánea la información experimental de procesos a diferentes condiciones. El modelo fue posteriormente validado a diferentes condiciones de operación mediante experiencias de secado intermitente, diferentes a las empleadas en el ajuste de los parámetros, a temperaturas de calentamiento entre 45 y 70 °C, velocidades de aire de 2, 3 y 4 m s⁻¹ y un ciclo de intermitencia.

Tras haber considerado que los parámetros de la difusividad efectiva dependían únicamente de las características del material, estos fueron identificados mediante el ajuste del modelo del proceso a las cinéticas de secado. De este modo, el procedimiento de identificación planteado supuso que los parámetros del modelo de la difusividad efectiva fueran independientes de las condiciones experimentales de las experiencias empleadas en el ajuste. A contenidos de humedad entre 9 y 0.03 kg kg⁻¹ (b.s.), el valor de la difusividad efectiva del mango varía entre 6.14×10⁻¹¹ y 1.86×10⁻¹⁰ m² s⁻¹ a 10 °C, y entre 1.35×10⁻⁹ y 3.37×10⁻⁹ m² s⁻¹ a 70 °C, respectivamente. Los valores de la difusividad efectiva, identificada mediante el modelo considerado, estuvieron dentro del rango de valores esperados para el secado de materiales alimentarios y son similares a los obtenidos por otros autores en la modelización de cinéticas de secado de láminas de mango de diferentes variedades. En el modelo de la difusividad efectiva, la energía de activación fue el término que incluyó la dependencia del contenido de humedad. Los valores de energía de activación abarcaron un rango entre 39 y 41.6 kJ mol⁻¹ a contenidos de humedad entre 9 y 0.03 kg kg⁻¹ (b.s.), respectivamente, presentando mayor variación con la humedad por debajo de 1 kg kg⁻¹ (b.s.).

El modelo del proceso correlacionó satisfactoriamente los valores estimados y los datos experimentales para la humedad ($VAR > 99.7 \%$, $RMSE < 0.453$) y la temperatura ($VAR > 91.1 \%$, $RMSE < 5.87$) tanto para los conjuntos de datos empleados en la identificación paramétrica como para aquellos usados en la validación del modelo.

El problema de optimización del proceso de secado intermitente fue definido como la búsqueda de los tiempos de duración de cada periodo de calentamiento y reposo, que minimizaran una función objetivo definida a partir de la ganancia entálpica del producto. El problema de optimización fue resuelto, utilizando el modelo del proceso previamente ajustado y validado, en procesos de secado intermitente de uno a tres ciclos, a temperaturas de calentamiento de 50, 60 y 70 °C, y velocidades de 2, 3 y 4 m s⁻¹.

En el desarrollo de los algoritmos para el ajuste del modelo del proceso a los datos experimentales y la resolución de los problemas de optimización fue empleada la herramienta Matlab® R2007b, la cual fue utilizada junto con COMSOL Multiphysics® 3.4 para resolver las ecuaciones en derivadas parciales que definen el modelo del proceso mediante el método de elementos finitos.

Según los resultados optimizados, la aplicación y optimización del secado intermitente de mango permitió una disminución, respecto al proceso de secado continuo, entre el 13.4 % y el 20.1 % para la ganancia entálpica media, y entre el 2.8 % y el 8.6 % para el tiempo de calentamiento, de acuerdo a las temperaturas de calentamiento y el número de ciclos considerados. El efecto del secado intermitente hace que la ganancia entálpica y el tiempo de calentamiento sean equivalentes a procesos de secado continuo desarrollados a menores temperaturas o velocidades.

La aplicación y optimización del secado intermitente de mango, además de aumentar la eficiencia energética del proceso, podría mejorar la calidad del producto mediante la disminución de la ganancia entálpica, la temperatura superficial y el tiempo de exposición del producto al tratamiento térmico. Igualmente, podría ser conveniente para reducir problemas de calidad relacionados con cambios en la superficie del producto, ya que el secado intermitente reduce la temperatura superficial así como el tiempo de calentamiento necesario para alcanzar un contenido de humedad final deseado.

Resum

L'avanç tecnològic en els processos de deshidratació ha portat a l'estudi de tècniques per a l'obtenció de productes de qualitat que al mateix temps contribueixen a la reducció del consum energètic mitjançant la millora de l'eficàcia dels processos i equips. Un dels processos en què es persegueixen aquests interessos és l'assecatge per aire calent, pel fet que aquest procés, a banda d'ocupar un lloc important en la transformació de productes agroalimentaris i en els sistemes de tractament postcollita, és una de les activitats industrials que suposa més consum energètic. En aquest sentit, la tecnologia d'assecatge intermitent ha sigut utilitzada per a reduir el temps d'escalfament, preservar la qualitat i minimitzar el consum energètic en l'assecatge de materials sensibles a la calor quan la cinètica està controlada per mecanismes de transferència interns.

El terme intermitent agrupa les tecnologies d'assecatge que empren condicions d'operació que varien durant el processament. En el cas de l'assecatge per subministrament periòdic d'energia tèrmica, la intermitència s'hi inclou mitjançant períodes consecutius d'escalfament i repòs. Els avantatges que presenta aquest tipus d'assecatge intermitent respecte a l'assecatge en què el subministrament d'energia tèrmica és continu, depenen de les condicions, el nombre i la durada dels períodes de repòs. Durant els períodes de repòs augmenta la disponibilitat d'aigua prop de la superfície del producte, amb la qual cosa augmenta la velocitat d'assecatge i disminueix l'escalfament del material, quan el producte és calfat novament. L'aplicació dels períodes de repòs redueix el temps d'escalfament necessari per a assolir un contingut d'humitat desitjat, disminuint els requeriments d'energia i el temps d'exposició del producte a l'efecte de la temperatura.

L'objectiu d'aquest treball ha sigut contribuir al estudi i optimització de l'assecatge intermitent amb aplicació al mango, per millorar l'eficiència energètica del procés mitjançant el subministrament periòdic d'energia tèrmica.

L'estudi fou realitzat en una de les varietats més comercials de mango (*Mangifera indica* L. var. Tommy Atkins), un producte agrícola de gran importància econòmica a escala mundial. Els productes processats a partir d'aquesta fruita tropical són una alternativa per l'aprofitament dels excedents de producció i per la diversificació de l'oferta de productes amb valor afegit. A més a més, han mostrat gran acceptabilitat en el mercat a causa de les seues propietats nutricionals i característiques exòtiques.

Prèviament a l'estudi i optimització de l'assecatge intermitent de mango, fou necessari el desenvolupament i la validació d'un model que representara adequadament els fenòmens físics que governen el procés i la formulació d'una funció objectiu per optimitzar l'eficiència energètica del procés i la qualitat del producte.

Amb la finalitat d'especificar el model del procés, foren analitzats els fenòmens de transferència de massa i calor en un sistema amb geometria cúbica. La formulació del model va ser realitzada considerant que el material era homogeni i isòtrop, que l'efecte de la contracció sobre els processos de transferència era menyspreable, que els coeficients de transferència (difusivitat efectiva i conductivitat tèrmica) eren funcions dels valors locals d'humitat i temperatura i que les resistències externes a la transferència de matèria i calor no eren menyspreables.

Per completar la formulació del model del procés, es consideraren equacions per l'estimació de les propietats físiques del producte i de l'aire. Les equacions utilitzades per a estimar la conductivitat tèrmica, la calor específica i les isoterms de sorció foren definides a partir

d'informació experimental a causa de l'absència d'informació bibliogràfica d'aquestes propietats en la varietat "Tommy Atkins" i per la limitada informació disponible per a varietats similars respecte a les condicions experimentals utilitzades en aquest estudi.

La conductivitat tèrmica de la polpa de mango va ser determinada a temperatures entre 20 i 80 °C i contingut d'humitat entre 1.1 i 9 kg kg⁻¹ (b.s.), mitjançant el mètode de la cel·la. La conductivitat tèrmica de la polpa de mango presentà una major dependència del contingut d'humitat que de la temperatura. Aquest comportament és usual en aliments amb alt contingut en aigua.

La calor específica de la matèria seca del mango va ser determinada a temperatures entre 20 i 70 °C mitjançant calorimetria diferencial d'escombratge (DSC). La calor específica de la matèria seca del mango presentà una major dependència de la temperatura entre 20 i 50 °C.

Les isoterms de sorció de la polpa de mango foren determinades a temperatures entre 10 i 50 °C utilitzant higròmetres elèctrics. El model de GAB es considerà com el més adequat per a representar la influència de l'activitat d'aigua i la temperatura sobre el contingut d'humitat d'equilibri de la polpa de mango ($VAR = 99.6 \%$, $RMSE = 0.057$). Les isoterms i la calor isostèrica de sorció de la polpa de mango mostraren un comportament similar al dels materials agroalimentaris en general i de la polpa de mango d'altres varietats en particular.

El model del procés va ser ajustat amb cinètiques d'experiències d'assecatge continu i intermitent a temperatures d'escalfament entre 45 i 65 °C i una velocitat d'aire de 4 m s⁻¹, amb la finalitat d'identificar la difusivitat efectiva. Aquesta propietat fou definida com una funció de tres paràmetres en termes de la humitat i la temperatura. L'ajust es

realitzà minimitzant la diferència entre les dades experimentals i estimades per al contingut d'humitat mitjà i per a la temperatura en el centre de les mostres i considerant de forma simultània la informació experimental de processos a diferents condicions. El model va ser posteriorment validat a diferents condicions d'operació mitjançant experiències d'assecatge intermitent, diferents de les emprades en l'ajust dels paràmetres, a temperatures d'escalfament entre 45 i 70 °C, velocitats d'aire de 2, 3 i 4 m s⁻¹ i un cicle d'intermitència.

El procediment d'identificació plantejat va suposar que els paràmetres de la difusivitat efectiva, identificats mitjançant l'ajust del model del procés a les cinètiques d'assecatge, foren independents de les condicions experimentals de les experiències utilitzades en l'ajust, després d'haver considerat que aquets paràmetres depenien únicament de les característiques del material. A continguts d'humitat entre 9 i 0.03 kg kg⁻¹ (b.s.), el valor de la difusivitat efectiva del mango varia entre 6.14×10⁻¹¹ i 1.86×10⁻¹⁰ m² s⁻¹ a 10 °C, i entre 1.35×10⁻⁹ i 3.37×10⁻⁹ m² s⁻¹ a 70 °C, respectivament. Els valors de la difusivitat efectiva, identificat mitjançant el model considerat, estaven en el rang de valors esperats per a l'assecatge de materials alimentaris i són similars als obtinguts per altres autors en la modelització de cinètiques d'assecatge de làmines de mango de diferents varietats. En el model de la difusivitat efectiva, l'energia d'activació va ser el terme que va incloure la dependència del contingut d'humitat. Els valors d'energia d'activació van comprendre un rang entre 39 i 41.6 kJ mol⁻¹ a continguts d'humitat entre 9 i 0.03 kg kg⁻¹ (b.s.), respectivament, presentant major variació amb la humitat per davall de 1 kg kg⁻¹ (b.s.).

El model del procés va correlacionar satisfactòriament els valors estimats i les dades experimentals per la humitat (*VAR* > 99.7 %, *RMSE* < 0.453) i la temperatura (*VAR* > 91.1 %, *RMSE* < 5.87) per a les dades emprades en la identificació dels

paràmetres del model i també per a les dades utilitzades en la validació.

El problema d'optimització del procés d'assecatge intermitent fou definit com la cerca dels temps de durada de cada període d'escalfament i repòs, que minimitzaren una funció objectiu definida a partir del guany entàlpic del producte. El problema d'optimització va ser resolt, utilitzant el model del procés prèviament ajustat i validat, en processos d'assecatge intermitent d'un a tres cicles, a temperatures d'escalfament de 50, 60 i 70 °C i velocitats de 2, 3 i 4 m s⁻¹.

En el desenvolupament dels algorismes per a l'ajust del model del procés a les dades experimentals i la resolució dels problemes d'optimització, fou emprada l'eina Matlab® R2007b juntament amb COMSOL Multiphysics® 3.4 per a resoldre les equacions en derivades parcials que defineixen el model del procés amb el mètode dels elements finits.

Segons els resultats optimitzats, l'aplicació i optimització de l'assecatge intermitent de mango va permetre una disminució, respecte al procés d'assecatge continu, entre el 13.4 % i el 20.1 % pel guany entàlpic mitjà i entre el 2.8 % i el 8.6 % pel temps d'escalfament, d'acord a les temperatures d'escalfament i el nombre de cicles considerats. L'efecte de l'assecatge intermitent fa que al guany entàlpic i el temps d'escalfament siguin equivalents a processos de l'assecatge continu desenrotllats a menors temperatures o velocitats.

L'aplicació i optimització de l'assecatge intermitent de mango, a banda d'augmentar l'eficiència energètica del procés, podria millorar la qualitat del producte mitjançant la disminució del guany entàlpic, la temperatura superficial i el temps d'exposició del producte al tractament tèrmic. Igualment, podria ser convenient per reduir a problemes de qualitat relacionats amb canvis en la superfície del

producte, a causa que l'assecatge intermitent redueix la temperatura superficial i el temps d'escalfament necessari per a assolir un contingut d'humitat final desitjat.

Abstract

Technological advance in the dehydration processes has led to the study of techniques by which quality products can be obtained and contribute, at the same time, to reduce energy consumption by improving the efficiency of processes and equipment. Hot-air drying is one of the processes in which such interests are pursued because, in addition to its importance in the transformation of agro-food products and in the systems of post-harvest treatment, it is one of the industrial activities that involves a considerable energy consumption. For this reason, intermittent drying technology has been used in order to shorten the heating time, preserve the quality and minimize energy consumption in the drying of heat-sensitive materials and where kinetics is controlled by internal resistance to the mass and heat transfer.

The term “intermittent” groups those drying technologies that use operating conditions which vary during processing. In the case of drying where heating energy is applied periodically, the intermittence is due to consecutive heating and resting periods. The advantages of this type of intermittent drying, as compared to continuous drying, are linked to the conditions, number and duration of the resting periods. During the resting there is an increase of water close to the product surface which leads to an increase in the drying velocity, and a decrease in the heating of the material, when the product is heated again. The application of the resting periods reduces the heating time, decreasing the necessary energy and the time the product is exposed to the effect of temperature.

The objective of the present work was to contribute to the study and optimization of intermittent drying through its application to

mango, in order to improve the process's energy efficiency by means of the periodical supply of thermal energy.

One of the most widely-sold cultivars of mango (*Mangifera Indica* L. cv. Tommy Atkins), an agricultural product of great worldwide economic importance, was used to carry out this study. Likewise, it was chosen because the products processed from this tropical fruit, in addition to offering an alternative in the use of the surplus production stock and the diversification in the offer of products of added value, have had market acceptance thanks to their nutritional properties and exotic characteristics.

For the study and optimization of the intermittent drying of mango, the prior development and validation of a model that adequately represents the physical phenomena governing the process was necessary. Furthermore, an objective function was needed to formulate an optimization problem for the energy consumption of the process and for the product quality.

To specify the process model, the mass and heat transfer phenomena were analyzed in a system with cubic geometry. The formulation of the model was performed considering the material to be homogeneous and isotropic; that the effect of the shrinkage on the transfer processes was negligible; that the thermal conductivity and effective diffusivity depended on the local values of humidity and temperature; and that the external resistances to mass and heat transfer were not negligible.

In order to complete the process model, equations to estimate the physical properties of the product and the air were considered. The equations to estimate the thermal conductivity, the specific heat and the sorption isotherm were defined from experimental information, due to the absence of bibliographic information for these properties of the

cultivar “Tommy Atkins”, and to the limited information available for similar cultivars under the experimental conditions used in this study.

The thermal conductivity of the mango pulp was determined at temperatures of between 20 and 80 °C and moisture contents of between 1.1 and 9 kg kg⁻¹ (b.s.), by means of the cell method. The thermal conductivity of the mango pulp was more heavily dependent on the moisture content than temperature; common behavior in high moisture foodstuffs.

The specific heat of the dry matter of the mango was determined at temperatures of between 20 and 70 °C using differential scanning calorimetry (DSC). The specific heat of the mango dry matter was more heavily dependent on the temperature between 20 and 50 °C.

The sorption isotherms of mango pulp were determined at temperatures of between 10 and 50 °C using electric hygrometers. GAB's model was considered the best-suited model to represent the influence of the water activity and the temperature on the equilibrium moisture content of the mango pulp (*VAR* = 99.6 %, *RMSE* = 0.057). The sorption isotherms and isosteric heat behaved as expected in all agro-foodstuffs and a similarly to the mango pulp of other cultivars.

The process model was adjusted using experimental values of continuous and intermittent drying at heating temperatures between 45 and 65 °C, and an air velocity of 4 m s⁻¹, in order to identify the effective diffusivity, which was defined as a function dependent on the local moisture and local temperature. The fitting was carried out by minimizing the difference between the experimental and estimated data for the average moisture content and the temperature at the centre of the samples, and considering simultaneously experimental data of processes performed in different drying conditions. The model was

subsequently validated by means of experimental data from different experiments of intermittent drying at heating temperatures between 45 and 70 °C, air velocities of 2, 3 and 4 m s⁻¹, and a cycle of intermittence.

The proposed identification procedure allowed the parameters of the effective diffusivity, identified by means of fitting the process model to the drying kinetics, to be independent of the experimental conditions of the experiments used in the fitting, after having considered that such parameters depended only on the material characteristics. At moisture contents between 9 and 0.03 kg kg⁻¹ (d.b.), the value of the effective diffusivity of mango varies between 6.14×10^{-11} and 1.86×10^{-10} m² s⁻¹ at 10 °C, and between 1.35×10^{-9} and 3.37×10^{-9} m² s⁻¹ at 70 °C, respectively. The identified values of the effective diffusivity were within the range of expected values for the drying of agro-foodstuffs and they are similar to those obtained by other authors in the modeling of drying kinetics of mango of different cultivars. In the effective diffusivity model, the activation energy was the term that included the dependence of moisture content. The values of activation energy ranged between 39 and 41.6 kJ mol⁻¹ at moisture contents between 9 and 0.03 kg kg⁻¹ (d.b.), respectively, showing more variation with the moisture at values under 1 kg kg⁻¹ (d.b.).

The experimental and estimated values for the moisture content and the temperature were satisfactorily correlated ($VAR > 99.7\%$ and $RMSE < 0.453$ for the moisture content, and $VAR > 91.1\%$ and $RMSE < 5.87$ for the temperature) considering the data used in both model fitting and validation.

The optimization problem of the intermittent drying process was defined as the search for the duration of the heating and resting periods, which minimize an objective function defined as the enthalpy gain of the product. The optimization problem was solved by using the

previously adjusted and validated process model, in intermittent drying processes of one to three cycles, at heating temperatures of 50, 60 and 70 °C, and air velocities of 2, 3 and 4 m s⁻¹.

Matlab® R2007b and COMSOL Multiphysics® 3.4 were the software programs used to develop the algorithms to fit the model and to solve the optimization problem. COMSOL® was used to solve, using the finite element method, the partial differential equations of the mathematical model, and Matlab® to formulate and solve the optimization problem.

According to the optimization results, comparing the continuous drying and the intermittent drying application, a decrease between 13.4 % and 20.1 % for the average enthalpy gain, and between 2.8 % and 8.6 % for the time of heating were attained, according to the heating temperatures and the number of cycles considered. The intermittent drying effect leads to the enthalpy gain and the heating time being equivalent to continuous drying processes developed at lower temperatures or velocities.

The application and optimization of the intermittent drying of mango, in addition to increasing the energy efficiency of the process, could improve the product quality by shortening the enthalpy content, the surface temperature and the product's exposure to heating. Likewise, it may minimize quality problems related to changes on the product surface, since the intermittent drying reduces the surface temperature as well as the heating time necessary to reach a given moisture content.

1. JUSTIFICACIÓN E INTERÉS DE LA INVESTIGACIÓN

1. JUSTIFICACIÓN E INTERÉS DE LA INVESTIGACIÓN

Los procesos de deshidratación de alimentos han logrado avances tecnológicos en la disminución del gasto energético, la conservación de las características de los productos y la disminución del impacto ambiental. El secado por aire caliente es uno de los procesos donde se han enfocado estas metas ya que, además de ser una de las prácticas de conservación más antiguas, comunes y diversas, ocupa un importante lugar en la transformación de productos agroalimentarios y en los sistemas de tratamiento poscosecha. Es también una de las actividades industriales que genera mayor consumo energético y por ende un impacto ambiental considerable, al mismo tiempo que influye sobre importantes parámetros de aceptación comercial como son la calidad organoléptica y nutricional de los productos.

Los desarrollos tecnológicos recientes en los procesos de secado por aire caliente parten de la consideración de diferentes aspectos; entre los más importantes se pueden resaltar el agrupamiento o modificación de las tecnologías de secado existentes dentro de tecnologías híbridas que son más eficientes y limpias que las tecnologías tradicionales, el establecimiento de modelos matemáticos para el estudio de las particularidades de los procesos de secado que suministran fundamentos para el cálculo de procesos y el diseño de equipos, y la realización de estudios básicos necesarios para el desarrollo de nuevos secaderos o mejora de los equipos existentes. Una de las tecnologías consideradas para abordar estos aspectos es el secado intermitente.

Según el número de publicaciones referenciadas en el Journal Citation Reports, la aplicación del secado intermitente ha sido poco

estudiada en el procesamiento de productos hortofrutícolas. Los estudios realizados se han centrado principalmente en aplicación de esta tecnología al secado de granos y cereales.

En la mayoría de estudios sobre secado intermitente en materiales alimentarios, incluso en aquellos más recientes, ha prevalecido el uso de modelos empíricos y teóricos de reducida complejidad, debido a la naturaleza del proceso. Esta complejidad es atribuible principalmente a la aplicación de la intermitencia, la cual dificulta la formulación y resolución de un modelo, al alterar las condiciones de operación durante el procesamiento, generando cambios en las propiedades del aire y alternando los mecanismos de transferencia interfacial entre fenómenos por convección natural y forzada.

Las consideraciones y simplificaciones más comunes, para la representación del proceso en los diferentes estudios, incluyen tanto el uso de modelos empíricos como el empleo de modelos teóricos. Los modelos empíricos aunque pueden representar aceptablemente la información experimental, no contribuyen al conocimiento de los fenómenos de transferencia de materia y calor local que determinan el efecto de la intermitencia sobre la cinética del proceso y la calidad del producto. En cuanto a los modelos teóricos, es común la utilización de las soluciones analíticas de las ecuaciones de difusión, las cuales asumen, entre otras consideraciones, que el efecto de la resistencia externa a la transferencia de materia es despreciable y el proceso es isotérmico, lo cual hace que las soluciones analíticas de este tipo de modelos sean inapropiadas para procesos de secado donde las condiciones de operación son intermitentes. Además, la determinación de las condiciones de operación a partir de estos modelos se ha centrado en la evaluación puntual de alternativas en lugar de la búsqueda de condiciones óptimas.

En tal sentido, resulta de gran interés el análisis del secado intermitente en productos destacados comercialmente que, como el caso del mango, sean diferentes a los ya estudiados. Los productos escogidos podrían permitir el desarrollo de una metodología amplia, de potencial aplicación en otros productos con características similares en cuanto a estructura y composición.

Las diferentes investigaciones desarrolladas en el secado de alimentos indican que un estudio enfocado en la modelización matemática del proceso, su simulación y optimización computacional, es adecuado para analizar el efecto de las variables sobre el proceso, así como para el establecimiento de condiciones óptimas de operación que permitan la eficiencia de la operación y la obtención de productos de calidad. En el caso del secado intermitente, es motivo de interés el desarrollo de modelos matemáticos a partir de los principios de transferencia de calor y materia, que incorporen las consideraciones necesarias para que el modelo represente adecuadamente la intermitencia en un amplio rango de condiciones de operación. Por las características de este proceso, sería necesaria la toma de consideraciones que normalmente no se incluyen de forma conjunta en los modelos de secado de procesos convencionales: sistemas de tres dimensiones espaciales en régimen transitorio, propiedades de transporte dependientes de la humedad y la temperatura, resistencia externa a la transferencia de calor y materia, transferencia de calor y materia en la interfase sólido-aire por convección natural y forzada.

Esta tesis doctoral se enmarca dentro de las líneas de investigación del Grupo de Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios ASPA de la Universidad Politécnica de Valencia. El trabajo realizado forma parte del proyecto de investigación aplicada AGL2006-14146-C02-01, financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia de España dentro del Plan Nacional de I+D+I en recursos y

tecnologías agroalimentarias. El proyecto se fundamenta en el diseño, desarrollo y aplicación de herramientas de optimización al proceso de secado de productos agroalimentarios mediante el uso de la tecnología de secado intermitente.

2. INTRODUCCIÓN

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Aspectos generales del secado convectivo

El secado comúnmente describe el proceso de remoción térmica de sustancias volátiles para obtener un producto sólido. Es, probablemente, la operación unitaria más antigua, común y diversa.

En la actualidad las operaciones de secado son esenciales en diferentes industrias (química, alimentaria, agrícola, biotecnológica, cerámica, farmacéutica, de polímeros, elaboración de papel y procesamiento de minerales y madera) para la obtención de productos con unas características deseadas que favorecen su manipulación, preservación, almacenamiento y/o transporte (Karel & Lund, 2003; Mujumdar, 2006).

Entre los equipos de secado industriales, más del 85 % son de tipo convectivo que emplean aire caliente o gases de combustión como medio de secado directo (Mujumdar, 2006; Raghavan et al., 2005). Dentro de estas aplicaciones, más del 99 % involucran la remoción de agua (Mujumdar, 2006).

Actualmente las consideraciones medioambientales constituyen uno de los aspectos importantes, además de la eficiencia del proceso y la calidad de los productos deshidratados. Por tanto la utilización de alternativas de procesamiento a partir del uso de fuentes adicionales de energía y optimización de las existentes, constituyen alternativas para aumentar la velocidad del proceso sin incrementar el impacto ambiental del mismo (Lewicki, 2006; Mulet et al., 2003; Strumillo et al., 2006).

2.1.1. Fundamentos del secado por aire caliente

El secado convectivo puede realizarse haciendo circular aire caliente sobre la superficie de un material húmedo. De este modo, el flujo de aire caliente es el medio empleado para suministrar la energía que evapora la humedad del material y para retirar dicha humedad del sólido.

Ya que el proceso involucra la aplicación de calor y la remoción de humedad, el secado puede ser dividido en dos subprocesos que ocurren simultáneamente y que determinan la velocidad de la operación (Hallström et al., 2007; Karel & Lund, 2003; Mujumdar, 2006; Ramaswamy & Marcotte, 2005; Srikiatden & Roberts, 2007): transferencia de calor desde el aire circundante para evaporar la humedad superficial; y transferencia de humedad del interior hacia la superficie del sólido y su posterior evaporación.

La transferencia de calor desde el medio ambiente circundante hacia el sólido puede ocurrir por convección, conducción, radiación o como resultado de una combinación de estos mecanismos. Tales mecanismos suministran calor a la superficie del objeto que está siendo secado, de forma tal que el calor luego se difunde dentro del sólido esencialmente por conducción. En algunos casos el calor es también suministrado de forma volumétrica mediante microondas o campos electromagnéticos de radio frecuencia.

La eliminación de agua en forma de vapor desde la superficie del material depende fundamentalmente de las condiciones externas de temperatura, humedad, velocidad y dirección del flujo de aire caliente, así como de la geometría del sólido. La evaporación es controlada por la difusión de vapor desde la superficie del sólido hacia el aire que lo circunda. El contacto entre el aire y el agua líquida contenida en la matriz sólida involucra fenómenos de transporte interfacial, donde

tienen especial consideración las características higroscópicas del material, los coeficientes de transferencia por convección y las propiedades termodinámicas de la mezcla aire-vapor.

A medida que la humedad superficial se evapora, el transporte de humedad desde el interior hacia la superficie del sólido se desarrolla fundamentalmente a través de uno o varios de los siguientes mecanismos: difusión líquida (si el sólido se encuentra a una temperatura por debajo del punto de ebullición del líquido), difusión de vapor (si el líquido se evapora dentro del material) y diferencias de presión hidrostática (por tensión interna debido al encogimiento del material). Los mecanismos de transferencia de humedad interna pueden variar durante el secado ya que son función de la estructura física, temperatura y humedad del material (Garau, 2008; García-Pérez, 2007).

Cuando el movimiento de humedad interno controla el proceso, como es habitual en la obtención de productos con valores bajos de humedad final, se hace necesaria la utilización de tiempos de residencia largos y temperaturas altas. En este caso, variables externas como la velocidad y la temperatura del aire son menos importantes en la transferencia de humedad que en la transferencia de calor (Marinos-Kouris & Maroulis, 2006).

2.1.2. Etapas del proceso

El comportamiento del proceso de secado puede ser caracterizado midiendo la pérdida de humedad en función del tiempo o del contenido de humedad promedio. Tales representaciones son denominadas curvas de secado y permiten distinguir los mecanismos de secado predominantes. Una representación típica de una curva de secado de un alimento se esquematiza en la Figura 2.1, en ella pueden

distinguirse tres periodos de velocidad de secado (Clemente, 2003; García-Pascual, 2004; García-Pérez, 2007):

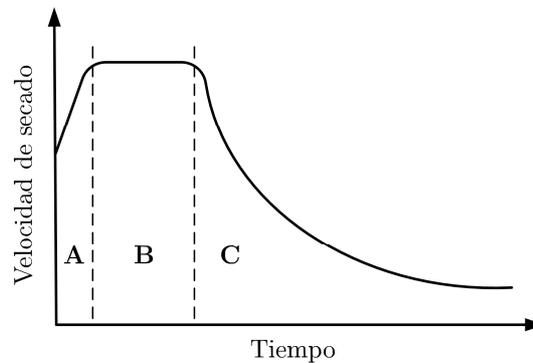


Figura 2.1. Curva de secado típica.

- Periodo de inducción o de velocidad de secado creciente (Figura 2.1.A): Durante este periodo el producto se calienta, aumentando la temperatura de la interfase y el material se adapta a las condiciones de operación.
- Periodo de velocidad de secado constante (Figura 2.1.B): Durante este periodo, el transporte de humedad desde el interior del material permite que la superficie permanezca saturada. La velocidad de secado está controlada por las condiciones externas que determinan la evaporación del agua y su transferencia desde la superficie saturada del material hasta el aire de secado, por lo cual es independiente de la naturaleza del producto.
- Periodo de velocidad de secado decreciente (Figura 2.1.C): Cuando la superficie del sólido deja de estar saturada, la velocidad de secado irá disminuyendo con el tiempo hasta que el contenido de humedad del material se aproxime a su valor de equilibrio. En este

periodo la velocidad del proceso depende principalmente de la estructura interna del sólido y de los mecanismos de migración de humedad.

2.1.3. Eficiencia del proceso

El secado de materiales biológicos es muy importante en la industria agroalimentaria para la obtención de productos de calidad que sean estables durante el almacenamiento. Sin embargo, un aspecto negativo del proceso es la gran cantidad de energía que consume.

Junto a la destilación, el secado es una de las operaciones industriales que demanda más energía, debido principalmente al calor necesario para la vaporización y a la ineficiencia del uso de aire caliente como medio de secado habitual. Según diversos estudios, consume entre el 10 y el 25 % de la energía destinada a operaciones industriales en Estados Unidos, Canadá, Francia, Reino Unido, Dinamarca y Alemania (Mujumdar, 2006; Ramaswamy & Marcotte, 2005; Strumillo et al., 2006).

En el consumo energético de la mayoría de secaderos convectivos tienen prevalencia tanto la energía requerida para la evaporización de la humedad del producto como las pérdidas a través de las corrientes de salida. Según datos estadísticos de balances de energía de diversos secaderos convectivos, entre el 20 y el 60 % de la energía suministrada es empleada para la evaporación de la humedad del material; del 5 al 25 % es usada para el calentamiento del producto; entre el 15 y el 40 % corresponde al calor que se pierde con el aire que sale del proceso; entre el 3 y el 10 % corresponde a pérdidas de calor a través de las paredes del equipo; y entre 5 y el 20 % se relaciona con otras pérdidas (Strumillo et al., 2006).

El creciente interés en el calentamiento global y otros problemas medioambientales está causando cambios en todos los sectores industriales. Los cambios en las legislaciones y el establecimiento de políticas más estrictas están obligando a las diferentes compañías a evaluar el uso de la energía y el impacto ambiental (Raghavan et al., 2005). De este modo, el empleo de técnicas para el ahorro de energía en el proceso de secado no se ha justificado únicamente en razones económicas. Cada vez es más importante el reconocimiento de los efectos que el consumo excesivo de energía causa sobre el medio ambiente, las emisiones de gases de efecto invernadero, y, por consiguiente, el calentamiento global (Strumillo et al., 2006). La eficiencia energética concierne incluso a muchas tecnologías novedosas que hacen uso de la energía eléctrica, ya que el impacto ambiental de estos procesos puede variar considerablemente en función de los métodos empleados para la producción de la electricidad (hidráulica, nuclear, combustibles fósiles, biomasa) (Raghavan et al., 2005).

Según diversos autores (Ramaswamy & Marcotte, 2005; Strumillo et al., 2006), la disminución en la demanda energética en los procesos de secado reduciría la utilización de combustibles fósiles y, como consecuencia, reduciría significativamente la emisión de gases de efecto invernadero.

La demanda energética de los procesos de secado evidencia dos claras desventajas: el costo de la energía y la degradación medioambiental asociada a algunos tipos de producción energética. En respuesta a estas inquietudes, muchas de las investigaciones recientes han sido orientadas al estudio de técnicas que mejoren la eficiencia de los equipos y procesos de secado, de tal forma que sean más económicos y menos perjudiciales para el medio ambiente. Algunas de las técnicas más prometedoras y novedosas han sido revisadas por Kudra & Mujumdar (2009), Raghavan et al. (2005) y Strumillo et al.

(2006). Los principales objetivos de las nuevas tecnologías de secado son: producir productos de mejor calidad; operar a grandes capacidades, de forma segura y bajo control; y operar a un costo total más bajo reduciendo tanto los costos de capital como los de operación (consumo energético, mantenimiento, emisiones, etc.).

En la mayoría de casos prácticos, la transferencia de materia y de calor, tanto interna como externa, ejercen la principal influencia en la velocidad del proceso de secado. Es preciso entonces considerar diversos aspectos que pueden mejorar los fenómenos de transferencia y, por consiguiente, la eficiencia de la operación.

La velocidad a la cual la humedad es removida de la superficie del producto depende únicamente de las velocidades de transferencia de materia y calor externas, ya que la resistencia que controla la velocidad de secado tiene lugar fuera del material que está siendo secado. Así, la mejora de las velocidades de transferencia por convección puede lograrse mediante los siguientes métodos (Kudra & Mujumdar, 2009; Strumillo et al., 2006):

- Incremento de las diferencias de temperatura y humedad entre el aire y la superficie del material (aumento de las fuerzas impulsoras).
- Incremento en la velocidad y la turbulencia del aire, aplicación de vibración mecánica u oscilaciones al flujo de aire, las cuales favorecen la renovación de la capa límite.
- Cambios en las propiedades del aire de secado o sus condiciones durante el procesamiento.

El mejoramiento del transporte de materia y calor en el interior del material, el cual controla la velocidad del proceso en el periodo de velocidad decreciente, es más complejo y difícil de lograr. Dentro de los

métodos que pueden favorecer los procesos de transporte internos se encuentran (Kudra & Mujumdar, 2009; Strumillo et al., 2006):

- Cambios en la estructura del material, antes o durante el transcurso del proceso para incrementar las áreas efectivas para la transferencia de materia y calor (uso de dispersadores y mezcladores mecánicos).
- Aplicación de sustancias coadyuvantes que puedan mejorar los procesos de transporte.
- Control de la distribución de temperaturas y contenidos de humedad en el material, por ejemplo, variando el suministro de energía térmica con el tiempo.

Cualquier acción encaminada a la reducción de la resistencia externa o interna conduce al incremento en la velocidad de secado; sin embargo, es necesario considerar el efecto que tales acciones tienen sobre la calidad del producto.

En la mayoría de los casos, los enfoques más eficientes para la mejora del proceso son una combinación de diferentes métodos. Entre los métodos más destacables se encuentran (Kudra & Mujumdar, 2009) la utilización de modos de calentamiento indirectos, bombas de calor, secadores híbridos, condiciones de operación variables o equipos multietapas, vapor sobrecalentado como medio de secado, técnicas mejoradas como son la aplicación de campos ultrasónicos o acústicos, mejores técnicas de combustión tales como la combustión por pulsos.

Para la aplicación de cualquiera de las técnicas de secado mejoradas es necesaria una evaluación técnica y económica antes de justificar su utilización, ya que estas pueden limitar su aplicación a productos y procesos particulares, elevar la complejidad del

equipamiento y la relación costo-eficiencia (Kudra & Mujumdar, 2009; Strumillo et al., 2006).

2.1.4. Aspectos de calidad relacionados con el secado

El secado es una operación compleja que involucra la transferencia de materia y calor en régimen transitorio, junto con cambios fisicoquímicos que a su vez pueden causar cambios en la calidad del producto, así como en los mecanismos de transferencia. Además de cambios físicos tales como el encogimiento, la cristalización y la transición vítrea, en muchos casos también pueden ocurrir reacciones químicas o bioquímicas deseables o indeseables, que conducen a cambios en el color, la textura, el aroma-olor u otras propiedades del producto. Es así como un secado inadecuado puede conducir al deterioro irreversible de la calidad del alimento, con la consiguiente disminución en la aceptabilidad comercial (Jayaraman & Das Gupta, 2006; Perera, 2005; Sablani, 2006).

Dentro de los principales atributos de calidad fisico-químicos, biológicos y nutricionales de los productos secos se encuentran el color, la retención de nutrientes, la apariencia visual, la textura, la capacidad de rehidratación, el aroma, la actividad de agua, la carga microbiana y la presencia de agentes contaminantes (Perera, 2005). Diversos autores han demostrado que las condiciones y el método de secado, junto con la aplicación de pretratamientos, tienen gran influencia en estos atributos (Jayaraman & Das Gupta, 2006; Krokida & Maroulis, 2000; Perera, 2005; Raghavan & Orsat, 2006; Sablani, 2006).

La calidad del producto deshidratado es un aspecto fundamental que debe ser considerado a la hora de diseñar u optimizar el proceso de secado, especialmente en la deshidratación de alimentos (Ho et al.,

2002; Jayaraman & Das Gupta, 2006). Para el desarrollo de productos deshidratados de calidad se presentan como alternativas la utilización de tecnologías de secado novedosas, el uso de pretratamientos, la selección apropiada de métodos de secado, y la optimización de las condiciones de secado con el fin de maximizar los atributos de calidad (Fernández-Vidal, 2007; Garau, 2008; Krokida & Maroulis, 2000; Perera, 2005; Raghavan & Orsat, 2006; Sablani, 2006).

La tendencia actual del consumidor moderno se ha centrado tanto en la valoración de la calidad nutritiva o funcional como las propiedades físicas de los productos. Es así como muchos productos deshidratados de origen hortofrutícola han cobrado notable interés por su contribución en cuanto a valor energético, minerales, vitaminas y compuestos funcionales (Garau, 2008; Sablani, 2006). En tal sentido, diferentes estudios experimentales han sido realizados con el objetivo de reducir los efectos del secado en la retención o pérdida de la calidad nutricional de los productos hortofrutícolas (Garau, 2008; Krokida & Maroulis, 2000; Marfil et al., 2008; Perera, 2005; Raghavan & Orsat, 2006; Sablani, 2006; Santos & Silva, 2008).

La calidad engloba un conjunto de parámetros del material seco, que aunque no son necesarios para la predicción de la cinética del proceso, son importantes para la estandarización de la operación y la caracterización del producto final según características deseadas por el productor o el consumidor (Jayaraman & Das Gupta, 2006; Krokida & Maroulis, 2000). De este modo, la consideración de los criterios de calidad en el estudio de la cinética del proceso, por ejemplo vía modelización y optimización computacional, permite el establecimiento de condiciones de operación que favorecen la calidad del producto, tanto en el diseño de nuevos equipos, como en la mejora de los existentes (Ho et al., 2001; Raghavan & Orsat, 2006).

2.1.5. Modelización del proceso

La modelización y simulación de procesos de secado en productos agroalimentarios ha sido una de las áreas estratégicas donde se han venido planteando problemas específicos de investigación, desarrollo e innovación. Los temas se han centrado en el desarrollo y uso de nuevas herramientas de modelación y simulación para el diseño y toma de decisiones; el desarrollo de modelos y métodos para diagnóstico y optimización de los procesos productivos en los sectores de mayor consumo de energía e impacto ambiental; el desarrollo del conocimiento científico e investigación orientada a la innovación y el avance tecnológico en productos destacados en el mercado internacional; y la consolidación de sectores productivos de la industria en automatización y modernización de procesos.

En términos matemáticos, todos los procesos involucrados, aún en el secadero más simple, son altamente no lineales y por consiguiente el desarrollo de modelos representa cierta complejidad. Aún así, la modelización y simulación de procesos, junto con la experimentación a escala de laboratorio y plantas piloto, son necesarias para el desarrollo de nuevos equipos y aplicaciones (Pakowski & Mujumdar, 2006).

El desarrollo de un modelo del proceso de secado debe incluir como fases principales la formulación, la resolución e identificación de parámetros, y la validación experimental.

2.1.5.1. *Formulación del modelo*

La modelización del proceso de secado puede realizarse a partir de modelos teóricos o empíricos (Datta & Sablani, 2007; Mikleš & Fikar, 2007). Los modelos teóricos son desarrollados a partir de los principios físicos, mientras que los modelos empíricos son obtenidos a través del

análisis matemático o estadístico de los datos del proceso, razón por la cual carecen de significado físico.

En la formulación de un modelo teórico para la representación de un proceso de secado convectivo se pueden destacar los siguientes apartados (Chen, 2007b; Pakowski & Mujumdar, 2006):

- Ecuaciones de balance, las cuales representan las leyes naturales de conservación, usualmente escritas en términos de transferencia de materia y calor.
- Ecuaciones constitutivas, también denominadas ecuaciones cinéticas, las cuales expresan los flujos del sistema con las correspondientes fuerzas impulsoras. Dentro de las más importantes se encuentran las leyes particulares de Fick y Fourier, para la definición de los mecanismos de transferencia difusionales de materia y calor, respectivamente.
- Relaciones de equilibrio, necesarias en la descripción de los fenómenos interfaciales que ocurren en el sistema, esencialmente aquellos que tienen lugar en la interfase sólido-aire.
- Propiedades físicas, inherentes al material que se seca o al aire de secado, las cuales se requieren para la solución del modelo y deben de ser identificadas de forma experimental o estimadas mediante modelos predictivos.

El conjunto de consideraciones asumidas en la formulación del modelo matemático determinan el grado de complejidad requerido para su resolución.

Aunque diferentes mecanismos de transferencia de materia tienen lugar en el secado de alimentos, la difusión líquida ha mostrado ser una suposición adecuada para describir el movimiento de agua al interior del sólido (Sanjuán et al., 2001; Saravacos & Maroulis, 2001).

Al considerar que el fenómeno difusivo es predominante en la transferencia de humedad durante el secado, muchos autores han mostrado que el comportamiento del producto durante el proceso puede ser descrito adecuadamente mediante la aplicación de la ley particular de Fick (García-Pascual et al., 2006; Reyes et al., 2002). En tal caso, la propiedad de transporte es definida por la difusividad efectiva, que aunque considera que el mecanismo difusional es predominante, puede incluir el efecto de otros mecanismos de transferencia de materia que afectan la cinética del proceso (Iguaz et al., 2003; Senadeera et al., 2003; Simal et al., 2006).

2.1.5.2. Resolución del modelo

Tal como se ha expuesto, el modelo fundamentado en principios físicos describe estados transitorios y además lo hace a una escala “microscópica”, es decir, considerando los perfiles a partir de balances en un elemento diferencial. El resultado es un conjunto de ecuaciones diferenciales.

Según las ecuaciones planteadas y condiciones de contorno consideradas en la formulación del modelo se podrán utilizar métodos de resolución analíticos, como el método de separación de variables, o recurrir a métodos de resolución numéricos tales como el de diferencias finitas (Bon & Kudra, 2007; Garau et al., 2006; Mulet et al., 2005) o elementos finitos (Bon et al., 2007; Gaston et al., 2002).

En la literatura es frecuente la utilización de las soluciones analíticas de las ecuaciones de difusión basadas en la Ley particular de Fick. Estos modelos, además de ser aplicados cuando la geometría del sólido es sencilla (lámina, cubo, esfera, cilindro), asumen que la transferencia externa a la transferencia de materia es despreciable, que no se presenta variación del volumen durante el secado, que el proceso es isotérmico y que la difusividad efectiva es constante o depende

únicamente de la temperatura (Chen, 2007a; Garau, 2008; Simal et al., 2005a).

Por otro lado, la resolución del modelo puede presentar una complejidad considerable si en su formulación se considera, por ejemplo, una geometría del producto irregular, las propiedades de transporte dependientes de la humedad y la temperatura, la resistencia externa a los fenómenos de transferencia y el efecto de la contracción. En tal caso, los sistemas de ecuaciones en derivadas parciales correspondientes a los balances de materia y energía no pueden resolverse de forma analítica, siendo necesaria la utilización de métodos numéricos como son el de diferencias finitas o elementos finitos (Baini & Langrish, 2007; Garau, 2008; Váquiro et al., 2009).

2.1.5.3. Identificación de los parámetros del modelo

Con el propósito de representar adecuadamente el proceso en condiciones experimentales es necesario identificar sus parámetros, los cuales dependen de las características y estructura del modelo desarrollado. Los parámetros a estimar están relacionados con propiedades del material desconocidas o difíciles de medir experimentalmente, y que tienen una gran influencia sobre la dinámica del proceso (Mikleš & Fikar, 2007).

La identificación de los parámetros se realiza a partir de la minimización de la diferencia entre estimaciones del modelo y datos experimentales del proceso. Este ajuste del modelo a la información experimental es frecuentemente realizado a partir de las curvas de secado, con el objetivo de obtener un modelo que represente el proceso como la pérdida de humedad promedio del producto en función del tiempo (Molnár, 2006).

2.1.5.4. Validación experimental

Una vez ajustado el modelo, es necesaria su validación con el propósito de determinar su fiabilidad en la representación del proceso. La validación se lleva a cabo a partir de información experimental diferente a la utilizada en la identificación paramétrica. Una manera de validar el modelo es extrapolar los resultados obtenidos a otras condiciones experimentales y ver la capacidad de predicción del modelo en dichas condiciones (García-Pérez, 2007).

2.1.6. Propiedades físicas relevantes en el secado de alimentos

Las propiedades físicas relevantes en el secado de alimentos pueden relacionarse con las condiciones internas y externas del proceso. Aquellas relacionadas con las condiciones internas son propias del material: actividad de agua, difusividad, conductividad, calor específico e isothermas de sorción. En cuanto a las relacionadas con las condiciones externas, son especialmente importantes los coeficientes de transferencia de materia y calor interfaciales, y las propiedades del aire húmedo.

El conocimiento de las propiedades físicas es esencial para el desarrollo y solución de modelos matemáticos fundamentados en los principios de transferencia de materia y calor que gobiernan el proceso de secado. Sin embargo, es preciso resaltar que son las consideraciones específicas del modelo respecto al producto y el proceso las que determinan las propiedades físicas requeridas.

A continuación se describen de forma general las propiedades físicas más relevantes consideradas en el desarrollo del modelo matemático del presente estudio.

2.1.6.1. Actividad de agua

El agua es un componente esencial en todos los materiales agroalimentarios. Su contenido varía ampliamente entre diferentes alimentos y se encuentra estrechamente relacionado con las propiedades físicas del material y con la actividad microbiana, química o enzimática (Figura & Teixeira, 2007; Karel & Lund, 2003; Sahin & Sumnu, 2006).

Una parte importante del agua contenida en los alimentos puede encontrarse ligada a su estructura interna (por ejemplo, retenida en capilares o en solución con estructuras celulares o componentes del material). Aquella agua que no se encuentra ligada puede comportarse físicamente como una sustancia pura y ser removida libremente sin influencia de las características del material. La forma como el agua está enlazada a la estructura interna del alimento, el grado en el cual se halla disponible para ser evaporada o en el cual se encuentra químicamente enlazada y no disponible, puede ser reflejado por la actividad de agua del material (Al-Muhtaseb et al., 2002; Basu et al., 2006; Figura & Teixeira, 2007).

Cuando un alimento se encuentra en equilibrio con la atmósfera que lo rodea, la actividad de agua en el alimento es igual a la humedad relativa de la atmósfera circundante, razón por la cual la actividad de agua de un alimento puede ser considerada como su humedad relativa de equilibrio (Basu et al., 2006; Figura & Teixeira, 2007; Sahin & Sumnu, 2006; Walstra, 2003). La actividad de agua (φ) puede ser definida según la Ec. (2.1.1) calculando la relación entre la presión de vapor ejercida por la humedad del producto en la interfase P_v (kPa) y la presión de vapor ejercida por el agua pura P_s (kPa), a la temperatura en la superficie del material.

$$\varphi = \frac{P_v}{P_s} \quad (2.1.1)$$

Existen diversas técnicas de medida de la actividad de agua en alimentos, aunque lo más habitual es emplear higrómetros de punto de rocío, higrómetros eléctricos o métodos gravimétricos (García-Pascual, 2004).

2.1.6.2. Isotermas de sorción

La humedad contenida en un sólido ejerce una presión de vapor dependiendo de la disponibilidad del agua, la naturaleza del sólido y la temperatura. Un sólido húmedo expuesto a un suministro continuo de aire pierde agua hasta que la presión de vapor de la humedad contenida en él es igual a la presión parcial de vapor en el gas. Se dice entonces que el sólido y el aire se encuentran en equilibrio dinámico (no hay intercambio neto de masa), y el contenido de humedad del sólido es llamado el contenido de humedad de equilibrio (Basu et al., 2006; Rizvi, 2005; Wilhelm et al., 2004).

El contenido de humedad de equilibrio depende de diversos factores, dentro de los cuales están la composición química, la estructura física y las condiciones del aire. La relación entre la humedad relativa y el contenido de humedad de equilibrio a una temperatura dada son representadas a través de las isotermas de sorción, las cuales expresan el valor mínimo de humedad que puede ser alcanzado por un material en relación con la temperatura y humedad relativa del aire (Basu et al., 2006; Wilhelm et al., 2004). En general, si la actividad de agua en la atmósfera que circunda el alimento se mantiene constante, un incremento en la temperatura puede causar una disminución o un aumento en la cantidad de agua absorbida en función de los componentes que predominan en el alimento, dado el efecto de la temperatura sobre la movilidad de las

moléculas de agua y sobre el equilibrio dinámico entre el aire y el alimento (Al-Muhtaseb et al., 2002).

Las isotermas de sorción suministran información útil para diferentes operaciones en la industria alimentaria (secado, mezclado, almacenamiento, envasado). Su conocimiento ayuda a explicar los mecanismos de sorción y la interacción entre los componentes de los alimentos y el agua, al mismo tiempo que suministra información sobre el estado del agua dentro del producto y los requerimientos de energía en los procesos de secado (Basu et al., 2006; Chen, 2006; Figura & Teixeira, 2007; Janjai et al., 2007; Sahin & Sumnu, 2006; Simal et al., 2007).

Los diferentes métodos disponibles para la determinación de isotermas de sorción en alimentos se describen en Al-Muhtaseb et al. (2002), Basu et al. (2006), Marinos-Kouris & Maroulis (2006), Ramaswamy & Marcotte (2005) y Sahin & Sumnu (2006).

Aunque han sido propuestos diferentes modelos para representar las isotermas de sorción en alimentos (Basu et al., 2006; Kaymak-Ertekin & Gedik, 2004; Wilhelm et al., 2004), ninguna de las ecuaciones ofrece resultados precisos en todo el rango de actividades de agua y para todos los tipos de productos. Tal variación en las propiedades de sorción reportadas en la literatura es producto de las características fisicoquímicas propias del material alimentario y de las diferentes técnicas experimentales empleadas.

Dentro del gran número de modelos disponibles en la literatura, la ecuación de Guggenheim, Anderson y de Boer (GAB) ha sido considerada como un modelo fundamental para la caracterización de la sorción del agua en materiales alimentarios (Figura & Teixeira, 2007; Timmermann et al., 2001). El modelo teórico de GAB (Ec. 2.1.2) está

basado en el fenómeno de adsorción, lo cual otorga significado físico a sus parámetros,

$$W_e = W_m \frac{C_G K_G \varphi}{(1 - K_G \varphi)(1 + (C_G - 1) K_G \varphi)} \quad (2.1.2)$$

siendo W_e (kg kg⁻¹ b.s.) el contenido de humedad de equilibrio; W_m (kg kg⁻¹ b.s.) el contenido de humedad de equilibrio en la monocapa; C_G y K_G parámetros del modelo. Los parámetros C_G y K_G pueden ser escritos como funciones dependientes de la temperatura usando relaciones tipo Arrhenius (Ecs. 2.1.3 y 2.1.4):

$$C_G = C_{G_0} \exp\left(\frac{H_m - H_n}{RT_{abs}}\right) \quad (2.1.3)$$

$$K_G = K_{G_0} \exp\left(\frac{\lambda_v - H_n}{RT_{abs}}\right) \quad (2.1.4)$$

En tales ecuaciones C_{G_0} y K_{G_0} son parámetros propios del modelo de GAB; H_m (kJ kmol⁻¹) es el calor de sorción en la monocapa; H_n (kJ kmol⁻¹) es el calor de sorción en la multicapa; λ_v (kJ kmol⁻¹) es el calor latente de vaporización del agua pura (ASAE, 1999); R (kJ kmol⁻¹ K⁻¹) es la constante de los gases perfectos; y T_{abs} (K) es la temperatura absoluta.

Algunas de las ecuaciones empíricas más empleadas en la representación matemática de las isotermas de sorción en función de la temperatura son los modelos de Oswin (Ec. 2.1.5), Henderson (Ec. 2.1.6) y Halsey (Ec. 2.1.7).

$$W_e = (a + bT) \left(\frac{\varphi}{1 - \varphi}\right)^c \quad (2.1.5)$$

$$W_e = \left[-\frac{\ln(1 - \varphi)}{a(T + b)}\right]^{1/c} \quad (2.1.6)$$

$$W_e = \left[-\frac{\exp(a + bT)}{\ln(\varphi)} \right]^{1/c} \quad (2.1.7)$$

En las Ecs. (2.1.5)–(2.1.7), a , b y c son parámetros de los modelos; y T (°C) es la temperatura.

2.1.6.3. *Calor isostérico de sorción*

El calor isostérico de sorción es una cuantificación de los requerimientos energéticos para romper las fuerzas de atracción entre las moléculas de vapor de agua y la superficie del material (Al-Muhtaseb et al., 2002; Basu et al., 2006). El calor isostérico de sorción (Q_s , kJ kmol⁻¹) puede ser calculado a partir de la isoterma de sorción usando la Ec. (2.1.8) la cual se deriva de la ecuación de Clausius-Clapeyron (Basu et al., 2006; Chen, 2006; Kaymak-Ertekin & Gedik, 2004).

$$Q_s = \lambda_v - R \frac{\partial(\ln \varphi)}{\partial(1/T)} \quad (2.1.8)$$

La energía requerida para remover el agua de la matriz del alimento estará determinada por la suma de los términos al lado derecho de la Ec. (2.1.8), los cuales expresan el calor de vaporización del agua pura (λ_v) y el calor isostérico de sorción neto, respectivamente (Figura & Teixeira, 2007; Rizvi, 2005).

Adicional al cálculo del calor isostérico de sorción a partir de las isotermas, Al-Muhtaseb et al. (2002), Chen (2006) y Mulet et al. (1999) describen la calorimetría diferencial de barrido (DSC) como una técnica precisa para su medición directa en alimentos.

Valores del calor isostérico de sorción para diferentes alimentos son presentados por Al-Muhtaseb et al. (2002).

2.1.6.4. *Difusividad efectiva*

La difusión de humedad en sólidos durante el secado es un proceso complejo que involucra diversos mecanismos. Cuando predomina la difusión molecular, el efecto combinado de los demás mecanismos se incluye mediante la definición de una difusividad efectiva, la cual es también empleada para considerar el efecto de la estructura del material en la transferencia de materia en medios heterogéneos (Hallström et al., 2007; Marinos-Kouris & Maroulis, 2006; Saravacos, 2005; Walstra, 2003).

Considerando una difusividad efectiva, la velocidad de transporte de materia por unidad de área puede ser definida de acuerdo a la primera ley de Fick, según la Ec. (2.1.9),

$$m_x = -D_e \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.1.9)$$

donde m_x ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) es el flujo másico por unidad de área en la dirección x (m); D_e ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) es la difusividad efectiva; y C (kg m^{-3}) es la concentración de humedad.

En general, la difusividad efectiva varía con la humedad y la temperatura, con un efecto significativo a bajos contenidos de humedad. Asimismo, la presencia de grasas en el alimento, la presión y la compresión mecánica tienen efecto sobre esta propiedad (Marinos-Kouris & Maroulis, 2006; Saravacos, 2005).

Diferentes correlaciones empíricas han sido propuestas para la estimación de la difusividad efectiva en función de la temperatura y la humedad. La Ec. (2.1.10) es una de las más empleadas, donde la dependencia de la difusividad efectiva con la temperatura es estimada a partir de una ecuación tipo Arrhenius,

$$D_e = D_0 \exp \left[-\frac{E_a}{RT_{abs}} \right] \quad (2.1.10)$$

donde el factor preexponencial D_0 ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) es denominado difusividad efectiva de referencia y E_a (kJ kmol^{-1}) es la energía de activación.

La dependencia de la difusividad efectiva con la humedad puede ser introducida considerando que E_a es función de la humedad (Marinos-Kouris & Maroulis, 2006; Simal et al., 2006).

Valores de difusividad efectiva para diversos alimentos han sido compilados y publicados por Marinos-Kouris & Maroulis (2006) y Saravacos & Maroulis (2001). Los métodos comúnmente empleados para la determinación de la difusividad efectiva en sólidos han sido descritos por Marinos-Kouris & Maroulis (2006), Saravacos (2005), Saravacos & Maroulis (2001) y Walstra (2003).

En general, los diferentes métodos de estimación, el rango de condiciones empleadas y, en particular, la variación en la estructura física y composición de los alimentos, dificulta la comparación entre los diferentes valores de difusividad efectiva reportados en la literatura (Marinos-Kouris & Maroulis, 2006; Saravacos, 2005). Las difusividades reportadas son en su mayoría valores promedio en un cierto rango de humedad, las cuales han sido obtenidas asumiendo resistencia externa a la transferencia de materia y calor despreciable, en el secado de piezas individuales o capas finas de producto a velocidades y temperaturas relativamente altas (Marinos-Kouris & Maroulis, 2006).

2.1.6.5. Conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad esencial que determina la velocidad de transmisión de calor a través de los alimentos durante el procesamiento térmico (Marinos-Kouris & Maroulis, 2006; Nesvadba, 2005). Es definida a través de la ley particular de Fourier, donde la

velocidad de transferencia de calor por conducción se expresa matemáticamente según la Ec. (2.1.11).

$$q_x = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1.11)$$

donde q_x (W m^{-2}) es el flujo de calor por unidad de área en la dirección x ; y κ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) es la conductividad térmica.

En materiales alimentarios, la conductividad térmica depende significativamente de la composición, donde destaca la influencia del contenido de humedad, puesto que la conductividad térmica del agua es mayor que la de los otros componentes (proteína, grasa, carbohidratos). La porosidad de los alimentos tiene también un efecto sobre la conductividad, ya que el aire, un constituyente de los alimentos porosos, tiene una conductividad térmica muy baja. Por su parte, la dependencia con la temperatura es leve, mostrando ligeros incrementos con aumentos en la temperatura. Adicionalmente, la resistencia térmica que el alimento ofrece al flujo de calor también depende de la disposición de los componentes en el alimento y de su estructura (Figura & Teixeira, 2007; Marinos-Kouris & Maroulis, 2006; Nesvadba, 2005). Valores de conductividad térmica para algunos de los alimentos más representativos han sido compilados por Marinos-Kouris & Maroulis (2006) y Nesvadba (2005).

El conocimiento de los componentes mayoritarios es usualmente suficiente para predecir la conductividad térmica del alimento. Las diferentes ecuaciones para la predicción de la conductividad térmica en alimentos se describen en Figura & Teixeira (2007), Lozano (2006), Marinos-Kouris & Maroulis (2006), Nesvadba (2005), Sahin & Sumnu (2006) y Toledo (2006).

La medición de la conductividad térmica presenta algunas dificultades debido a la composición y estructura heterogénea propia de

los materiales alimentarios, así como a la migración de agua debido a los gradientes térmicos y a los cambios fisicoquímicos que puedan presentarse durante la medición (Nesvadba, 2005). Los métodos más usuales para la determinación experimental de la conductividad térmica en alimentos han sido descritos en Lozano (2006), Marinos-Kouris & Maroulis (2006), Nesvadba (2005), Ramaswamy & Marcotte (2005) y Sahin & Sumnu (2006).

2.1.6.6. *Calor específico*

El calor específico de un material es una propiedad térmica que indica la capacidad del material para mantener y almacenar calor (Figura & Teixeira, 2007). Puede ser cuantificado especificando la cantidad de calor requerido para aumentar la temperatura, por unidad de masa y por unidad de incremento de temperatura (Figura & Teixeira, 2007; Sahin & Sumnu, 2006). A presión constante, el calor específico c_p ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) es definido por la Ec. (2.1.12), donde θ (kJ kg^{-1}) y T ($^{\circ}\text{C}$) son la entalpía específica y la temperatura del material, respectivamente.

$$c_p = \frac{d\theta}{dT} \quad (2.1.12)$$

Al igual que la conductividad térmica, el calor específico depende significativamente de la composición. En aquellos con un alto contenido de humedad, el calor específico del agua representa la principal contribución por su elevado valor en comparación con los demás componentes del alimento. Nesvadba (2005) y Sahin & Sumnu (2006) presentan valores de calor específico representativos para diferentes materiales alimentarios.

Como sucede con la conductividad térmica, existen diferentes modelos para predecir el calor específico de los alimentos a partir de

sus compuestos principales, los cuales se describen en Figura & Teixeira (2007), Lozano (2006), Ramaswamy & Marcotte (2005) y Sahin & Sumnu (2006).

Dentro de las técnicas más usuales para la medición del calor específico (Lozano, 2006; Ramaswamy & Marcotte, 2005; Sahin & Sumnu, 2006), la calorimetría diferencial de barrido (DSC) es una de las más convenientes porque con una muestra pequeña se pueden alcanzar resultados rápidos y precisos en productos homogéneos.

2.1.6.7. Coeficientes de transferencia interfaciales

Los coeficientes de transferencia en la interfase están relacionados con la transferencia de calor y materia entre la superficie de un sólido y un fluido a través de la capa límite, término con el cual se designa la capa de fluido que se encuentra más cerca de la superficie y en la cual existen gradientes de velocidad, temperatura y/o concentración. La capa límite ejerce la influencia externa más importante sobre la cantidad de calor y materia que se transfiere (resistencia externa), en la medida en que difieren la velocidad, temperatura y concentración desde el seno del fluido hasta la superficie del sólido (Baehr & Stephan, 2006; Hottel et al., 2008; Saravacos & Maroulis, 2001).

La transferencia de calor en la interfase sólido-fluido puede ser definida mediante la Ley de enfriamiento de Newton (Ec. 2.1.13),

$$q_s = h(T_s - T_\infty) \quad (2.1.13)$$

donde q_s (W m^{-2}) es el flujo de calor por unidad de área en la superficie del sólido; h ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$) es el coeficiente promedio de transferencia de calor por convección; T_s ($^\circ\text{C}$) es la temperatura en la superficie del sólido; y T_∞ ($^\circ\text{C}$) es la temperatura del aire fuera de la capa límite. El flujo de calor q_s puede ser definido usando la Ley de Fourier ya que en la capa de fluido en contacto directo con la superficie la velocidad de

movimiento es cero y, por tanto, el calor puede ser transferido únicamente por conducción.

La transferencia de humedad en la interfase sólido-fluido es definida de manera análoga a la transferencia de calor (Ec. 2.1.14), en la cual la fuerza impulsora es expresada mediante la diferencia de concentraciones,

$$m_s = h_m(C_s - C_\infty) \quad (2.1.14)$$

siendo m_s ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) el flujo de masa por unidad de área en la superficie del sólido; h_m (m s^{-1}) el coeficiente promedio de transferencia de materia por convección; C_s (kg m^{-3}) la concentración de vapor de agua en el aire en contacto con la superficie del sólido; y C_∞ (kg m^{-3}) la concentración de vapor de agua en el aire fuera de la capa límite.

Los coeficientes de transferencia por convección, además de depender de las propiedades del fluido (densidad, viscosidad, difusividad, conductividad térmica y calor específico), dependen de la geometría del sólido y de las condiciones del flujo. Esta multiplicidad de variables es atribuible a la dependencia de la transferencia por convección con las capas límite que se desarrollan sobre la superficie (Baehr & Stephan, 2006).

Existen diferentes métodos para la determinación experimental de los coeficientes de transferencia por convección (Incropera et al., 2007; Marinos-Kouris & Maroulis, 2006; Saravacos & Maroulis, 2001) que, sin embargo, son aplicables únicamente en situaciones muy controladas en las cuales pueden resolverse con relativa facilidad las correspondientes ecuaciones de gobierno. Un enfoque más práctico normalmente involucra su estimación a partir de ecuaciones empíricas que correlacionan las medidas de transferencia de materia y calor por

convección mediante números adimensionales (Baehr & Stephan, 2006; Hottel et al., 2008; Marinos-Kouris & Maroulis, 2006).

Para la estimación de los coeficientes promedio (Ec. 2.1.15) a través de correlaciones empíricas (Ec. 2.1.16) se usan los números adimensionales promedio de Nusselt (Nu_ℓ) y Sherwood (Sh_ℓ) para transferencia de calor y materia por convección, respectivamente.

$$h = \frac{1}{A} \int_A h_x dA; \quad h_m = \frac{1}{A} \int_A h_{m,x} dA; \quad (2.1.15)$$

$$h = \frac{Nu_\ell \kappa_a}{\ell}; \quad h_m = \frac{Sh_\ell D_{wa}}{\ell} \quad (2.1.16)$$

En las Ecs. (2.1.15) y (2.1.16), h_x ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$) y $h_{m,x}$ (m s^{-1}) son los coeficientes locales de transferencia de calor y materia por convección, respectivamente; A (m^2) es el área efectiva de la superficie del sólido para la transferencia de calor o materia; ℓ (m) es la longitud característica de la geometría del sólido; κ_a ($\text{kW m}^{-1} \text{K}^{-1}$) es la conductividad térmica del aire húmedo; y D_{wa} ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) es la difusividad molecular del vapor de agua en el aire.

Para la determinación de Nu_ℓ y Sh_ℓ se emplean expresiones de la forma Ec. (2.1.17) para convección forzada y Ec. (2.1.18) para convección natural que, al igual que los coeficientes de transferencia, dependen del tipo de flujo (laminar o turbulento) y de la geometría de la superficie sobre la cual se desliza el fluido (Baehr & Stephan, 2006; Hottel et al., 2008; Incropera et al., 2007).

$$Nu_\ell = f(Re_\ell, Pr); \quad Sh_\ell = f(Re_\ell, Sc) \quad (2.1.17)$$

$$Nu_\ell = f(Gr_\ell, Pr); \quad Sh_\ell = f(Gr_\ell, Sc) \quad (2.1.18)$$

Re_ℓ , Gr_ℓ , Pr y Sc son los números adimensionales de Reynolds (Ec. 2.1.19), Grashof (Ec. 2.1.20), Prandtl (Ec. 2.1.21) y Schmidt (Ec. 2.1.22), respectivamente,

$$Re_\ell = \frac{\ell v_\infty \rho_a}{\mu_a} \quad (2.1.19)$$

$$Gr_\ell = \frac{g \ell^3 \rho_a |\rho_a - \rho_{a,\infty}|}{\mu_a^2} \quad (2.1.20)$$

$$Pr = \frac{c_{pa} \mu_a}{\kappa_a} \quad (2.1.21)$$

$$Sc = \frac{\mu_a}{\rho_a D_{wa}} \quad (2.1.22)$$

donde v_∞ (m s^{-1}) es la velocidad del aire en el seno del fluido fuera de la capa límite; ρ_a (kg m^{-3}), μ_a ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) y c_{pa} ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) son la densidad, la viscosidad dinámica y el calor específico del aire húmedo; y g (m s^{-2}) es la aceleración de la gravedad.

Correlaciones de interés general para objetos de diferentes geometrías inmersos en fluidos se presentan en Incropera et al. (2007) y Hottel et al. (2008). Una amplia compilación de correlaciones con diferentes aplicaciones en el secado de alimentos se encuentra en Marinos-Kouris & Maroulis (2006) y Saravacos & Maroulis (2001).

2.1.6.8. Propiedades del aire húmedo

Las operaciones de secado involucran transferencia de materia y calor, producto de la interacción entre el material y el aire. Por tal razón las propiedades del aire de secado, el cual constituye una mezcla de aire seco y vapor de agua, son útiles en los cálculos del proceso (Barbosa-Cánovas & Ibarz, 2003; Genskow et al., 2008; Wilhelm et al., 2004).

Para el cálculo de las propiedades del aire húmedo es preciso conocer tanto la concentración de vapor de agua en el aire en diversas condiciones de temperatura y presión como las propiedades del aire y del vapor de agua (Barbosa-Cánovas & Ibarz, 2003; Genskow et al., 2008; Poling et al., 2000).

Asumiendo un comportamiento ideal del vapor, el contenido de humedad en el aire (Y , kg kg^{-1} b.s.) puede ser expresado según la Ec. (2.1.23), a partir de la actividad de agua del aire (φ), la presión total (P , kPa) y la presión de saturación del agua pura (P_s , kPa).

$$Y = 0.622 \frac{\varphi P_s}{P - \varphi P_s} \quad (2.1.23)$$

La relación entre la masa del aire húmedo y el volumen que este ocupa está dada por la Ec. (2.1.24), siendo ρ_a (kg m^{-3}) la densidad el aire húmedo; y T_{abs} (K) la temperatura (Barbosa-Cánovas & Ibarz, 2003; Genskow et al., 2008; Wilhelm et al., 2004).

$$\rho_a = \frac{P(Y + 1)}{RT_{abs}(0.035 + 0.055Y)} \quad (2.1.24)$$

El calor específico del aire húmedo a presión constante (c_{pa} , $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) está dado por la Ec. (2.1.25), donde c_{pda} y c_{pv} ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) representan los calores específicos a presión constante del aire seco y vapor de agua, respectivamente (Barbosa-Cánovas & Ibarz, 2003).

$$c_{pa} = c_{pda} + Yc_{pv} \quad (2.1.25)$$

Según el método de Wilke (Poling et al., 2000), para una mezcla binaria de aire y vapor de agua la viscosidad dinámica puede ser calculada mediante la Ec. (2.1.26), donde μ_a , μ_{da} y μ_v ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) son las viscosidades dinámicas del aire húmedo, aire seco y vapor de agua, respectivamente; y_v (mol mol^{-1}) es la la fracción molar del vapor de agua

en la mezcla (Ec. 2.1.27); $\psi_{da,v}$ y $\psi_{v,da}$ son parámetros definidos por las Ecs. (2.1.28) y (2.1.29), respectivamente.

$$\mu_a = \frac{(1 - y_v)\mu_{da}}{1 - y_v + y_v\psi_{da,v}} + \frac{y_v\mu_v}{y_v + (1 - y_v)\psi_{v,da}} \quad (2.1.26)$$

$$y_v = \frac{Y}{0.622 + Y} \quad (2.1.27)$$

$$\psi_{da,v} = \left[0.468 + 0.527 \left(\frac{\mu_{da}}{\mu_v} \right)^{0.5} \right]^2 \quad (2.1.28)$$

$$\psi_{v,da} = 1.606 \frac{\mu_v}{\mu_{da}} \psi_{da,v} \quad (2.1.29)$$

De acuerdo al método de Wassiljewa (Poling et al., 2000), la conductividad térmica del aire húmedo puede ser estimada a partir de la Ec. (2.1.30), la cual es análoga a la Ec. (2.1.26), siendo κ_a , κ_{da} y κ_v ($\text{kW m}^{-1} \text{K}^{-1}$) las conductividades térmicas del aire húmedo, aire seco y vapor de agua, respectivamente.

$$\kappa_a = \frac{(1 - y_v)\kappa_{da}}{1 - y_v + y_v\psi_{da,v}} + \frac{y_v\kappa_v}{y_v + (1 - y_v)\psi_{v,da}} \quad (2.1.30)$$

La difusividad molecular del vapor de agua en el aire (D_{wa} , $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) puede ser estimada, según el método de Fuller-Schettler-Giddings (Geankoplis, 1998), mediante la Ec. (2.1.31).

$$D_{wa} = \frac{0.0118 \times 10^{-7} T_{abs}^{1.75}}{P} \quad (2.1.31)$$

2.2. Secado intermitente

A diferencia del secado que convencionalmente emplea condiciones de operación fijas, el secado intermitente se fundamenta en la implementación y combinación de condiciones variables, tales como el suministro de calor, la temperatura, la humedad y velocidad del aire de secado (Bon & Kudra, 2007; Chua et al., 2003; Ho et al., 2002; Islam et al., 2003). Los esquemas de intermitencia pueden ser aplicados al operar los equipos (como en el caso de los secadores por lotes operados de forma discontinua) o ser inherentes a su diseño (como en el caso del secador rotatorio de lecho fluido). Una clasificación general de los diferentes tipos de intermitencia (Figura 2.2) así como una descripción de diferentes equipos que pueden operar de forma intermitente ha sido presentada por Chua et al. (2003).

En general, el secado intermitente es una tecnología empleada con el fin de preservar la calidad y minimizar el consumo energético en el secado de materiales sensibles al calor y donde la cinética está controlada por los fenómenos de transferencia internos (Chua et al., 2003; Do Carmo & De Lima, 2008; Ho et al., 2002; Islam et al., 2003; Jumah et al., 2007; Jumah & Mujumdar, 2005; Mujumdar, 2004). Es una técnica de uso frecuente en el secado de granos y cereales, y es precisamente en este campo donde se han desarrollado la mayor cantidad de estudios con el fin de evaluar su viabilidad en cuanto a la eficiencia del proceso y a la reducción de problemas como la rotura, la fisura, y la pérdida de germinación de granos y semillas (Aquerreta et al., 2007; Cihan et al., 2008; Cihan et al., 2007; Cnossen et al., 2003; Do Carmo & De Lima, 2008; Dong et al., 2009; Madamba & Yabes, 2005; Nishiyama et al., 2006; Shei & Chen, 2002; Thakur & Gupta, 2006).

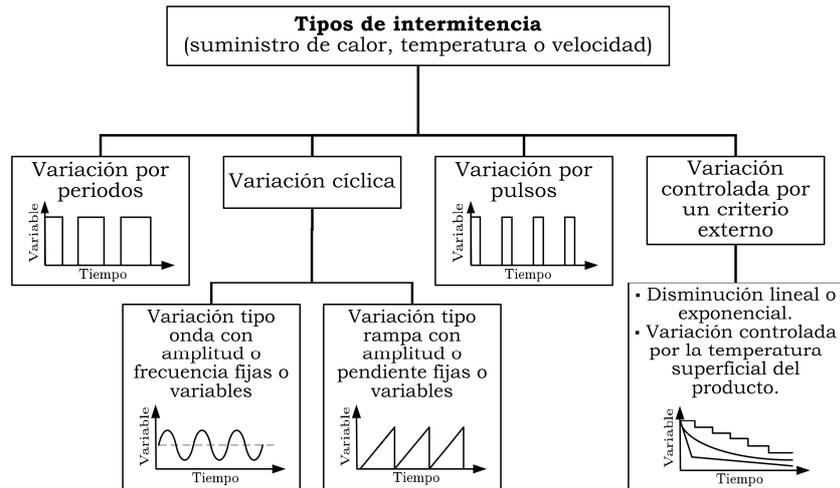


Figura 2.2. Clasificación general de los esquemas de intermitencia aplicados al proceso de secado. Adaptado de Chua et al. (2003).

Debido a la relativa facilidad con la que pueden desarrollarse algunos tipos de intermitencia, la transferencia tecnológica desde técnicas convencionales, como el secado por lotes, implicaría una baja inversión en diseño y modificación de los equipos, un importante punto a favor de la industria de países en vías de desarrollo.

2.2.1. Secado intermitente por suministro periódico de energía térmica

En el secado intermitente por suministro de energía térmica el suministro de calor puede ser controlado a través de periodos consecutivos de calentamiento y reposo (Fig. 2.3) (Bon & Kudra, 2007; Cao et al., 2004; Cihan et al., 2007; Do Carmo & De Lima, 2008; Jumah et al., 2007). Estos periodos a su vez pueden ser organizados cíclicamente, estableciendo un ciclo de intermitencia como dos periodos de calentamiento separados por uno de reposo. Durante los

periodos de calentamiento el producto es sometido a un secado convencional, donde el flujo de aire caliente da lugar a fenómenos de transferencia de materia y calor por convección forzada en la superficie del sólido que determinan los cambios en la temperatura y humedad del material. En cambio, durante los periodos de reposo, o atemperamiento, los cambios en la temperatura y el contenido de humedad del material toman lugar sin suministro de aire caliente y están determinados por mecanismos de transferencia de materia y calor por convección natural.

Bajo este esquema de operación, la humedad se difunde hacia la superficie del sólido durante los periodos de reposo, causando la redistribución del agua contenida en el material (Figura 2.4) (Bon & Kudra, 2007; Cao et al., 2004; Cihan et al., 2007; Do Carmo & De Lima, 2008). Durante el siguiente periodo de calentamiento esta redistribución aumenta la velocidad de secado y disminuye el calentamiento del producto, por cuanto existe mayor disponibilidad de agua cerca de la superficie, y el calor suministrado por convección evapora dicha humedad superficial, reduciendo el incremento en la temperatura del material (Bon & Kudra, 2007; Cao et al., 2004).

Al tener efecto sobre la velocidad del proceso, el atemperamiento reduce el tiempo de calentamiento necesario para alcanzar un contenido de humedad deseado, disminuyendo así los requerimientos de energía y el tiempo de exposición del producto al efecto de la temperatura, en comparación con procesos donde el suministro de calor es continuo (Bon & Kudra, 2007; Cao et al., 2004; Chua et al., 2003; Cihan et al., 2007; Do Carmo & De Lima, 2008; Islam et al., 2003; Jumah et al., 2007).

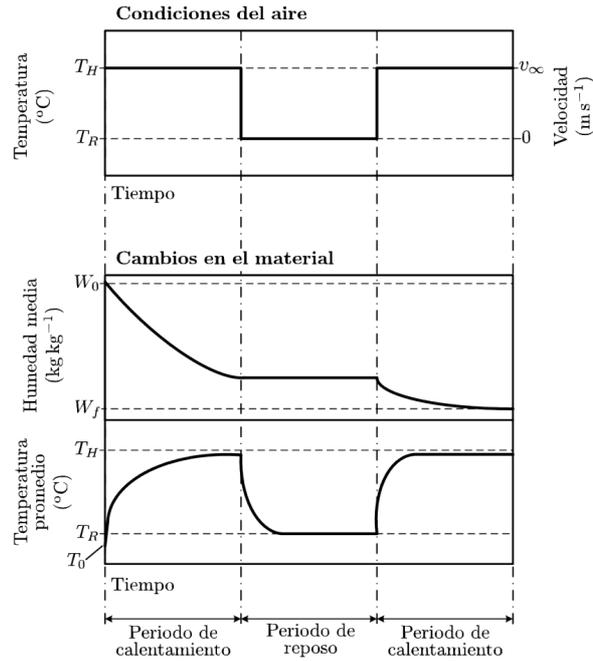


Figura 2.3. Evolución del contenido de humedad y la temperatura del producto en un proceso de secado intermitente por suministro periódico de energía térmica. T_H y T_R ($^{\circ}\text{C}$) son las temperatura del aire en los periodos de calentamiento y reposo, respectivamente; v_{∞} (m s^{-1}) es la velocidad del aire en los periodos de calentamiento; W_0 y W_f (kg kg^{-1} b.s.) son los contenidos de humedad inicial y final del producto en base seca, respectivamente; y T_0 ($^{\circ}\text{C}$) es la temperatura inicial del producto.

Tal como sucede con otras tecnologías, el proceso de secado intermitente debe ser analizado con el propósito de determinar las mejores condiciones de operación, respecto a las características particulares del producto y del proceso. Dentro de las condiciones a establecer podría considerarse la duración de los periodos de calentamiento y reposo, que, por ejemplo, aseguren una reducción del efecto tiempo-temperatura sobre la calidad del producto, y una duración del atemperamiento donde la difusión de agua hacia la

superficie, y la reducción de los gradientes de humedad al interior del sólido, aumenten la velocidad de secado en los periodos de calentamiento posteriores (Bon & Kudra, 2007; Cao et al., 2004; Chua et al., 2003; Cihan et al., 2007; Do Carmo & De Lima, 2008).

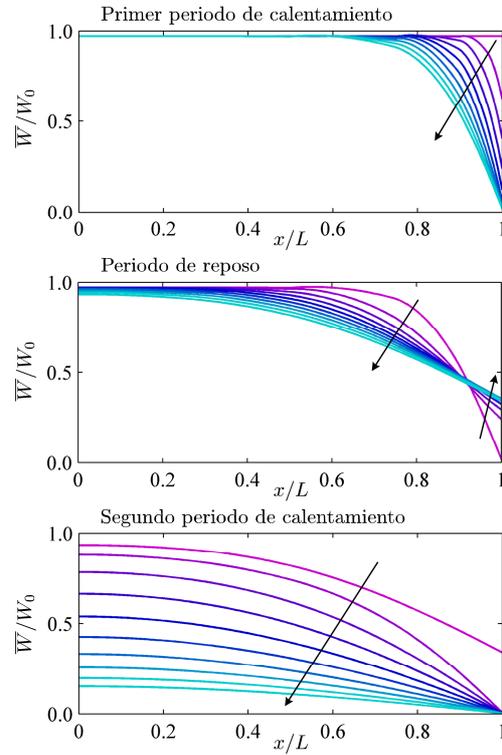


Figura 2.4. Distribución del contenido de humedad durante los periodos de calentamiento y reposo en el secado intermitente de un producto agroalimentario. Las flechas indican la evolución progresiva del perfil de humedad a lo largo del eje central de la muestra. \bar{W} (kg kg^{-1} b.s.) es el contenido de humedad promedio; W_0 (kg kg^{-1} b.s.) es el contenido de humedad inicial; x/L es la posición adimensional con respecto a la coordenada x (m); y L (m) es la distancia desde el centro hasta la superficie de la muestra.

2.2.2. Estudio de la influencia de la intermitencia sobre la eficiencia del proceso y sobre la calidad del producto

En aquellos materiales donde la migración de agua en el interior del sólido (resistencia interna) controla la velocidad total del proceso de secado, las condiciones de operación pueden llevar a velocidades altas de transferencia de materia y calor en la superficie, que provocan un sobrecalentamiento y secado excesivo en las zonas más externas del producto. Esto conlleva a problemas en la calidad tales como degradación de compuestos nutricionales, pardeamiento no enzimático, encostramiento superficial, rompimiento y aparición de fisuras. Del mismo modo, la utilización de velocidades o temperaturas altas en el aire de secado puede deteriorar aún más la calidad del producto sin lograr un incremento importante en la cinética del proceso. En estos casos los procesos de secado que emplean esquemas de operación intermitente constituyen una alternativa que puede favorecer el consumo energético y disminuir los problemas de calidad superficiales, ya que en este tipo de tecnologías el suministro de energía hacia el producto se realiza cuando la humedad, por efecto del atemperamiento, se ha distribuido hacia las zonas más externas del material.

Diferentes estudios realizados en procesos de secado que involucran esquemas de operación intermitente han concluido que la duración de los periodos de calentamiento y reposo, el número de ciclos de intermitencia, y la temperatura durante el periodo de reposo son determinantes en la influencia del atemperamiento sobre la velocidad de secado y sobre la calidad del producto (Aquerreta et al., 2007; Bains & Langrish, 2007; Bon & Kudra, 2007; Cao et al., 2004; Chou et al., 2000; Chua et al., 2000a; Chua et al., 2000b; Chua et al., 2003; Cihan et al., 2008; Cihan et al., 2007; Do Carmo & De Lima, 2008; Dong et al., 2009; Ho et al., 2001; Ho et al., 2002; Islam et al., 2003; Jumah et

al., 2007; Jumah & Mujumdar, 2005; Nishiyama et al., 2006; Pan et al., 1999a; Pan et al., 1999b; Shei & Chen, 2002; Thakur & Gupta, 2006; Xing et al., 2007).

En virtud de las ventajas que el secado intermitente presenta sobre algunas técnicas donde las condiciones de operación son constantes, Chua et al. (2003) resumieron algunos estudios realizados en esquemas de operación intermitente de diferentes equipos en cuanto a gasto energético y calidad de los productos deshidratados.

A continuación se describen algunas de las referencias bibliográficas más destacadas sobre el estudio del secado intermitente en alimentos, donde se analiza la aplicación de la intermitencia en la mejora de la eficiencia del proceso y la calidad del producto.

Al analizar las condiciones de secado de láminas de calabacín en un secadero vibro-fluidizado, Pan et al. (1999b) establecieron un modelo que describía la cinética de degradación de β -caroteno. El modelo fue empleado para simular y predecir el efecto de las condiciones de operación sobre la calidad del producto. Los resultados obtenidos permitieron concluir que el secado intermitente redujo el tiempo de secado en un 40 % en comparación con el secado continuo. Al comparar ambos esquemas de operación, en el secado intermitente se preservó el 87.2 % del β -caroteno de las muestras de calabacín, mientras que en el secado continuo se preservó el 61.5 %. Experimentos similares a los mencionados anteriormente fueron llevado a cabo en muestras de zanahoria por Pan et al. (1999a), en los cuales el producto mostró una capacidad de rehidratación mayor en el secado intermitente que en el secado continuo. En este estudio, Pan et al. (1999a) atribuyeron el mejoramiento en la calidad del producto a la redistribución de humedad lograda durante el atemperamiento. La aplicación de la intermitencia permitió una disminución de la

temperatura del material, con el consiguiente mejoramiento de la calidad del producto seco, y la reducción del consumo energético.

En la simulación del proceso de secado de un material poroso, Chou et al. (2000) obtuvieron menores temperaturas superficiales en el producto y tiempos de proceso más cortos usando un esquema de secado intermitente, en comparación con el esquema de secado donde el suministro de aire caliente era continuo. Según resultados simulados, para una reducción del 23 % de la humedad del producto (b.h.), se obtuvieron disminuciones en el tiempo de calentamiento entre el 25 y el 65 % dependiendo del esquema de intermitencia utilizado.

A partir de resultados experimentales, Chua et al. (2000a; 2000b) han mostrado algunos beneficios de la aplicación de la variación de temperatura en la mejora la calidad de los productos deshidratados. Chua et al. (2000a) mostraron que la aplicación de una variación cíclica en la temperatura de secado mejoró el contenido de ácido ascórbico de muestras de guayaba por encima del 20 % en comparación con el secado a temperatura constante. En el mismo sentido, los resultados de Chua et al. (2000b) demostraron que la variación cíclica de la temperatura durante el proceso puede reducir en un 87, 75 y 67 % el cambio de color en muestras de patata, guayaba y plátano, respectivamente.

Ho et al. (2001) estudiaron el secado de patata en un equipo con bomba de calor. Mediante la simulación y optimización del proceso, los autores lograron determinar diferentes condiciones en el esquema de intermitencia (temperatura y duración de los periodos de calentamiento y reposo) que disminuyen la degradación de ácido ascórbico, el pardeamiento enzimático y el consumo energético. Del mismo modo, los resultados obtenidos por Ho et al. (2002), al estudiar el efecto de la variación cíclica de la temperatura del aire sobre la calidad del producto en el secado de patata, ilustran la importancia de la

aplicación del atemperamiento para reducir la temperatura superficial y minimizar la pérdida de ácido ascórbico y el cambio de color debido al pardeamiento no enzimático.

Según resultados obtenidos por Nishiyama et al. (2006) en el estudio del efecto de la temperatura de reposo en el secado intermitente de trigo y arroz, la aplicación del atemperamiento permite la difusión de humedad desde el interior hacia la superficie de los granos y como consecuencia mejora la velocidad de secado. La temperatura del reposo tiene un efecto significativo sobre la velocidad de redistribución de la humedad interna y, por lo tanto, sobre la duración del atemperamiento.

Thakur & Gupta (2006) estudiaron los efectos del atemperamiento al aplicar un período de reposo al secado de arroz Paddy. Los resultados indicaron que durante el periodo de reposo el grano aún pierde humedad como un efecto de la temperatura residual, y que la humedad se distribuye más uniformemente dentro de los granos. Además, que la velocidad de secado se incrementa después del periodo de reposo y durante el segundo periodo de secado. Concluyeron que el secado intermitente mejoró la velocidad de secado, la eficiencia energética del secadero, el rendimiento de arroz pilado y el porcentaje de grano partido en comparación con el secado continuo.

Aquerreta et al. (2007) analizaron el efecto del número de ciclos y la temperatura de atemperamiento sobre la fisura y el rendimiento de arroz pilado en el secado de arroz Paddy. Los resultados mostraron que el secado posterior al atemperamiento a una temperatura de 60 °C redujo el tiempo de secado por encima del 38 %, para una reducción de seis puntos porcentuales de humedad. El porcentaje de granos con fisuras fue drásticamente reducido cuando el secado fue desarrollado en tres y dos ciclos en comparación con el realizado a un solo ciclo. El atemperamiento a alta temperatura redujo el porcentaje de granos con

fisuras y mejoró el rendimiento de arroz pilado independientemente del número de ciclos. Aquerreta et al. (2007) concluyeron que el número de ciclos y la temperatura de atemperamiento afectan la calidad del arroz Paddy, además que la temperatura de atemperamiento tiene un efecto más notorio, y una alta temperatura de atemperamiento reduce el número de granos con fisuras y mejora el rendimiento de arroz pilado, independientemente del número de ciclos. Del mismo modo, los estudios realizados por Cnossen et al. (2003), Dong et al. (2009), Madamba & Yabes (2005), Schluterman & Siebenmorgen (2007) y Shei & Chen (2002) han permitido concluir que la aplicación del atemperamiento disminuye el porcentaje de granos defectuosos y hace más eficiente el secado de arroz.

Cao et al. (2004), al estudiar la influencia de la temperatura de reposo en el secado de setas “Maitake” en un secadero de laboratorio a temperatura y humedad relativa controladas, concluyeron que a mayor temperatura de reposo (50 °C) el efecto del atemperamiento es más significativo. Esto se debe al aumento de la movilidad del agua con la temperatura. Este efecto permite una reducción de los gradientes de humedad durante el atemperamiento y el aumento de la velocidad de secado después del mismo.

En el estudio del secado intermitente de maíz en un secadero rotatorio de lecho fluidizado a chorro, Bon & Kudra (2007) consiguieron disminuir tanto la entalpía promedio del producto como el consumo de energía, al optimizar, vía modelización y simulación, la duración de los periodos de calentamiento y reposo, y las temperaturas de los periodos de calentamiento.

Tras investigaciones experimentales desarrolladas sobre la cinética de secado de la torta de almazara, subproducto retenido del prensado de las olivas, en un secadero de bandejas usando esquemas de calentamiento constante e intermitente, Jumah et al. (2007) obtuvieron

mayores tasas de remoción de humedad inicial en cada periodo de secado y una utilización más efectiva de la energía.

Durante el estudio del papel de la transición vítrea en el transporte de humedad durante el secado continuo e intermitente de pasta, Xing et al. (2007) observaron una capa más húmeda cerca a la superficie de las muestras de pasta de los experimentos de secado intermitente, la cual aumenta la velocidad de secado con respecto al secado continuo y previene las roturas.

2.2.3. Modelización y simulación del proceso de secado intermitente

En el análisis de la aplicación de la intermitencia en el secado de alimentos, han suscitado gran interés el uso de la modelización matemática y la simulación computacional. En la mayoría de estudios, incluso en aquellos más recientes, ha prevalecido el uso de modelos empíricos y teóricos (basados en principios físicos) de reducida complejidad, debido a la naturaleza del proceso (altamente no lineal, fuertemente interactivo, multivariante y transitorio) (Jumah & Mujumdar, 2005).

A continuación se comentan algunos de los estudios donde han sido empleados modelos matemáticos para describir el proceso de secado intermitente.

En la modelización de paralelepípedos de patata, Chou et al. (2000) emplearon un modelo que considera el transporte bidimensional de agua, vapor y calor en un material poroso asumiendo propiedades de transporte constantes (permeabilidades del agua y del vapor) y encogimiento despreciable. Este modelo coincide aceptablemente con contenidos de humedad y temperaturas promedio del producto en

experimentos de secado continuo. Ho et al. (2002) emplearon un modelo similar al propuesto por Chou et al. (2000) para predecir las cinéticas de secado y los efectos sobre la calidad en la deshidratación de patata empleando variaciones cíclicas (onda cuadrada) de la temperatura de secado. El modelo muestra una buena correlación con datos experimentales de secado intermitente. Incorporando los modelos cinéticos para degradación de ácido ascórbico y pardeamiento no enzimático, el modelo también demuestra la importancia del atemperamiento en la mejora de la calidad del producto durante el secado convectivo.

En la modelización del secado intermitente de arroz (Cihan et al., 2007; Shei & Chen, 2002; Thakur & Gupta, 2006), trigo (Nishiyama et al., 2006) y torta (Jumah et al., 2007), subproducto de la extracción de aceite de oliva, se han obtenido resultados aceptables que describen el proceso a partir de ecuaciones para secado en capa fina. Estos modelos consideran transporte macroscópico y unidimensional de acuerdo a las características y condiciones de operación de los equipos, y evitan consideraciones acerca de la transferencia de materia y calor en el material (transporte microscópico).

Do Carmo & De Lima (2008) en la simulación de la transferencia de materia en el secado intermitente de lenteja usando el método de volúmenes finitos, emplearon un modelo difusivo bidimensional para partículas de geometría elipsoidal, donde se asumió un coeficiente de difusión constante y condiciones de equilibrio en la superficie.

Jumah & Mujumdar (2005) aplicaron un sistema de inferencia neuro-borroso adaptativo (ANFIS) para la modelización empírica del secado intermitente de granos en un secadero en lecho fluidizado. El sistema ANFIS es una técnica que emplea las metodologías de la lógica borrosa y las redes neuronales para establecer un modelo empírico que representa un conjunto de datos determinado. En unas condiciones de

operación dadas, este tipo de modelo representó adecuadamente el comportamiento periódico y las discontinuidades del proceso de secado intermitente en cuanto a humedad y temperatura promedio, sin embargo, dependió de un gran número de parámetros y no brindó información acerca de la distribución local de humedades y temperaturas.

Baini & Langrish (2007) utilizaron un modelo difusional para representar las cinéticas de secado continuo e intermitente en láminas de plátano, el cual predijo satisfactoriamente la información experimental en ambos modos de operación. La simulación del proceso se realizó a partir de la solución numérica, por elementos finitos, de un modelo difusional que describía la transferencia de materia y calor radial en un sistema de geometría cilíndrica. El modelo consideraba la difusividad efectiva dependiente de la temperatura, las propiedades termofísicas dependientes de la humedad, la resistencia externa a la transferencia de materia y calor, y la variación del volumen del producto en función del contenido de humedad promedio.

En la optimización del secado intermitente de maíz en un secadero rotatorio de lecho fluidizado a chorro, Bon & Kudra (2007) analizaron cuatro criterios de optimización con el propósito de identificar una función objetivo que reflejara adecuadamente la calidad del producto: (1) la minimización de la energía de desorción-evaporación necesaria para secar el producto; (2) la maximización de la relación entre la energía de desorción-evaporación y la energía total intercambiada entre el producto y el aire caliente; (3) la minimización de la relación entre la entalpía máxima del producto y la energía total intercambiada entre el producto y el aire caliente; y (4) la minimización de la variación de la entalpía del producto. A partir de este análisis, identificaron la ganancia entálpica del producto ponderada por la ganancia entálpica máxima como una función objetivo adecuada para estimar y optimizar

el impacto de las condiciones tiempo-temperatura en el proceso de secado intermitente.

Las consideraciones y simplificaciones más comunes en los diferentes estudios sobre secado intermitente incluyen el uso de modelos empíricos o el empleo de soluciones analíticas con coeficientes de transferencia constantes. Aunque, en condiciones particulares, los modelos empíricos pueden describir satisfactoriamente la tendencia de la evolución del contenido de humedad a través del tiempo, y los parámetros de dichos modelos empíricos pueden ser correlacionados en función de la temperatura y velocidad del aire de secado, este tipo de modelos no contribuyen al estudio de los fenómenos de transferencia de materia y calor local (Chen, 2007a). Por su parte, los modelos basados en las soluciones analíticas de las ecuaciones de difusión asumen que la resistencia externa a la transferencia de materia es despreciable y que el proceso es isotérmico, lo cual los hace inapropiados para el estudio de procesos en los cuales las condiciones de secado varían con el tiempo (Chen, 2007a).

En algunos estudios, la validación del modelo fue realizada a condiciones de secado continuo (Chou et al., 2000; Ho et al., 2001), lo cual no garantiza una representación adecuada del proceso en condiciones de intermitencia.

La mayoría de los modelos han sido empleados en el secado de granos y cereales, solo un reducido grupo de los estudios ha sido empleado en el secado de productos hortofrutícolas (Baini & Langrish, 2007; Cao et al., 2004; Chua et al., 2000a; Chua et al., 2000b; Ho et al., 2001; Islam et al., 2003; Pan et al., 1999a; Pan et al., 1999b). Los modelos más completos incluyen el estudio hasta en dos dimensiones espaciales, considerando transferencia de calor, y transferencia de materia en estado líquido y gaseoso (Chou et al., 2000; Ho et al., 2001; Ho et al., 2002). De igual forma de destacan los modelos difusionales

empleados por Bains & Langrish (2007) y Bon & Kudra (2007), donde se considera la resistencia externa a los fenómenos de transferencia de materia y calor, y las propiedades de transporte (difusividad y conductividad térmica) en función de la humedad y la temperatura.

A excepción del estudio realizado por Bains & Langrish (2007), los modelos consultados no consideran el fenómeno de la contracción.

Son pocos los procedimientos de optimización empleados, entre los cuales se destacan la utilización del método de superficies de respuesta (Madamba & Yabes, 2005), la optimización respecto a la degradación de vitaminas y al pardeamiento no enzimático (Ho et al., 2001), y la optimización respecto a la ganancia entálpica del producto (Bon & Kudra, 2007). La mayoría de los estudios, en lugar de utilizar un procedimiento de optimización computacional, realizan la evaluación de un número determinado de condiciones sin identificar los valores óptimos mediante algoritmos matemáticos.

2.3. El mango

2.3.1. Características generales

Según la clasificación taxonómica, la especie *indica* del género *Mangifera*, pertenece a la familia de las *Anacardiaceae*. Esta especie, oriunda de la India, designa a árboles de ramificación simpodial con altura entre 10 y 40 m, de hojas alargadas y brillantes. Sus frutos (Figura 2.5) son drupas cuya forma, tamaño y color varían en función de la variedad (De La Cruz Medina & García, 2003; Kosterman & Bompard, 1993).

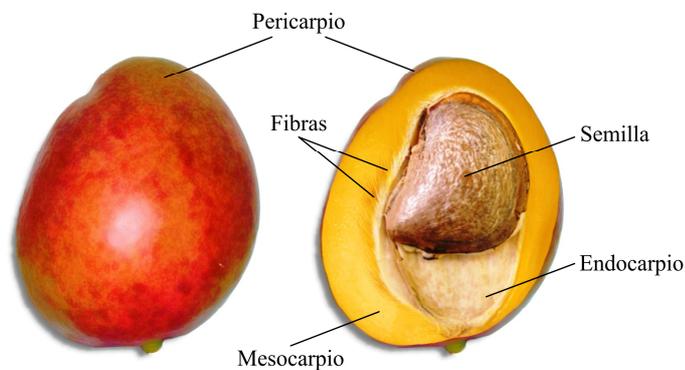


Figura 2.5. Fotografía de la sección transversal de un fruto de mango en la que se indican las distintas partes que componen su estructura.

En general, los frutos de mango (Figura 2.5) presentan formas entre redondeadas y ovoides-oblongas, con longitudes que varían entre los 2.5 y los 30 cm. La parte pigmentada y más externa de la piel de los frutos (pericarpio) puede presentar mezclas de tonalidades verdes, amarillas y rojas. En la parte interna los mangos poseen una semilla o

hueso de consistencia dura y forma aplanada, con orientación en el mismo sentido del eje longitudinal del fruto, recubierta por una película o tejido llamado endocarpio. Entre el pericarpio y el endocarpio se encuentra la pulpa o parte comestible del fruto, denominada mesocarpio, que puede ser de color amarillo o anaranjado. La pulpa constituye la principal parte comestible y es apreciada por su alto contenido en azúcares, minerales, fibra dietaria y vitaminas (Ahmed et al., 2002; Chen et al., 2007; De La Cruz Medina & García, 2003; Pott et al., 2005; Torres, 2007).

2.3.2. Importancia económica

El mango (*Mangifera indica* L.) es un producto agrícola de gran importancia económica para diferentes países en vías de desarrollo. Según estadísticas de la FAO (2009a; 2009b), a nivel mundial ocupa el tercer lugar dentro de las frutas tropicales, registrando, en el año 2007, una producción de 33.4 millones de toneladas, de los cuales 1.13 millones fueron destinados a exportaciones. Su cultivo se extiende dentro de la región tropical a más de 87 países en todos los continentes, ocupando actualmente más de 46 millones de hectáreas.

Según cifras del año 2007, Asia es el principal continente productor con el 75.4 % del total de la producción mundial, seguido por América (15.9 %) y África (8.6 %). Siete países abarcan el 79.3 % de la producción mundial, de los cuales India es el principal productor (40.4 %), seguido por China (11.2 %), Pakistán (6.7 %), México (6.1 %), Tailandia (5.4 %), Indonesia (4.8 %) y Brasil (4.6 %) (FAO, 2009b). Con excepción del suroeste de Asia, Australia y algunos países africanos, los cuales tienen sus propias variedades, la mayoría de los países producen y exportan las variedades desarrolladas en la Florida, tales

como “Haden”, “Tommy Atkins”, “Kent” y “Keitt” (De La Cruz Medina & García, 2003; Galán-Saúco, 2004).

México es el principal país exportador de mango, abasteciendo, en el año 2006, cerca del 20 % del mercado mundial, seguido por Brasil (10.2 %) y Pakistán (9.4 %). Entre los años 2000 y 2007 los mercados de Norteamérica (incluyendo Canadá) y la Unión Europea incrementaron sus importaciones en un 24 % y 79 %, respectivamente (FAO, 2009b).

La cantidad de mango procesado que alcanza el mercado mundial es muy baja comparada con el comercio del fruto en fresco, el cual es preferido por su atractivo olor, sabor y textura (Galán-Saúco, 2004; Maneepun & Yunchalad, 2004). Según cifras del año 2000, la suma de productos procesados a partir de este fruto representaba menos del 0.02 % de la producción total (Galán-Saúco, 2004; Maneepun & Yunchalad, 2004).

Dentro de los productos procesados que más se comercializan se incluyen el puré de mango, procedente de México y Filipinas, principalmente, el mango seco (en forma de cubos, gránulos, pedazos, láminas y polvo), de Tailandia, Filipinas, Taiwán y Malasia, así como productos congelados, glaseados y cristalizados, entre otros, también producidos en estos países. Sudáfrica también exporta diversos productos procesados de mango a Canadá, el lejano y el medio oriente (Galán-Saúco, 2004; Maneepun & Yunchalad, 2004).

2.3.3. Secado de mango

Aunque el mango constituye un producto agrícola de gran importancia económica a nivel mundial, han sido pocos y recientes los estudios que sobre secado de mango se encuentran reportados en la

literatura, y en los cuales se utilizan modelos matemáticos para la representación del proceso. Dentro de estos estudios se destacan los realizados por Goyal et al. (2006), Corso et al. (2008) y Janjai et al. (2008) para la modelización de cinéticas de secado de láminas de mango de las variedades “Dasehari”, “Hilacha” y “Nam Dok Mai”, respectivamente. Aunque estos estudios difieren en ciertas consideraciones del modelo y del diseño experimental, todos ellos hacen uso de la solución analítica de la Ley particular de Fick que describe la difusión de humedad (unidimensional) a través de una lámina infinita (Ec. 2.3.1)(Simal et al., 2005b).

$$\frac{\bar{W} - W_e}{W_0 - W_e} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left(-\frac{D_e(2n+1)^2 \pi^2 t}{4L^2}\right) \quad (2.3.1)$$

En la Ec. (2.3.1) \bar{W} (kg kg⁻¹ b.s.) es el contenido de humedad promedio; W_e (kg kg⁻¹ b.s.) es el contenido de humedad de equilibrio a las condiciones del aire de secado; W_0 (kg kg⁻¹ b.s.) es el contenido de humedad inicial; D_e (m² s⁻¹) es la difusividad efectiva; y $2L$ (m) es el espesor de la lámina.

A continuación se comentan algunas de las características particulares de la metodología empleada por los mencionados autores para la modelización de la cinética de secado en mango.

Goyal et al. (2006) estudiaron el efecto de la temperatura del aire y los pretratamientos en el secado de láminas de mango de la variedad “Dasehari”. Los experimentos fueron llevados a cabo en un secadero de laboratorio tipo túnel a temperaturas de aire caliente de 55, 60 y 65 °C y velocidad constante (no reportada). En las experiencias de secado se utilizaron muestras de mango con y sin pretratamientos. Los pretratamientos utilizados fueron el escaldado en agua y el escaldado en solución de metabisulfito potásico (K₂S₂O₅) al 1 %, ambos realizados a 50 °C por 2 min. Las muestras escaldadas con la solución de K₂S₂O₅

mostraron tiempos de secado más cortos que las demás muestras. El incremento en la temperatura de secado de 55 a 65 °C disminuyó el tiempo del proceso de 210 a 180 min tanto en las muestras control, como en las muestras escaldadas. Diferentes modelos empíricos fueron empleados por Goyal et al. (2006) para representar la cinética del proceso, dentro de los cuales el modelo de Page arrojó el mejor resultado (coeficientes de determinación mayores a 0.99). Para el cálculo de la difusividad efectiva los autores emplearon la Ec. (2.3.1), con el primer término de la serie, y simplificaron la humedad adimensional $(\bar{W} - W_e)/(W_0 - W_e)$ por \bar{W}/W_0 . Los valores de la difusividad efectiva así calculados presentaron mayores valores cuando el proceso se realizó con pretratamientos: para un rango de temperaturas entre 55 y 65 °C, los valores de la difusividad efectiva de la muestras control, escaldadas y escaldadas con solución de $K_2S_2O_5$ estuvieron entre 2.62×10^{-10} y $3.19 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, 2.73×10^{-10} y $3.33 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, 3.23×10^{-10} y $4.39 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente.

Corso et. al (2008) emplearon la Ec. (2.3.1), con los tres primeros términos de la serie, en la determinación de la difusividad efectiva en láminas de mango de la variedad "Hilacha". En las experiencias de secado fueron empleados frutos de mango en dos diferentes grados de madurez (verde y medio-maduro). La determinación de la madurez fue realizada por evaluación sensorial de la textura y el color de la piel de los frutos. Los datos experimentales de la cinética del proceso fueron obtenidos a partir del secado de muestras de 3 mm de espesor en un secadero de laboratorio a temperaturas de aire de 50, 60, 70 y 80 °C y una velocidad de aire de $\sim 2 \text{ m s}^{-1}$. La difusividad efectiva fue calculada para cada una de las temperaturas y grados de madurez, presentando valores entre 1.74×10^{-10} y $3.15 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, y entre 2.3×10^{-10} y $3.28 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para las muestras de mango verde y medio-maduro, respectivamente. En la determinación de las difusividades efectivas se

obtuvieron coeficientes de determinación entre 0.92 y 0.97. Los valores de difusividad efectiva fueron posteriormente ajustados a una ecuación tipo Arrhenius. De este modo, la dependencia de la difusividad efectiva con la temperatura fue descrita mediante las ecuaciones $D_e = 1.68 \times 10^{-8} \exp[-1.37/(T + 273)]$ y $D_e = 6.19 \times 10^{-9} \exp[-1.05/(T + 273)]$ para muestras de mango verde y medio-maduro, respectivamente.

Janjai et al. (2008) utilizaron la Ec. (2.3.1) para la determinación de la difusividad efectiva en el secado de láminas de mango de la variedad "Nam Dok Mai". Los experimentos fueron realizados en un secadero convectivo de laboratorio a temperaturas de aire de 50, 60, 70 y 80 °C y una velocidad de aire de 0.2 m s⁻¹, empleando láminas de mango de 10 mm de espesor. Los valores de difusividad efectiva calculados para las diferentes temperaturas fueron ajustados a una ecuación tipo Arrhenius para representar la dependencia de esta propiedad con la temperatura: $D_e = 3 \times 10^{-10} \exp[-0.249/(T + 273)]$. El ajuste presentó un coeficiente de determinación de 0.95. La ecuación de la difusividad efectiva fue posteriormente utilizada en un modelo, formulado a partir de la Ley particular de Fick, que representa el transporte bidimensional de humedad en un sistema de geometría irregular. El modelo también consideraba el encogimiento del material y la resistencia externa a la transferencia de materia. Los autores obtuvieron resultados aceptables en la predicción de la evolución del contenido de humedad promedio a partir de la resolución numérica del modelo por el método de elementos finitos. Sin embargo, la utilización de la ecuación de la difusividad efectiva es cuestionable ya que las consideraciones para su determinación difieren de las utilizadas en el modelo. La determinación de la difusividad efectiva se realizó a partir de la Ec. (2.3.1), la cual describe el transporte de humedad unidimensional a través de una lámina infinita, considerando despreciables tanto la resistencia externa

a la transferencia de materia como la influencia del encogimiento sobre los fenómenos de transferencia.

2.4. Consideraciones finales

A partir de la revisión bibliográfica realizada se pueden extraer algunas consideraciones:

- El secado convectivo por aire caliente es una operación esencial en diferentes industrias para la obtención de productos con unas características particulares que favorecen su utilización en otros procesos, su manipulación, preservación, almacenamiento y transporte.
- La eficiencia del proceso, la calidad de los productos deshidratados y las consideraciones ambientales forman parte de los aspectos más importantes a considerar en el diseño y aplicación de los procesos de secado.
- El secado es una de las operaciones que demanda más energía, razón por la cual muchas investigaciones recientes han sido enfocadas al estudio de técnicas que mejoren la eficiencia de los equipos y procesos de secado, de tal forma que sean más económicos y menos perjudiciales para el medio ambiente.
- El secado convectivo presenta actualmente algunas limitaciones, entre las que se encuentran principalmente la baja velocidad del proceso y la pérdida de calidad del producto durante el secado.
- El secado intermitente es una tecnología de secado empleada con el fin de preservar la calidad y minimizar el consumo energético en el secado de materiales sensibles al calor y donde la cinética está controlada por fenómenos de transferencia internos.
- En el secado intermitente por suministro periódico de energía térmica, la aplicación de periodos de atemperamiento reduce el tiempo de calentamiento necesario para alcanzar un contenido de

humedad deseado, disminuyendo los requerimientos de energía y el tiempo de exposición del producto al efecto de la temperatura en comparación con procesos donde el suministro de calor es continuo.

- Según diversos estudios realizados en procesos de secado intermitente, la duración de los periodos de calentamiento y reposo, el número de ciclos de intermitencia, y la temperatura durante el periodo de reposo son determinantes en la influencia del atemperamiento sobre la velocidad de secado y sobre la calidad del producto.
- La modelización, simulación y optimización del proceso de secado, junto con la experimentación a escala de laboratorio y plantas piloto, son necesarias para estudiar en profundidad el proceso, así como para el desarrollo de nuevos equipos y aplicaciones, y la mejora de los existentes.
- Las consideraciones y simplificaciones más comunes en los diferentes estudios sobre secado intermitente incluyen el uso de modelos empíricos o el empleo de soluciones analíticas de las ecuaciones de difusión con coeficientes de transferencia constantes.
- Aunque los modelos empíricos pueden describir satisfactoriamente la tendencia de la evolución del contenido de humedad a través del tiempo, este tipo de modelos no contribuyen al estudio de los fenómenos de transferencia de materia y calor local.
- Los modelos basados en las soluciones analíticas de las ecuaciones de difusión son inapropiados para el estudio de procesos en los cuales las condiciones de secado varían con el tiempo.

-
- Existen diferentes teorías que intentan explicar el movimiento del agua en el interior del sólido. Entre ellas, la teoría difusional es la más frecuentemente utilizada para la modelización teórica del proceso de secado, con buenos resultados en diferentes productos y procesos. Con las consideraciones adecuadas, los modelos difusionales pueden describir el secado intermitente a partir de los fenómenos de transferencia de materia y calor que gobiernan el proceso.
 - El conocimiento de las propiedades físicas es necesario para el desarrollo y solución de modelos matemáticos fundamentados en los principios físicos que gobiernan el proceso de secado.
 - En la mayoría de los estudios sobre secado intermitente se realiza la evaluación de un número determinado de condiciones sin identificar los valores óptimos mediante algoritmos matemáticos. Resulta interesante la utilización de procedimientos de optimización computacional que permitan establecer condiciones de operación adecuadas para la mejora de la eficiencia del proceso y la calidad del producto.
 - Son pocos los estudios de la aplicación de procesos de secado intermitente al secado de productos hortofrutícolas que, como en el caso del mango, sean comercialmente importantes por lo que se considera interesante profundizar más en ellos.
 - El mango es una fruta tropical de gran importancia económica a nivel mundial según niveles de producción y comercialización. El incremento de las importaciones de mango en dos de los mercados más grandes (Norteamérica y la Unión Europea) y la aceptación que tienen su valor nutricional y sus características exóticas motivan a estudiar los productos elaborados a partir de su procesamiento, como es el caso del mango deshidratado.

3. OBJETO Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

3. OBJETO Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

A partir de la revisión bibliográfica se ha observado que el estudio de las tecnologías de secado se orienta al ahorro energético y a la obtención de productos de calidad. Dentro las tecnologías empleadas con estos propósitos, el secado intermitente aparece como una alternativa por lo que su análisis resulta de gran interés.

El proceso de secado intermitente, tal como sucede con otras tecnologías aplicadas al procesamiento de productos agroalimentarios, debe ser analizado con el propósito de determinar las mejores condiciones de operación, respecto a las características particulares del producto y del proceso, que permitan alcanzar las ventajas que ofrece en cuanto a eficiencia energética y mejoramiento de la calidad. En tal sentido, es preciso establecer condiciones óptimas en el esquema de intermitencia, tales como la duración de los periodos de calentamiento y reposo que aseguren una reducción del efecto tiempo-temperatura sobre la calidad del producto, y una duración del atemperamiento donde la difusión de agua hacia la superficie, y la reducción de los gradientes de humedad al interior del sólido, aumenten la velocidad de secado en los periodos de calentamiento posteriores. Ya que tales condiciones están ligadas a la distribución de la humedad y la temperatura en el material durante el procesamiento, la modelización y simulación del proceso a partir de los fenómenos físicos que lo gobiernan se convierte en una alternativa viable para el estudio y optimización del proceso y, en particular, para el estudio de la aplicación de la intermitencia.

El principal objetivo de este trabajo fue estudiar y optimizar el secado intermitente y en particular su aplicación al secado de mango (*Mangifera indica* L. var. Tommy Atkins), con el fin de mejorar la

eficiencia energética del proceso mediante el suministro periódico de energía térmica.

Para el logro de este objetivo principal se plantearon los siguientes objetivos particulares:

- Desarrollar y validar experimentalmente un modelo matemático que represente adecuadamente la cinética de secado de mango en procesos donde el suministro de energía térmica es continuo e intermitente.
- Establecer y validar experimentalmente ecuaciones para la estimación de la conductividad térmica, el calor específico y las isothermas de sorción del mango, que permitan completar la formulación del modelo del proceso.
- Formular una función objetivo, utilizando como criterio la ganancia entálpica del producto, para minimizar el tiempo de calentamiento del proceso y, por tanto, el efecto de las condiciones tiempo-temperatura sobre la calidad del producto.
- Optimizar la duración de los periodos de calentamiento y reposo en procesos de secado intermitente a diferentes condiciones de operación, a partir del modelo matemático y de la función objetivo propuestos.
- Evaluar el efecto de las condiciones de calentamiento y reposo sobre la cinética del proceso de secado intermitente de mango.
- Evaluar la influencia de la duración de los periodos de calentamiento y reposo, el número de ciclos de intermitencia, la velocidad y la temperatura del aire de secado sobre la cinética del proceso de secado intermitente de mango.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio y optimización del secado intermitente, con el fin de mejorar la eficiencia energética del proceso, requiere el desarrollo previo y la validación de un modelo matemático que represente adecuadamente los fenómenos de transferencia de materia y calor involucrados, así como la formulación de una función objetivo que permita evaluar tanto la eficiencia energética del proceso como la calidad del producto. Para el desarrollo y validación del modelo es necesaria la obtención de información experimental de las propiedades y variables de interés, junto con el desarrollo de algoritmos específicos para su resolución. Para optimizar la aplicación del secado intermitente se requiere formular y resolver el problema de optimización correspondiente de acuerdo a los objetivos perseguidos.

El estudio fue desarrollado en una de las variedades más comerciales de mango (*Mangifera indica* L. var. Tommy Atkins), un producto agrícola de gran importancia económica a nivel mundial. Igualmente, porque los productos procesados a partir de esta fruta tropical, además de ser una alternativa para el aprovechamiento de los excedentes de producción y para la diversificación de la oferta de productos con valor agregado, han mostrado gran aceptabilidad en el mercado por sus propiedades nutricionales y características exóticas. Además, la metodología desarrollada puede servir de prototipo para el estudio de diversas consideraciones respecto a los fenómenos físicos involucrados en el secado intermitente de diferentes productos agroalimentarios.

4.1. Experiencias de secado

Con el objeto de representar matemáticamente los procesos de secado continuo e intermitente, es necesaria la formulación, identificación paramétrica y validación de un modelo a partir de datos experimentales de las cinéticas de secado. La información experimental relacionada con estas cinéticas debe incluir toda la información requerida para la resolución del modelo del proceso, dentro de la cual son particularmente importantes las condiciones del aire de secado y la evolución de la humedad y la temperatura en el producto durante el procesamiento. Asimismo, las experiencias deben abarcar un rango de condiciones de operación suficientemente amplio para permitir la identificación de parámetros del modelo que, además de ser válidos en ese intervalo, hagan posible el uso del modelo en diferentes circunstancias dentro de ese rango de condiciones.

4.1.1. Descripción de los esquemas de operación

Para la realización de las experiencias de secado se consideraron dos esquemas de operación (Fig. 4.1): experiencias donde el suministro de energía térmica es continuo y experiencias donde el suministro de energía térmica es intermitente.

En los esquemas de operación, el proceso donde el suministro de energía térmica desde el aire se realiza de forma ininterrumpida fue denominado *secado continuo* (Fig. 4.1). Este hace referencia al secado que se desarrolla de forma convencional haciendo fluir aire caliente sobre el producto a una velocidad (v_{∞} , m s⁻¹) y una temperatura (T_H , °C) constantes durante el proceso de secado.

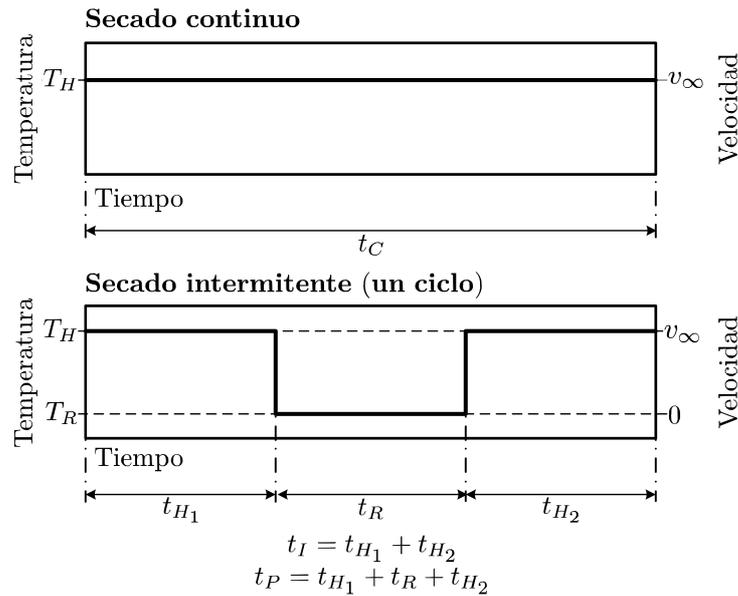


Figura 4.1. Esquema de las condiciones del aire empleadas en las experiencias de secado continuo e intermitente. T_H ($^{\circ}\text{C}$) y v_{∞} (m s^{-1}) son la temperatura y la velocidad del aire durante el secado continuo y durante los periodos de calentamiento del secado intermitente, respectivamente; T_R ($^{\circ}\text{C}$) es la temperatura del aire en los periodos de reposo; t_H y t_R (s) son los tiempos de duración de los periodos de calentamiento y reposo, respectivamente; t_C (s) es el tiempo total del proceso de secado continuo; t_I y t_P (s) son el tiempo de calentamiento efectivo y el tiempo total del proceso de secado intermitente, respectivamente.

Por otro lado, se ha considerado *secado intermitente* al proceso donde el suministro de energía térmica es controlado por periodos consecutivos de calentamiento y reposo (Fig. 4.1). Dos periodos de calentamiento separados por uno de reposo definen un *ciclo de intermitencia*. Al igual que en el secado continuo, durante los periodos de calentamiento (t_{H1} y t_{H2}) el aire fluye continuamente sobre el producto a una velocidad (v_{∞} , m s^{-1}) y una temperatura (T_H , $^{\circ}\text{C}$)

constantes. En cambio, durante los periodos de reposo (t_R) el aire no es forzado a circular sobre el producto y se encuentra a una determinada temperatura (T_R , °C). El valor de la misma (T_R) corresponde a la temperatura de la cámara de secado, la cual tiende rápidamente a la temperatura ambiente a medida que transcurre el atemperamiento. El tiempo de calentamiento efectivo (t_I) está determinado por suma de la duración de los periodos de calentamiento. El tiempo total del proceso de secado intermitente (t_P) está determinado por la suma de la duración de los periodos de calentamiento y reposo.

4.1.2. Descripción del sistema de secado

Para la realización de las experiencias de secado fue empleado un secadero convectivo a escala de laboratorio con control automático de la temperatura y velocidad del aire. El equipo se esquematiza en la Figura 4.2 y consta de las siguientes partes (Fernández-Vidal, 2007; García-Pérez, 2007):

4.1.2.1. Sistema de ventilación

El sistema de ventilación está compuesto por un soplante centrífugo de media presión (Fig. 4.2-2) (COT-100, Soler & Palau, Barcelona, España), que impulsa el aire de secado, a través de las resistencias de calefacción, hacia la cámara de secado. La velocidad del aire impulsado es controlada por medio de un ordenador (Fig. 4.2-12) que actúa sobre un variador de frecuencia (Inverter DV-551, Panasonic, EEUU). La velocidad del aire es medida mediante un anemómetro de rueda alada (Fig. 4.2-4) (Wilh, Lambrecht GmbH, Göttingen, Alemania), con una precisión de $\pm 0.1 \text{ m s}^{-1}$, el cual se encuentra conectado a un instrumento indicador/convertidor

(TTM-104, Red Lion, Cork, PA, EEUU) que digitaliza el valor de la velocidad del aire.

4.1.2.2. Sistema de calefacción

El sistema de calefacción está constituido por resistencias en espiral para el calentamiento del aire de secado (Fig. 4.2-5), que presentan una potencia total de 3000 W a 220 V. Un sensor PT 100 está conectado con un instrumento indicador/convertidor (TM-109, Toho Electronics Inc., Kanagawa, Japón) utilizado para digitalizar el valor de la temperatura del aire. El sistema calefactor está controlado por el ordenador que actúa sobre un variador de intensidad (80 A, Nixa, Valencia, España).

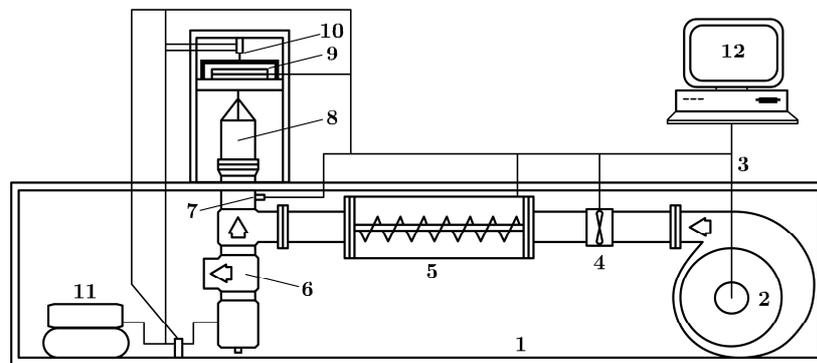


Figura 4.2. Esquema del secadero convectivo a escala de laboratorio empleado en las experiencias de secado. 1. Soporte; 2. Soplante; 3. Control de flujo; 4. Anemómetro; 5. Resistencia calefactora; 6. Válvula neumática; 7. Sensor de temperatura (PT-100); 8. Cámara de secado con portamuestras; 9. Balanza de pesada rápida; 10. Elevador; 11. Compresor de aire; 12. Ordenador de adquisición de datos y control.

4.1.2.3. Cámara de secado y sistema de pesada

La cámara de secado (Fig. 4.2-8) está constituida por un cilindro portamuestras, donde se coloca el material a secar (Figura A1.1, Anexo 1). El portamuestras es pesado de forma periódica mediante una balanza (Fig. 4.2-9) (PM4000, Mettler Toledo, Greifensee, Suiza) conectada al ordenador. Al comienzo de la experiencia de secado la balanza se tara de forma automática, y durante el procesamiento se registra la evolución del peso de las muestras con el tiempo. En cada pesada, y para mantener la estabilidad de la balanza, una válvula neumática de tres vías (Fig. 4.2-6) desvía momentáneamente la salida del aire. Durante el secado intermitente, el aire también es desviado a través de la válvula para establecer las condiciones de reposo en la cámara de secado, evitando perturbaciones en el desarrollo del proceso.

4.1.2.4. Sistema de medición de condiciones ambientales

La temperatura y humedad relativa ambiental fueron registradas utilizando un sensor (TG 120, Galltec, Bondorf, Alemania) conectado a dos instrumentos indicadores/convertidores (TM-109, Toho Electronics Inc., Kanagawa, Japón).

4.1.2.5. Sistema de control y adquisición de datos

El control del secadero se realizó mediante una aplicación informática desarrollada en Microsoft Visual Basic. El programa permite operar el equipo para realizar tanto experiencias de secado continuo como experiencias de secado intermitente de un solo ciclo (calentamiento–reposo–calentamiento). El programa permite seleccionar los valores de consigna de las variables de secado (temperatura y velocidad del aire), el intervalo de tiempo entre pesadas y los criterios de finalización de la operación o de cada periodo (tiempo transcurrido o porcentaje de peso perdido). Además, el programa genera un archivo de

datos con toda la información relativa al proceso de secado, es decir, la evolución del peso de las muestras, la temperatura y velocidad del aire de secado, y la temperatura y humedad relativa ambiental. El ordenador está conectado al cuadro de control del secadero y a los distintos instrumentos indicadores/convertidores mediante una tarjeta de adquisición de datos (PCL-812PG, UCS, Wolverhampton, Reino Unido). A través de un puerto RS232 el ordenador se comunica con la balanza. El programa compara los valores instantáneos de temperatura y velocidad del aire de secado con los valores de consigna, y en función de la diferencia entre ambos, envía, utilizando un algoritmo de control PID, una señal a los actuadores del control (variador de frecuencia y variador de potencia).

4.1.2.6. Sistema de medición de temperaturas en la muestra

Un registrador/indicador de temperaturas portable (Diligence EV N2014 Thermocouple data logger, Comark Limited, Hertfordshire, Reino Unido) fue acoplado a la cámara de secado para el registro, a intervalos predefinidos, de las temperaturas en el centro y en la superficie de las muestras durante el procesamiento (Figura A1.1, Anexo 1). El dispositivo dispone de tres canales externos donde pueden ser conectados termopares tipo K-PK31, además de una interfaz USB y de un programa informático para transferir los datos registrados al ordenador.

4.1.3. Materia prima

En las experiencias de secado fueron empleados frutos frescos y maduros de mango (*M. indica* L.) de la variedad "Tommy Atkins" procedentes de Brasil, los cuales fueron adquiridos en un mercado local de la ciudad de Valencia (España). Los frutos, empacados por

parejas en bandejas de plástico y cubiertos por bolsas de polietileno perforadas, fueron almacenados a condiciones ambientales hasta la preparación de las muestras.

Con el fin de seleccionar los frutos en un grado de madurez similar, se determinó la acidez titulable y el contenido de sólidos solubles de la pulpa según los métodos oficiales 942.12 y 932.14C de la AOAC (1997). En los mangos seleccionados también se determinó el contenido de humedad inicial de acuerdo al método oficial 934.06 de la AOAC (1997). Todas las determinaciones se realizaron por triplicado.

4.1.4. Preparación de las muestras

De los frutos maduros seleccionados, se prepararon cubos de 25 mm de lado (Fig. 4.3). Se estableció el valor del lado como el máximo posible respecto al espesor de los trozos de pulpa, con el propósito de garantizar una amplia distribución del contenido de humedad y de la temperatura en el cubo durante el procesamiento. Se descartaron como mínimo 5 mm de la pulpa más cercana al hueso y a la piel (donde hay mayor variación en el contenido de fibras y sólidos solubles) para reducir la heterogeneidad del material.

Los cubos fueron obtenidos utilizando un cuchillo y una guía de corte graduable provista de un hilo de acero inoxidable y una base en ángulo recto. Una vez cortados, los cubos fueron envueltos en film plástico y almacenados en recipientes herméticos a condiciones de refrigeración (~4 °C) hasta su procesamiento. El tiempo entre el corte de las muestras y el inicio de las experiencias de secado nunca superó las 8 horas.

A pesar de ser una geometría que requiere el estudio de los fenómenos de transferencia en tres dimensiones, el cubo fue

seleccionado como mejor alternativa para la preparación de las muestras tras descartar geometrías más simples como la lámina y el cilindro. La lámina se consideró inviable por la necesidad de un espesor lo suficientemente grande que garantizara la distribución de humedades y temperaturas durante el secado y permitiera la medición de la temperatura empleando los sensores disponibles. Por otra parte, al ejercer presión con un sacabocados, la presencia y orientación de fibras en la pulpa de mango maduro dificultó la correcta obtención de muestras cilíndricas al alterar considerablemente la estructura física y la humedad inicial del material.

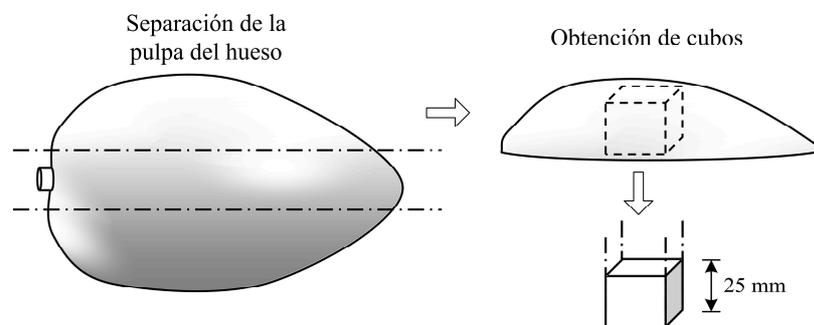


Figura 4.3. Preparación de las muestras para las experiencias de secado. Obtención de cubos a partir de los trozos de pulpa adyacentes al hueso de los frutos de mango.

4.1.5. Cinéticas de secado

Las muestras cúbicas, previamente atemperadas en torno a los 12 °C, fueron secadas mediante procesos continuos e intermitentes (de un ciclo) a diferentes temperaturas de calentamiento (45, 50, 55, 60 y 65 °C) y velocidades de aire de 2, 3 y 4 m s⁻¹ (velocidad medida a temperatura ambiente).

En la Tabla 4.1 se resumen las condiciones experimentales utilizadas en las diferentes experiencias de secado. Las experiencias se realizaron al menos por duplicado para cada una de las distintas condiciones experimentales. En todos los experimentos, el proceso finalizó cuando se alcanzó una pérdida de peso mayor o igual al 80 %.

Tabla 4.1. Resumen de las condiciones experimentales aplicadas en las experiencias de secado continuo e intermitente.

Materia prima
Cubos de mango (<i>M. indica</i> L. var. Tommy Atkins) Peso inicial*: 14.9 ± 1 g Lado*: 25 ± 1.2 mm Contenido de humedad inicial*: 9.3 ± 2.2 kg kg ⁻¹ (b.s.) Contenido de humedad final*: 0.36 ± 0.14 kg kg ⁻¹ (b.s.) Temperatura inicial*: 10.8 ± 1.8 °C
Condiciones del aire
Temperatura: Durante el calentamiento: 45, 50, 55, 60 y 65 °C Durante el reposo*: 27.1 ± 1.6 °C (a temperatura ambiente) Humedad relativa*: 0.6 ± 0.07 (a temperatura ambiente) Velocidad: Durante el calentamiento: 2, 3 y 4 m s ⁻¹ (a temperatura ambiente) Durante el reposo: 0 m s ⁻¹
Esquemas de operación
Secado continuo Secado intermitente (un ciclo)

* Valores promedio y desviación estándar para todos los ensayos

Se realizaron un total de 26 experiencias de secado continuo e intermitente, las cuales fueron clasificadas en siete grupos, tal como se muestra en la Tabla 4.2. El grupo 1 correspondiente a experiencias de secado continuo a una velocidad de 4 m s⁻¹; los grupos 2 al 4 a

experiencias de secado intermitente a 4 m s^{-1} ; el grupo 5 a experiencias de secado intermitente a 3 m s^{-1} ; y el grupo 7 a experiencias de secado intermitente a 2 m s^{-1} .

Tabla 4.2. Criterios de finalización de las experiencias de secado continuo e intermitente

Grupo	Secado	v_{∞} (m s^{-1})	T_H ($^{\circ}\text{C}$)	Duración del proceso
1	Continuo	4	45	t_C hasta $PP \geq 80 \%$
			50	
			55	
			60	
			65	
2	Intermitente	4	45	t_{H_1} hasta $PP \geq 70 \%$; $t_R = 4 \text{ h}$; t_{H_2} hasta $PP \geq 80 \%$
			50	
			55	
			60	
			65	
3	Intermitente	4	45	t_{H_1} hasta $PP \geq 50 \%$; $t_R = 3 \text{ h}$; t_{H_2} hasta $PP \geq 80 \%$
			50	
			55	
			60	
			65	
4	Intermitente	4	45	$t_{H_1} = 3 \text{ h}$; $t_R = 3 \text{ h}$; t_{H_2} hasta $PP \geq 80 \%$
			50	
			55	
			60	
			65	
5	Intermitente	3	50	$t_{H_1} = 4 \text{ h}$; $t_R = 3 \text{ h}$; t_{H_2} hasta $PP \geq 80 \%$
			60	$t_{H_1} = 3 \text{ h}$; $t_R = 2 \text{ h}$; t_{H_2} hasta $PP \geq 80 \%$
			70	$t_{H_1} = 4 \text{ h}$; $t_R = 1 \text{ h}$; t_{H_2} hasta $PP \geq 80 \%$
6	Intermitente	2	50	$t_{H_1} = 5 \text{ h}$; $t_R = 3 \text{ h}$; t_{H_2} hasta $PP \geq 80 \%$
			60	$t_{H_1} = 4 \text{ h}$; $t_R = 2 \text{ h}$; t_{H_2} hasta $PP \geq 80 \%$
			70	$t_{H_1} = 5 \text{ h}$; $t_R = 1 \text{ h}$; t_{H_2} hasta $PP \geq 80 \%$

T_H y v_{∞} son la temperatura y la velocidad del aire durante el secado continuo y durante los periodos de calentamiento del secado intermitente, respectivamente; t_C es el tiempo total del proceso de secado continuo; t_{H_1} , t_R y t_{H_2} son los tiempos de duración del primer periodo de calentamiento, del periodo de reposo y del segundo periodo de calentamiento en el proceso de secado intermitente, respectivamente; y PP (%) es la variación del peso.

En cuanto a las temperaturas de calentamiento, los grupos 1 al 4 incluyeron experiencias a 45, 50, 55, 60 y 65 °C (cinco experiencias por grupo); mientras que en los grupos 5 y 6 los ensayos se realizaron a 50, 60 y 70 °C (tres experiencias por grupo). Todas las experiencias de secado intermitente se realizaron a diferentes tiempos de calentamiento y reposo.

La variación en los tiempos de calentamiento y reposo permite obtener información experimental relacionada con la distribución de la humedad en la muestra y el efecto del atemperamiento en diferentes momentos del proceso. Tal variación en la información experimental es esencial para el desarrollo de un modelo matemático que represente adecuadamente el proceso y, en especial, el esquema de intermitencia. En los grupos 2 y 3 (Tabla 4.2) el primer periodo de calentamiento finalizó (t_{H1}) cuando la muestra alcanzó una pérdida de peso (PP) mayor o igual al 70 y 50 %, respectivamente, y el periodo de reposo finalizó (t_R) cuando transcurrieron 4 y 3 h, respectivamente. En el grupo 4 la duración del primer periodo de calentamiento y del periodo reposo fue de 3 h cada uno, mientras que en los grupos 5 y 6 la duración de cada uno de los periodos fue variable para cada temperatura de calentamiento. Implementar un criterio de finalización por pérdida de peso en los periodos de calentamiento de los grupos 2 y 3 hace que la duración de los periodos sea diferente en cada ensayo, ya que alcanzar una determinada pérdida de peso en un determinado instante del proceso depende, además de la temperatura de calentamiento, del contenido de humedad inicial de la muestra, el cual puede variar en función de cada fruto (Tabla 4.1).

Durante las experiencias de secado continuo e intermitente fue registrada la evolución del peso y de la temperatura de las muestras, además de las condiciones de operación. Para realizar la pesada se desviaba el aire con el fin de estabilizar la balanza. La operación de

pesada duraba aproximadamente 16 s. El peso de la muestra, junto con la velocidad y temperatura del aire de secado, y la humedad y temperatura del aire ambiente, fueron medidos automáticamente cada 2 min a través del sistema de adquisición de datos del secadero (apartado 4.1.2.5). A partir de la humedad inicial, el peso inicial y la variación del peso, fue determinado el contenido de humedad promedio de las muestras.

Durante cada una de las experiencias, también fueron registradas las temperaturas en el centro y en la superficie de la muestra (cubo), junto con la temperatura del aire cercano a la misma, mediante el dispositivo descrito en el apartado 4.1.2.6 (Figura 4.4).

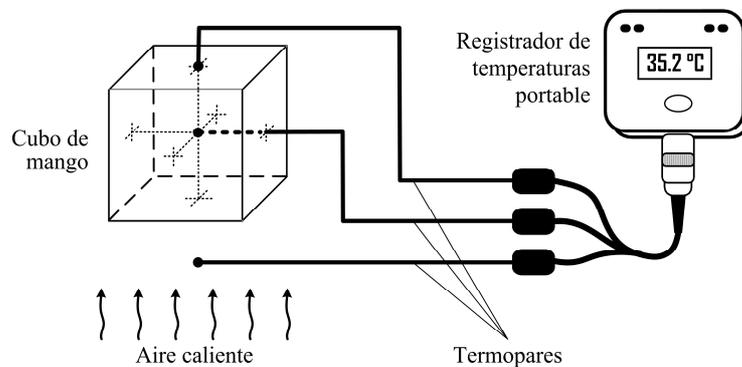


Figura 4.4. Esquema de la medición de temperaturas en el centro y superficie de la muestra.

Ya que la temperatura fue medida cada 25 s e independientemente del sistema de adquisición de datos del secadero, fue preciso eliminar las mediciones realizadas durante las pesadas e interpolar los datos a los tiempos donde fueron registrados los demás valores (cada 2 min). Para ello se usaron las funciones `find` e `interp1` de Matlab® R2007b (The MathWorks Inc., Natick, MA, USA). La función `find` permite identificar los tiempos de las pesadas a partir de los tiempos donde se

registran temperaturas en el aire que son menores al valor promedio menos dos veces la desviación estándar de las mismas. Esto sucede porque la temperatura del aire disminuye momentáneamente cuando el flujo de aire se interrumpe, mediante el cambio de posición de la válvula, para realizar la medición del peso. Las temperaturas en el centro y la superficie de la muestra que coincidían con los tiempos de las pesadas fueron eliminadas. Posteriormente, mediante la función `interp1` se realizó una interpolación lineal de los datos restantes de tal forma que correspondieran en el tiempo con los demás valores registrados por el sistema de adquisición de datos del secadero.

La información experimental de cada experiencia fue almacenada en un fichero tipo Matlab® para su posterior utilización en el ajuste y validación del modelo del proceso.

4.2. Modelización de las cinéticas de secado

Con el fin de establecer el modelo matemático, fueron analizados los fenómenos de transferencia de materia y calor en un sistema con geometría cúbica. A partir de la bibliografía se consideró que el tipo de modelo que podría proporcionar resultados adecuados era el difusional. La formulación de las ecuaciones de gobierno fue realizada considerando que el material era homogéneo e isotrópico, que el efecto de la contracción sobre los procesos de transferencia era despreciable, y que las propiedades de transporte (difusividad efectiva y conductividad térmica) eran funciones de los valores locales de humedad y temperatura.

Para resolver el modelo matemático, las condiciones iniciales y de contorno fueron establecidas considerando que la distribución de la humedad y la temperatura dentro del sólido al inicio del proceso eran uniformes, que la resistencia externa a la transferencia de materia y calor no eran despreciables, y que las propiedades del aire alrededor del sólido eran constantes (durante el proceso de secado continuo y durante cada periodo de calentamiento o reposo del proceso de secado intermitente).

Para completar la formulación del modelo matemático, fueron consideradas las ecuaciones para la estimación de las propiedades térmicas del producto (Ecs. 4.3.2 y 4.3.3), las isothermas de sorción (Ecs. 2.1.2–2.1.4), el calor isostérico de sorción (Ec. 2.1.8), los coeficientes de transferencia de calor y materia por convección natural y forzada (Ecs. 2.1.16 y 4.3.8–4.3.12), los datos psicrométricos (ASAE, 1999; Genskow et al., 2008) y las propiedades físicas del aire húmedo (Ecs. 2.1.23–2.1.31).

4.2.1. Transferencia de materia

A partir del balance de agua en régimen no estacionario para el volumen de control diferencial de la Figura 4.5, el transporte de materia al interior del sólido puede ser expresado según la Ec. (4.2.1),

$$0 = \frac{\partial(m_x A_x)}{\partial x} dx + \frac{\partial(m_y A_y)}{\partial y} dy + \frac{\partial(m_z A_z)}{\partial z} dz + \frac{\partial M}{\partial t} \quad (4.2.1)$$

donde m_x , m_y y m_z ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) son los flujos de materia por unidad de área en la dirección x , y y z (m), respectivamente; A_x , A_y y A_z (m^2) son las áreas de las superficies del volumen de control perpendiculares a la dirección x , y y z , respectivamente; y M (kg) es la masa de agua en el volumen de control.

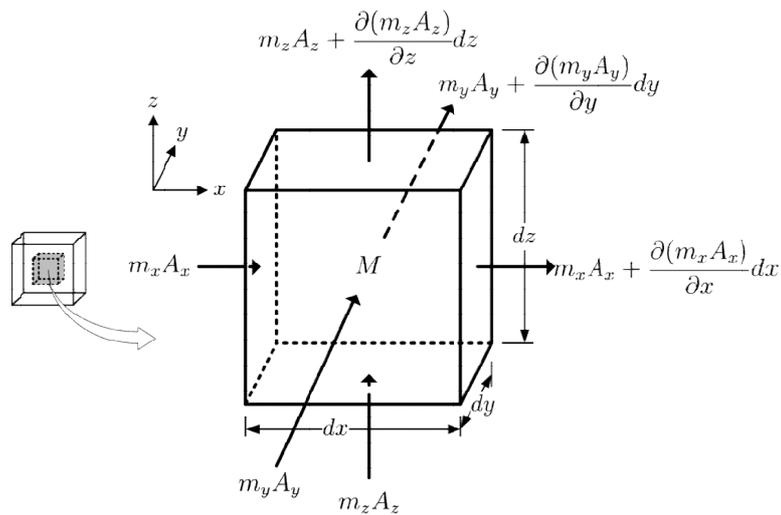


Figura 4.5. Volumen de control diferencial para el análisis de transferencia de materia. Flujos de materia entrantes y salientes del volumen de control.

Considerando que el sólido no se contrae durante el proceso de secado y definiendo la masa de agua en el interior del volumen de control como $M = \rho_{ds} W dx dy dz$, se deduce la Ec. (4.2.2), donde W (kg kg^{-1} b.s.) es el contenido de humedad; y ρ_{ds} (kg m^{-3}) es la densidad del sólido seco, definida como la masa de sólido seco respecto al volumen que ocupa la masa total del sistema.

$$0 = \frac{\partial m_x}{\partial x} + \frac{\partial m_y}{\partial y} + \frac{\partial m_z}{\partial z} + \rho_{ds} \frac{\partial W}{\partial t} \quad (4.2.2)$$

Asumiendo que el principal mecanismo de migración de humedad a través del material es la difusión líquida, los flujos de materia pueden ser expresados aplicando la ley particular de Fick (Ec. 4.2.3), donde D_e (m s^{-1}) representa la difusividad efectiva.

$$m_x = -D_e \rho_{ds} \frac{\partial W}{\partial x}; \quad m_y = -D_e \rho_{ds} \frac{\partial W}{\partial y}; \quad m_z = -D_e \rho_{ds} \frac{\partial W}{\partial z} \quad (4.2.3)$$

Sustituyendo la Ec. (4.2.3) en la Ec. (4.2.2), se obtiene la ecuación de gobierno para la transferencia de materia (Ec. 4.2.4).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_e \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_e \frac{\partial W}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_e \frac{\partial W}{\partial z} \right) = \frac{\partial W}{\partial t} \quad (4.2.4)$$

4.2.2. Transferencia de calor

Según el balance de energía en régimen no estacionario para el volumen de control diferencial de la Figura 4.6, la transferencia de calor al interior del sólido, al considerar tanto la energía térmica transferida por conducción como la energía térmica asociada a la masa que se difunde, se puede expresar como,

$$0 = \frac{\partial(q_x A_x)}{\partial x} dx + \frac{\partial(q_y A_y)}{\partial y} dy + \frac{\partial(q_z A_z)}{\partial z} dz + \frac{\partial(m_x \theta_x A_x)}{\partial x} dx + \frac{\partial(m_y \theta_y A_y)}{\partial y} dy + \frac{\partial(m_z \theta_z A_z)}{\partial z} dz + \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (4.2.5)$$

donde q_x , q_y y q_z (kW m^{-2}) son los flujos de calor por unidad de área en la dirección x , y y z , respectivamente; θ_x , θ_y y θ_z (kJ kg^{-1}) son las entalpías específicas asociadas a la cantidad de materia que se transfiere en la dirección x , y y z , respectivamente; y Θ (kJ) es la entalpía del material del volumen de control.

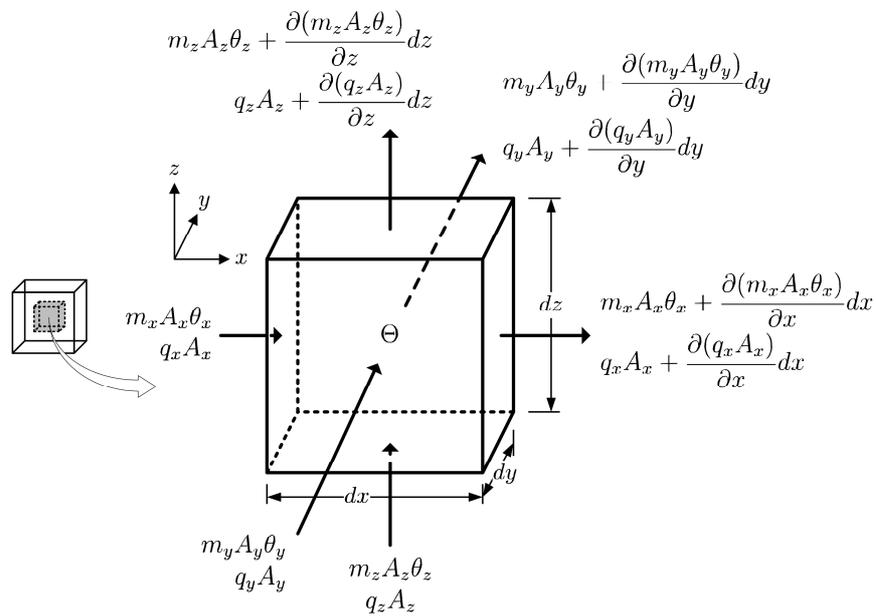


Figura 4.6. Volumen de control diferencial para el análisis de transferencia de calor. Flujos de energía entrantes y salientes del volumen de control.

Habiendo descartado el efecto de la contracción y definiendo la energía térmica almacenada por el material (Θ) en función de las

entalpías específicas del agua pura (θ_w) y de la materia seca (θ_{dm}), se obtiene,

$$0 = \frac{\partial q_x}{\partial x} dx + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \frac{\partial(m_x \theta_x)}{\partial x} dx + \frac{\partial(m_y \theta_y)}{\partial y} dy + \frac{\partial(m_z \theta_z)}{\partial z} dz + \rho_{ds} \frac{\partial(\theta_{dm} + W \theta_w)}{\partial t} \quad (4.2.6)$$

Al ser la entalpía una función de estado, θ_w , θ_x , θ_y , θ_z y θ_{dm} pueden ser definidas como:

$$\theta_w = \theta_x = \theta_y = \theta_z = \theta_w|_{T_{ref}} + \int_{T_{ref}}^T c_{pw} dT \quad (4.2.7)$$

$$\theta_{dm} = \theta_{dm}|_{T_{ref}} + \int_{T_{ref}}^T c_{pdm} dT \quad (4.2.8)$$

donde T_{ref} (°C) es una temperatura de referencia; c_{pw} y c_{pdm} (kJ kg⁻¹ K⁻¹) son los calores específicos del agua pura y de la materia seca, respectivamente.

Los flujos de calor por unidad de área pueden ser expresados aplicando la ley particular de Fourier (Ec. 4.2.9), ya que la transferencia de calor en el interior del sólido se desarrolla por conducción.

$$q_x = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x}; \quad q_y = -\kappa \frac{\partial T}{\partial y}; \quad q_z = -\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4.2.9)$$

Sustituyendo las Ecs. (4.2.3), y (4.2.7)–(4.2.9) en la Ec. (4.2.6), se obtiene la ecuación de gobierno para la transferencia de calor:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho_{ds} (c_{pdm} + W c_{pw}) \frac{\partial T}{\partial t} - D_e \rho_{ds} c_{pw} \left[\frac{\partial W}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (4.2.10)$$

4.2.3. Condiciones iniciales y de contorno

Para resolver las ecuaciones en derivadas parciales que definen las ecuaciones de gobierno (Ecs. 4.2.4 y 4.2.10), son necesarias las condiciones en un tiempo inicial y las condiciones físicas que existen en la frontera del sólido.

Si se asume que la distribución de la humedad y la temperatura dentro del sólido al inicio del proceso es uniforme, las condiciones iniciales son:

$$\begin{aligned} \text{Si } t = 0 \\ W_{x,y,z} = W_0 \\ T_{x,y,z} = T_0 \end{aligned} \quad (4.2.11)$$

Tras ubicar el origen del sistema de coordenadas en el centro del cubo, se asume que existe simetría en la distribución de la humedad y la temperatura. De este modo, un octavo del cubo es suficiente para la modelización del sistema.

Ya que no existen gradientes de humedad y temperatura en los planos de simetría, las condiciones de contorno correspondientes a las caras ubicadas sobre los ejes de coordenadas son:

$$\begin{aligned} \text{Si } t \geq 0 \\ \left. \frac{\partial W}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad \left. \frac{\partial W}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad \left. \frac{\partial W}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \\ \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \end{aligned} \quad (4.2.12)$$

Las caras restantes corresponden a la superficie del sólido, donde son analizados los fenómenos de transferencia por convección.

La transferencia de materia a través de la superficie del sólido en la dirección x (Figura 4.7.a) puede ser expresada asumiendo que el

agua líquida que se difunde hacia la superficie por unidad de área se evapora a la misma velocidad (equilibrio dinámico) (Ec. 4.2.13),

$$m_x|_{x=L} = m_v|_{x=L} \quad (4.2.13)$$

siendo $m_x|_{x=L}$ ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) el flujo de agua líquida por unidad de área hacia la superficie del material y $m_v|_{x=L}$ ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) el flujo convectivo de vapor de agua por unidad de área desde la superficie del material hacia el aire de secado, los cuales se definen como,

$$m_x|_{x=L} = -D_e \rho_{ds} \left. \frac{\partial W}{\partial x} \right|_{x=L} \quad (4.2.14)$$

$$m_v|_{x=L} = h_m (C|_{x=L} - C_\infty) \quad (4.2.15)$$

donde L (m) es la mitad del lado del cubo; h_m (m s^{-1}) es el coeficiente promedio de transferencia de materia por convección; $C|_{x=L}$ (kg m^{-3}) es la concentración de vapor de agua en el aire en contacto con la superficie del sólido; y C_∞ (kg m^{-3}) es la concentración de vapor de agua en el aire fuera de la capa límite.

Asumiendo que el aire húmedo (mezcla de aire y vapor de agua) se comporta como un gas ideal, $m_v|_{x=L}$ (Ec. 4.2.13) puede ser expresado en función de la actividad de agua en la superficie ($\varphi|_{x=L}$) y la actividad de agua en el seno del fluido (φ_∞):

$$-D_e \rho_{ds} \left. \frac{\partial W}{\partial x} \right|_{x=L} = \frac{h_m P_M}{R} \left[\left. \frac{\varphi P_s}{T_{abs}} \right|_{x=L} - \frac{\varphi_\infty P_{s\infty}}{T_{\infty,abs}} \right] \quad (4.2.16)$$

donde P_M (kg kmol^{-1}) es el peso molecular del agua pura; R ($\text{kJ kmol}^{-1} \text{K}^{-1}$) es la constante de los gases perfectos; P_s (kPa) es la presión de saturación del agua pura; T_{abs} (K) es la temperatura absoluta. Los subíndices ($x = L$) y ∞ indican que los términos se

evalúan respecto a las propiedades en la superficie del sólido y en el aire fuera de la capa límite, respectivamente.

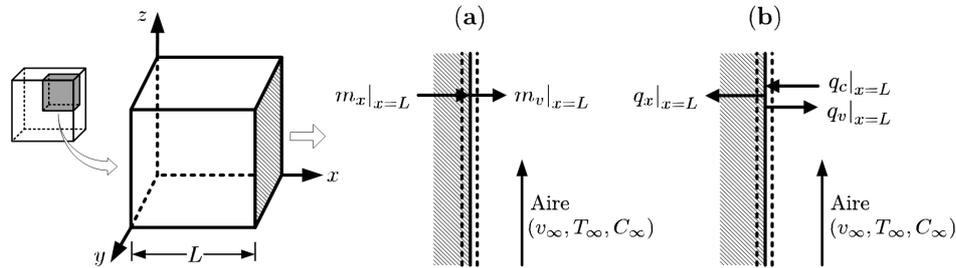


Figura 4.7. Transferencia de materia (a) y calor (b) a través de la superficie del material en la dirección x .

Por otro lado, si se desprecia la transferencia de calor por radiación hacia la superficie, la transferencia de calor a través de la superficie del sólido en la dirección x (Figura 4.7.b) puede ser expresada asumiendo que el calor transmitido por convección hacia el sólido es utilizado tanto para elevar la temperatura del material como para evaporar el agua que llega a la superficie, tal como se expresa en la Ec. (4.2.17),

$$q_c|_{x=L} = q_x|_{x=L} + q_v|_{x=L} \quad (4.2.17)$$

donde el flujo de calor por convección por unidad de área desde el aire hacia la superficie ($q_c|_{x=L}$), el flujo de calor por conducción por unidad de área desde la superficie hacia el interior del sólido ($q_x|_{x=L}$), y el flujo de calor por unidad de área necesario para evaporar el agua que llega a la superficie ($q_v|_{x=L}$), en kW m^{-2} , se describen aplicando las correspondientes leyes particulares,

$$q_c|_{x=L} = h(T_\infty - T|_{x=L}) \quad (4.2.18)$$

$$q_x|_{x=L} = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} \quad (4.2.19)$$

$$q_v|_{x=L} = m_x|_{x=L} Q_s = -D_e \rho_{ds} Q_s \frac{\partial W}{\partial x} \Big|_{x=L} \quad (4.2.20)$$

donde h ($\text{kW m}^{-2} \text{K}^{-1}$) es el coeficiente promedio de transferencia de calor por convección; $T|_{x=L}$ ($^{\circ}\text{C}$) es la temperatura en la superficie del sólido; T_{∞} ($^{\circ}\text{C}$) es la temperatura en el aire fuera de la capa límite; y Q_s (kJ kg^{-1}) es el calor isostérico de sorción.

Sustituyendo las Ecs. (4.2.18)-(4.2.20) en la Ec. (4.2.17):

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = h(T|_{x=L} - T_{\infty}) - D_e \rho_{ds} Q_s \frac{\partial W}{\partial x} \Big|_{x=L} \quad (4.2.21)$$

Completando las condiciones de contorno que se obtienen a partir del análisis de la transferencia de materia y calor a través de la superficie del sólido en las direcciones x , y y z ,

Si $t > 0$ y $x = L$

$$\begin{aligned} -D_e \rho_{ds} \frac{\partial W}{\partial x} \Big|_{x=L} &= \frac{h_m P_M}{R} \left[\frac{\varphi P_s}{T_{abs}} \Big|_{x=L} - \frac{\varphi_{\infty} P_{s\infty}}{T_{\infty,abs}} \right] \\ -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} &= h[T|_{x=L} - T_{\infty}] - D_e \rho_{ds} Q_s \frac{\partial W}{\partial x} \Big|_{x=L} \end{aligned} \quad (4.2.22)$$

Si $t > 0$ y $y = L$

$$\begin{aligned} -D_e \rho_{ds} \frac{\partial W}{\partial y} \Big|_{y=L} &= \frac{h_m P_M}{R} \left[\frac{\varphi P_s}{T_{abs}} \Big|_{y=L} - \frac{\varphi_{\infty} P_{s\infty}}{T_{\infty,abs}} \right] \\ -\kappa \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=L} &= h[T|_{y=L} - T_{\infty}] - D_e \rho_{ds} Q_s \frac{\partial W}{\partial y} \Big|_{y=L} \end{aligned} \quad (4.2.23)$$

Si $t > 0$ y $z = L$

$$\begin{aligned} -D_e \rho_{ds} \frac{\partial W}{\partial z} \Big|_{z=L} &= \frac{h_m P_M}{R} \left[\frac{\varphi P_s}{T_{abs}} \Big|_{z=L} - \frac{\varphi_{\infty} P_{s\infty}}{T_{\infty,abs}} \right] \\ -\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L} &= h[T|_{z=L} - T_{\infty}] - D_e \rho_{ds} Q_s \frac{\partial W}{\partial z} \Big|_{z=L} \end{aligned} \quad (4.2.24)$$

En el caso del secado continuo o en los periodos de calentamiento del secado intermitente, las condiciones de contorno se evalúan usando los coeficientes de transferencia de materia y de calor por convección forzada y las propiedades del aire de calentamiento. En el caso de los periodos de reposo, las condiciones de contorno se evalúan mediante los coeficientes de transferencia de materia y calor por convección natural y las propiedades del aire de reposo (condiciones ambientales).

4.3. Propiedades físicas del mango

Se formularon ecuaciones para la estimación de la conductividad térmica, el calor específico y las isothermas de sorción del mango en función de la temperatura y el contenido de humedad, con el objetivo de emplearlas en el cálculo del modelo del proceso (Ecs. 4.2.4, 4.2.10, 4.2.11 y 4.2.22–4.2.24).

La determinación de la conductividad térmica, el calor específico y las isothermas de sorción del mango fue necesaria debido a la ausencia de información bibliográfica para estas propiedades en la variedad “Tommy Atkins”, y a la limitada información disponible para variedades similares respecto a las condiciones experimentales empleadas en este estudio.

4.3.1. Conductividad térmica

4.3.1.1. Preparación de las muestras

Los mangos frescos fueron adquiridos en un mercado local de São Jose do Rio Preto (São Paulo, Brasil) y mantenidos en refrigeración (7 °C) para su uso posterior. La composición de los frutos, determinada según los estándares de la AOAC (1997), presentó los siguientes resultados: contenido de humedad 83.7 % (b.h.); azúcares totales 14.4 % (b.h.); fibras 2.1 % (b.h.); cenizas 0.3 % (b.h.); acidez titulable 0.67 % (ácido málico); y °Brix 15.1 %.

La pulpa fue extraída y homogenizada mediante una despulpadora semi industrial provista de un tamiz de 1.6 mm. Posteriormente, la pulpa fue concentrada en un rota-evaporador (RV 06ML 1B, IKA, Staufen, Alemania) y luego diluida con agua destilada para obtener

muestras con contenidos de humedad de 9, 4, 2.3, 1.5, y 1.1 kg kg⁻¹ (b.s.).

4.3.1.2. Determinación de la conductividad térmica

La conductividad térmica de las muestras fue determinada por triplicado a temperaturas de 20, 28, 36, 44, 55, 66, 72 y 80 °C empleando el método descrito por Telis-Romero et al. (1998), en el cual se emplea una celda para medir el calor transmitido por conducción a través de la muestra que ocupa el espacio anular entre dos cilindros concéntricos de cobre.

El equipo utilizado en la medición (Figura 4.8) (Telis-Romero et al., 1998) está compuesto por dos cilindros coaxiales de cobre, de 180 mm de longitud, separados por un espacio anular de 2 mm en el cual se coloca la muestra. Los cilindros exterior e interior tienen diámetros externos de 34 y 20 mm, y diámetros internos de 24 y 10 mm, respectivamente. Una cubierta aislante de 50 mm de espesor (conductividad térmica de 0.225 W m⁻¹ K⁻¹) a cada extremo de la celda ofrece soporte a los cilindros y previene la transferencia de calor axial. El sistema de calentamiento de este dispositivo está compuesto por una resistencia eléctrica de 15 W (alambre de constantán), eléctricamente aislada por un barniz y enrollada a una varilla de cobre. Se colocaron dos termopares tipo T, paralelos al eje axial y en la mitad de la longitud de la celda, para medir la diferencia de temperaturas entre los dos cilindros. La celda fue inmersa en un baño con agua a temperatura controlada (MA-184, Marconi, São Paulo, Brasil) para mantener la temperatura externa constante. Un sistema de adquisición de datos (HP 75000 series B, Hewlett Packard, EEUU) fue empleado para monitorizar y registrar las temperaturas.

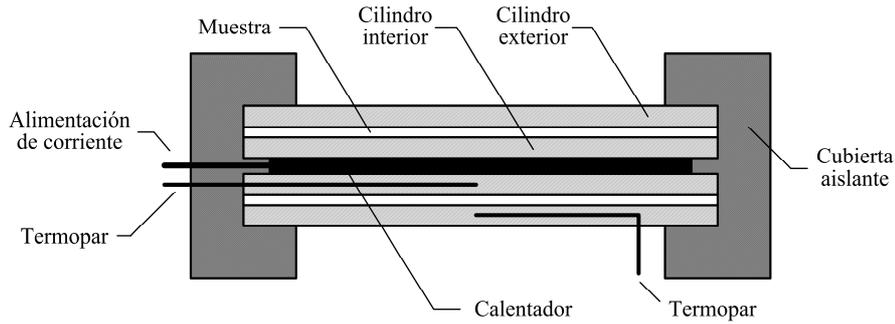


Figura 4.8. Esquema de la sección transversal de la celda usada para medir la conductividad térmica de la pulpa de mango. Adaptado de Telis-Romero et al. (1998).

La formulación de la transferencia de calor por conducción en la dirección radial de la celda mediante la ley de Fourier en coordenadas cilíndricas, conduce a la Ec. (4.3.1), considerando como condiciones de contorno las temperaturas superficiales de los cilindros concéntricos y asumiendo que la conductividad térmica es el valor promedio para el intervalo de temperaturas superficiales. La solución que conduce a la Ec. (4.3.1) es presentada en detalle por Bellet et al. (1975).

$$\kappa = Q_r \frac{\log(r_2/r_1)}{2\pi l(T_2 - T_1)} \quad (4.3.1)$$

En la Ec. (4.3.1), κ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) es la conductividad térmica; Q_r es el flujo de calor emitido por la resistencia eléctrica (W); r_1 y r_2 (m) son los radios interno y externo de los cilindros interior y exterior, respectivamente; l (m) es la longitud de la celda; T_1 y T_2 ($^{\circ}\text{C}$) son las temperaturas superficiales de los cilindros interior y exterior, respectivamente.

4.3.1.3. Análisis de los resultados

Las mediciones fueron utilizadas para correlacionar la conductividad térmica de la pulpa de mango con el contenido de

humedad y la temperatura mediante un modelo de la forma Ec. (4.3.2), donde κ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) es la conductividad térmica de la pulpa de mango; a ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$), b ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) y c ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-2}$) son los parámetros del modelo; W (kg kg^{-1} b.s.) es el contenido de humedad en base seca; y T ($^{\circ}\text{C}$) es la temperatura.

$$\kappa = a + b \left(\frac{W}{W + 1} \right) + cT \quad (4.3.2)$$

Para la identificación de los parámetros a , b y c de la Ec. (4.3.2) fue usada la función `robustfit` de Matlab® R2007b (The MathWorks Inc., Natick, MA, EEUU), la cual emplea el método de regresión robusta para reducir la influencia de valores atípicos en la estimación de un modelo lineal múltiple (The MathWorks, 2007).

La raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RMSE*, Ec. 4.7.1) y la varianza explicada (*VAR*, Ec. 4.7.2) fueron los estadísticos empleados para evaluar la bondad del ajuste.

4.3.2. Calor específico

Se realizó la determinación del calor específico en la materia seca del mango mediante calorimetría diferencial de barrido, y en la pulpa de mango (a diferentes concentraciones de humedad) mediante el equipo descrito en el apartado 4.3.1.2.

El calor específico de la materia seca, el cual es necesario para la solución del modelo del proceso, fue comparado con el calor específico de la pulpa de mango mediante un modelo predictivo en función de los calores específicos de los contenidos de agua y materia seca.

4.3.2.1. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Preparación de las muestras

Láminas de mango fresco y maduro de 3 mm de espesor, con un contenido de sólidos solubles del 11.5 ± 0.8 % ($^{\circ}$ Brix) y una acidez titulable del 0.72 ± 0.06 % (ácido málico), fueron deshidratadas en una estufa de desecación al vacío (Vaciotem, Selecta, Barcelona, España) a 60 °C y 80 mm Hg durante 12 horas. Las láminas secas fueron posteriormente molidas en un equipo doméstico (D56, Moulinex, Seb Group, France) para reducir el tamaño de partícula. El procedimiento de secado fue repetido hasta alcanzar un valor de peso constante, donde se asumió que el producto estaba completamente deshidratado.

Determinación del calor específico de la materia seca

Cuatro muestras de la materia seca del mango (9 ± 2 mg) fueron colocadas dentro de cápsulas de aluminio y posteriormente analizadas por triplicado en un equipo de calorimetría diferencial de barrido (DSC 220 SSC/5200H, Seiko Instruments Inc., Japón). Las mediciones se realizaron en un rango de temperaturas de 10 a 70 °C a una velocidad de calentamiento de 0.05 °C s⁻¹. Una muestra de ácido benzoico (6 ± 2 mg), empleado como material de referencia, fue medida a las mismas condiciones.

El calor específico de la muestra en función de la temperatura fue calculado a partir de los termogramas de la muestra y del material de referencia mediante el software del equipo. De este modo, fueron obtenidos doce grupos de datos experimentales a partir de la combinación de las tres repeticiones de cada una de las cuatro muestras.

Análisis de los resultados

Los datos de calor específico de la materia seca del mango fueron ajustados a un polinomio de segundo orden (Ec. 4.3.3),

$$c_{p_{dm}} = a + bT + cT^2 \quad (4.3.3)$$

donde $c_{p_{dm}}$ ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) es el calor específico de la materia seca del mango; T ($^{\circ}\text{C}$) es la temperatura; a ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), b ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-2}$) y c ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-3}$) son los parámetros del modelo.

Para la identificación de los parámetros a , b y c de la Ec. (4.3.3) fue usada la función `polyfit` de Matlab® R2007b (The MathWorks Inc., Natick, MA, EEUU), la cual encuentra los coeficientes de un polinomio, de orden dado, que se ajusta a los datos según el criterio de mínimos cuadrados (The MathWorks, 2007).

La raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RMSE*, Ec. 4.7.1) y la varianza explicada (*VAR*, Ec. 4.7.2) fueron los estadísticos empleados para evaluar la bondad del ajuste.

4.3.2.2. Método de la celda

Preparación de las muestras

Las muestras corresponden a las empleadas en la determinación de la conductividad térmica (apartado 4.3.1.1), donde la pulpa de mangos frescos, previamente extraída y homogenizada mediante una despulpadora semi industrial, fue concentrada en un rota-evaporador y luego diluida con agua destilada para obtener muestras con diferentes contenidos de humedad.

Determinación del calor específico de la pulpa de mango

El calor específico de las muestras de pulpa de mango, con contenidos de humedad de 9, 4, 2.3, 1.5, y 1.1 kg kg^{-1} (b.s.), fue

determinado por triplicado a temperaturas de 20, 28, 36, 44, 55, 66, 72 y 80 °C mediante el montaje experimental usado en la medición de la conductividad térmica (apartado 4.3.1.2), pero considerando transferencia de calor en régimen no estacionario a través de la muestra contenida en la celda.

Si se considera que el sistema se encuentra en régimen transitorio y que el material es isótropo y homogéneo, la transferencia de calor por conducción puede ser descrita mediante la aplicación de la ley de conservación de la energía y la ley particular de Fourier según la Ec. (4.3.4).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\kappa}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (4.3.4)$$

La Ec. (4.3.4) fue resuelta considerando como condiciones de contorno las temperaturas superficiales de los cilindros concéntricos y como condición inicial que la temperatura de la celda era uniforme al inicio del ensayo. La temperatura exterior (temperatura del baño) y el flujo de calor hacia la interfase muestra-celda se consideraron constantes, y las temperaturas y flujos de calor en la interfase muestra-celda se consideraron iguales a los valores en la superficie externa del cilindro interior.

Bellet et al. (1975) han presentado una solución detallada de la Ec. (4.3.4). Las ecuaciones necesarias para la determinación del calor específico derivadas de esa solución han sido resumidas en el Anexo 0.

La solución de la Ec. (4.3.4) requiere el conocimiento de la conductividad térmica y la densidad de la muestra (ρ y κ), así como de la densidad y el calor específico del material de la celda ($\rho' = 8890 \text{ kg m}^{-3}$ y $c_p' = 0.403 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$). La conductividad térmica de la muestra fue determinada por el procedimiento descrito en el

apartado 4.3.1, mientras que la determinación de la densidad se describe a continuación.

Determinación de la densidad

La densidad de la pulpa de mango, necesaria para el cálculo del calor específico, fue determinada por triplicado mediante un picnómetro volumétrico estándar de 25 ml y una balanza analítica (Mettler AB204, NY, EEUU) en las muestras de pulpa de mango, con contenidos de humedad de 9, 4, 2.3, 1.5, y 1.1 kg kg⁻¹ (b.s.), a temperaturas de 20, 28, 36, 44, 55, 66, 72 y 80 °C. La temperatura de la muestra fue controlada mediante un baño termostático con agua (Marconi MA-184, São Paulo, Brasil).

Análisis de los resultados

Los datos experimentales obtenidos en la determinación del calor específico de la pulpa de mango fueron utilizados para correlacionar esta propiedad con el contenido de humedad y la temperatura mediante un modelo de la forma Ec. (4.3.5), donde c_p (kJ kg⁻¹ K⁻¹) es el calor específico de la pulpa de mango; a (kJ kg⁻¹ K⁻¹), b (kJ kg⁻¹ K⁻¹) y c (kJ kg⁻¹ K⁻²) son los parámetros del modelo; W (kg kg⁻¹ b.s.) es el contenido de humedad; y T (°C) es la temperatura.

$$c_p = a + b \left(\frac{W}{W + 1} \right) + cT \quad (4.3.5)$$

Al igual que en la determinación de la conductividad térmica de la pulpa de mango (apartado 4.3.1.3), para la identificación de los parámetros a , b y c de la Ec. (4.3.3) fue usada la función `robustfit` de Matlab® R2007b (The MathWorks Inc., Natick, MA, EEUU). Del mismo modo, para evaluar la bondad del ajuste fueron empleados la raíz cuadrada del error cuadrático medio ($RMSE$, Ec. 4.7.1) y la varianza explicada (VAR , Ec. 4.7.2).

4.3.2.3. Comparación de los modelos obtenidos para la estimación del calor específico

Los resultados obtenidos para la pulpa de mango fueron comparados con los resultados de un modelo predictivo (Ec. 4.3.6) que estima el calor específico de la pulpa de mango ($c_{p(pre)}$, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) a partir de del calor específico del agua (c_{pw} , $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) y de la materia seca (c_{pdm} , $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$). El calor específico de la materia seca corresponde al determinado mediante el procedimiento descrito en el apartado 4.3.2.1.

Siendo el calor específico una propiedad aditiva (Nesvadba, 2005; Sahin & Sumnu, 2006), el modelo predictivo se define a partir de la suma de los productos entre el calor específico y la fracción másica de cada uno de los componentes considerados. Escrito en términos del contenido de humedad en base seca (W , kg kg^{-1} b.s.), dicho modelo se reduce a la Ec. (4.3.6).

$$c_{p(pre)} = c_{pw} \left(\frac{W}{W+1} \right) + c_{pdm} \left(\frac{1}{W+1} \right) \quad (4.3.6)$$

4.3.3. Isotermas de sorción y calor isostérico de sorción

La actividad de agua en equilibrio con la humedad de la superficie del producto y el calor isostérico de sorción son necesarios para el cálculo de las condiciones de contorno en la solución del modelo del proceso (Ecs. 4.2.4, 4.2.10, 4.2.11 y 4.2.22-4.2.24).

Las isotermas de sorción de la pulpa de mango fueron determinadas y modelizadas de acuerdo a la metodología descrita por García-Pérez et al. (2008). Los datos experimentales fueron ajustados a modelos de isotermas teóricos y empíricos con el fin de establecer los

parámetros de las ecuaciones y determinar el calor isostérico de sorción.

4.3.3.1. Preparación de las muestras

La pulpa fue obtenida de mangos frescos y maduros. Los frutos presentaron un contenido de humedad inicial, acidez titulable y contenido de sólidos solubles, determinados según los métodos estándares de la AOAC (1997), de 85.9 ± 1.7 % (b.h.), 0.72 ± 0.06 % (ácido málico) y 11.3 ± 0.8 % (°Brix), respectivamente.

La pulpa fue triturada en un equipo doméstico (D56, Moulinex, Seb Group, France) para reducir el tamaño de partícula y facilitar la deshidratación. La pulpa fue colocada en crisoles y posteriormente secada a 70 °C en una estufa de desecación por ventilación forzada (FD115 Oven Forced Air, Binder, Tuttlingen, Alemania). Las muestras fueron retiradas de la estufa a diferentes tiempos para conseguir diferentes contenidos de humedad. Las muestras deshidratadas fueron trituradas de nuevo, envueltas en film plástico y colocadas dentro de recipientes herméticos por 48 horas a temperatura de refrigeración (~4 °C) para asegurar su homogenización.

4.3.3.2. Determinación de las isotermas de sorción

Para la obtención de las isotermas de sorción, fueron determinados experimentalmente la actividad de agua y el contenido de humedad de muestras de mango deshidratado.

En cada muestra se determinó la actividad de agua por triplicado a 10, 20, 30, 40 y 50 °C utilizando un higrómetro eléctrico para cada medida (dos equipos del modelo TH200 y uno del modelo AW SPRINT TH500, Novasina, Pfäffikon, Suiza). Los equipos fueron previamente calibrados a 25 °C según el manual del fabricante y utilizando las siguientes sales: LiCl, MgCl₂, Mg(NO₃)₂, NaCl, BaCl₂ y K₂Cr₂O₇. Estos

equipos miden la humedad relativa del aire en la cámara portamuestras a partir de la variación de la conductividad de un sensor de cloruro de litio. El tiempo necesario para alcanzar el equilibrio, cuando la humedad relativa de la cámara portamuestras coincide con la actividad de agua del producto, nunca superó las 3 horas.

Cada muestra fue colocada sucesivamente a diferentes temperaturas para evitar el error asociado a variaciones en la muestra. Este procedimiento suministra una medida rápida y fiable de la actividad de agua a diferentes temperaturas, evitando cambios por degradación del producto, tal como ocurre cuando se requiere un tiempo prolongado para alcanzar el equilibrio (Sahin & Sumnu, 2006).

Una vez medida la actividad de agua, se determinó por triplicado el contenido de humedad de cada muestra de acuerdo al método oficial 934.06 de la AOAC (1997).

En cada temperatura fueron obtenidos once puntos experimentales que describen la relación entre la actividad de agua y el contenido de humedad.

4.3.3.3. Modelización de las isothermas y cálculo del calor isostérico de sorción

Con el objetivo de modelar el comportamiento higroscópico del mango se emplearon el modelo de GAB (Ecs. 2.1.2–2.1.4) y las ecuaciones empíricas de Oswin (Ec. 2.1.5), Henderson (Ec. 2.1.6) y Halsey (Ec. 2.1.7). Los parámetros de los diferentes modelos fueron estimados mediante el ajuste de las diferentes ecuaciones a los datos experimentales usando la función `nlinfit` de Matlab® R2007b (The MathWorks Inc., Natick, MA, EEUU), la cual emplea el algoritmo de Gauss-Newton con modificaciones de Levenberg-Marquardt, para estimar los parámetros de modelos no lineales por mínimos cuadrados (The MathWorks, 2007). La utilización de la función `nlinfit` permite la

realización de un único ajuste para todos los datos experimentales (a diferentes temperaturas y actividades de agua), evitándose el error asociado a las estimaciones por separado donde se determinan los parámetros de los modelos a cada temperatura y luego se estima la dependencia de esos parámetros con la temperatura.

La raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RMSE*, Ec. 4.7.1) y la varianza explicada (*VAR*, Ec. 4.7.2) fueron los estadísticos empleados para evaluar la bondad del ajuste.

Por su parte, el calor isostérico de sorción fue calculado a partir de la isoterma de sorción de GAB (Ecs. 2.1.2–2.1.4) usando la Ec. (2.1.8), la cual se obtiene a partir de la ecuación de Clausius-Clapeyron.

4.3.4. Coeficientes de transferencia interfaciales

Los coeficientes promedio de transferencia de materia (h_m) y calor (h) por convección (Ec. 2.1.16), necesarios para el cálculo de las condiciones de contorno en la solución del modelo del proceso (Ecs. 4.2.4, 4.2.10, 4.2.11 y 4.2.22–4.2.24), se estimaron a partir de correlaciones empíricas para cubos inmersos en fluidos obtenidas de modelos de la literatura (Culham et al., 2001; Yovanovich & Jafarpur, 1993). Dichas correlaciones suministran valores de los números adimensionales Nusselt (Nu_ℓ) y Sherwood (Sh_ℓ) para convección forzada (Ecs. 4.3.8 y 4.3.11) y natural (Ecs. 4.3.10 y 4.3.12), a partir de los cuales se estimaron los coeficientes promedio de transferencia por convección en los periodos de calentamiento y reposo, respectivamente.

4.3.4.1. Transferencia de calor por convección

Según el modelo del cuboide reportado por Culham et al. (2001), el número de Nusselt promedio para transferencia de calor por

convección forzada al exterior de un paralelepípedo puede ser calculado mediante la Ec. (4.3.7),

$$Nu_{\ell} = \frac{2}{(\pi\gamma)^{0.5} \left(\frac{AR+1}{2}\right)^{0.25}} Re_{\ell}^{0.5} Pr^{1/3} \quad (4.3.7)$$

donde ℓ (m) es la longitud característica; AR es un parámetro de forma; Re_{ℓ} (Ec. 2.1.19) y Pr (Ec. 2.1.21) son los números adimensionales de Reynolds y Prandlt, respectivamente. El parámetro de la capa límite γ está definido por la relación v_{∞}/v_e , donde v_{∞} (m s^{-1}) es la velocidad en el seno del fluido y v_e (m s^{-1}) es una velocidad relativa basada en una linealización de la ecuación de conservación de momento en la capa límite laminar.

Para el caso de un cubo, la Ec. (4.3.7) se reduce a la Ec. (4.3.8), sustituyendo los valores de γ y AR por 2.5 y 1, respectivamente (Culham et al., 2001). Esta ecuación (Ec. 4.3.8) fue empleada para estimar el número de Nusselt promedio en los periodos de calentamiento.

$$Nu_{\ell} = 0.7136 Re_{\ell}^{0.5} Pr^{1/3} \quad (4.3.8)$$

En la Ec. (4.3.8), la longitud característica (ℓ) es equivalente a la raíz cuadrada del área superficial del cubo (Lee et al., 1991), la cual se define en función de la mitad del lado (L , m) según la Ec. (4.3.9).

$$\ell = 2L\sqrt{6} \quad (4.3.9)$$

El número de Nusselt promedio para los periodos de reposo fue establecido a partir del modelo general reportado por Yovanovich & Jafarpur (1993) para transferencia de calor por convección natural sobre objetos isotérmicos, el cual se define según la Ec. (4.3.10), donde Gr_{ℓ} es el número adimensional de Grashof (Ec. 2.1.20).

$$Nu_\ell = 3.388 + \frac{0.63707 (Gr_\ell Pr)^{0.25}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (4.3.10)$$

4.3.4.2. *Transferencia de materia por convección*

Los números de Sherwood promedio para los periodos de calentamiento y reposo (Ecs. 4.3.11 y 4.3.12) fueron establecidos a partir de las Ecs. (4.3.8) y (4.3.10), considerando que los fenómenos de transferencia de materia y calor son análogos (Incropera et al., 2007), siendo Sc el número adimensional de Schmidt (Ec. 2.1.22).

$$Sh_\ell = 0.7136 Re_\ell^{0.5} Sc^{1/3} \quad (4.3.11)$$

$$Sh_\ell = 3.388 + \frac{0.63707 (Gr_\ell Sc)^{0.25}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Sc}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (4.3.12)$$

4.4. Identificación paramétrica y validación del modelo difusional

Para completar la modelización del proceso es necesario identificar el valor de la difusividad efectiva, propiedad de transporte presente en el modelo matemático que se ha formulado (Ecs. 4.2.4, 4.2.10, 4.2.11 y 4.2.22–4.2.24).

La identificación de la difusividad efectiva se realizó a partir del ajuste del modelo del proceso a los datos experimentales. El ajuste se realizó de forma simultánea mediante información experimental (contenido de humedad promedio y temperatura en el centro del cubo de mango) de los procesos de secado continuo e intermitente a diferentes condiciones experimentales. La variación de condiciones en la información experimental incluyó procesos de secado continuo e intermitente a diferentes temperaturas de calentamiento, duración de los periodos de calentamiento, contenidos de humedad y temperaturas iniciales del producto, y temperaturas y humedades ambientales del aire.

4.4.1. Experiencias de secado utilizadas en la identificación y la validación

Para la identificación de los parámetros del modelo matemático y su posterior validación fueron empleados dos conjuntos independientes de experiencias de secado.

Aquellas experiencias de secado correspondientes a los grupos 1 y 2 de la Tabla 4.2 fueron usadas en la identificación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva (modelización), las cuales incluyeron un total de 10 experimentos (cinco de de secado continuo y

cinco de secado intermitente) a temperaturas de calentamiento de 45, 50, 55, 60 y 65 °C, y velocidad de aire de 4 m s⁻¹.

La bondad de los parámetros identificados fue validada con las experiencias de secado intermitente de los grupos 3 al 6 de la Tabla 4.2, las cuales incluyeron 10 experimentos a una velocidad de 4 m s⁻¹ y temperaturas de calentamiento de 45, 50, 55, 60 y 65 °C (grupos 3 y 4); tres experimentos a una velocidad de 3 m s⁻¹ y temperaturas de calentamiento 50, 60 y 70 °C (grupo 5); y tres experimentos a una velocidad de 2 m s⁻¹ y temperaturas de calentamiento 50, 60 y 70 °C (grupo 6).

4.4.2. Modelo de la difusividad efectiva

Resultados preliminares obtenidos mediante ajustes del modelo indicaron que una difusividad efectiva descrita en función de la temperatura y humedad local era la opción con mejores resultados en la modelización de los procesos continuo e intermitente, en comparación con una difusividad efectiva constante o dependiente únicamente de la temperatura.

Una ecuación tipo Arrhenius (Ec. 4.4.1) fue incorporada en el modelo del proceso (Ecs. 4.2.4, 4.2.10, 4.2.11 y 4.2.22–4.2.24) para calcular la difusividad efectiva en función de la temperatura y el contenido de humedad local del producto (Simal et al., 2006),

$$D_e = \alpha_1 \exp \left[-\frac{\alpha_2}{RT_{abs}} \left(\frac{W}{W+1} \right)^{\alpha_3} \right] \quad (4.4.1)$$

siendo α_1 (m² s⁻¹), α_2 (kJ kmol⁻¹) y α_3 los parámetros del modelo para la estimación de la difusividad efectiva; W (kg kg⁻¹ b.s.) el contenido de

humedad en base seca; R ($\text{kJ kmol}^{-1} \text{K}^{-1}$) la constante de los gases perfectos; y T_{abs} (K) la temperatura absoluta.

En la Ec. (4.4.1), la energía de activación E_a (kJ kmol^{-1}) es considerada como una función dependiente de la humedad (Ec. 4.4.2).

$$E_a = \alpha_2 \left(\frac{W}{W+1} \right)^{\alpha_3} \quad (4.4.2)$$

4.4.3. Definición de los criterios de ajuste

Para que el modelo represente adecuadamente los datos experimentales de la cinética del proceso respecto a la humedad y la temperatura, la identificación de los parámetros debe realizarse a partir de criterios que incluyan estas dos variables. Los criterios deben estar normalizados para que la magnitud de cada variable no conceda mayor importancia a la humedad o a la temperatura en el ajuste.

Los criterios de ajuste fueron definidos a partir de una normalización del error absoluto promedio (ε), el cual se define, según la Ec. (4.4.3), como el cociente entre el error absoluto ($|k_{exp} - k_{cal}|$) y el número de datos (n_d), donde k representa la variable de interés; y los subíndices *exp* y *cal* hacen referencia a los datos experimentales y estimados, respectivamente.

$$\varepsilon = \frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^{n_d} |k_{exp_i} - k_{cal_i}| \quad (4.4.3)$$

Normalizando la Ec. (4.4.3) respecto al valor promedio de los datos experimentales (\bar{k}_{exp}), se obtiene la Ec. (4.4.4) que define el criterio de ajuste (f).

$$f = \frac{\varepsilon}{\bar{k}_{exp}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_d} |k_{exp_i} - k_{cal_i}|}{\sum_{i=1}^{n_d} (k_{exp_i})} \quad (4.4.4)$$

Reescribiendo la Ec. (4.4.4) para definir los criterios de ajuste en función del contenido de humedad promedio y la temperatura en el centro del cubo de mango, se obtienen las Ecs. (4.4.5) y (4.4.6),

$$f_W = \frac{\sum_{i=1}^{n_d} |\bar{W}_{exp_i} - \bar{W}_{cal_i}|}{\sum_{i=1}^{n_d} \bar{W}_{exp_i}} \quad (4.4.5)$$

$$f_T = \frac{\sum_{i=1}^{n_d} |(T|_{x=0,y=0,z=0})_{exp_i} - (T|_{x=0,y=0,z=0})_{cal_i}|}{\sum_{i=1}^{n_d} (T|_{x=0,y=0,z=0})_{exp_i}} \quad (4.4.6)$$

donde f_W y f_T son los criterios de ajuste relacionados con los datos de humedad y temperatura, respectivamente; n_d es el número de puntos de la experiencia; \bar{W} (kg kg^{-1} b.s.) es el contenido de humedad promedio; y $T|_{x=0,y=0,z=0}$ ($^{\circ}\text{C}$) es la temperatura en el centro del cubo de mango.

Tal como se han definido, los criterios f_W (Ec. 4.4.5) y f_T (Ec. 4.4.6) permiten que la magnitud de las variables (contenido de humedad promedio y temperatura en el centro) sea comparable, lo cual establece igual importancia a cada criterio dentro de los ajustes.

4.4.4. Procedimiento de identificación

Para la identificación de los parámetros del modelo a partir de los datos experimentales se planteó un problema de optimización multiobjetivo (Ec. 4.4.7) (Liu et al., 2003).

Según la Ec. (4.4.7), los parámetros α_1 , α_2 y α_3 del modelo de la difusividad efectiva (Ec. 4.4.1) fueron identificados a partir de la minimización de la función objetivo f_D . En el cálculo de f_D se

consideran simultáneamente los resultados de las experiencias de secado realizadas para la identificación (n_m), lo cual asegura que los parámetros identificados consideren y representen las características del material independientemente de las condiciones experimentales aplicadas en los ensayos.

$$\text{Minimizar } f_D(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = \sum_{i=1}^{n_m} (f_{W_i} + f_{T_i}) \quad (4.4.7)$$

La función objetivo (f_D) representa la suma de los criterios f_W (Ec. 4.4.5) y f_T (Ec. 4.4.6), relacionados con el ajuste de los datos de humedad y los datos de temperatura, respectivamente.

4.5. Optimización del proceso de secado intermitente

La búsqueda de un diseño óptimo para un equipo o proceso de secado es prácticamente imposible a partir de un enfoque puramente experimental, en vista de la multitud de parámetros presentes aún en los problemas unidimensionales más simples (Bon & Kudra, 2007).

En el caso del secado intermitente, la optimización del proceso debe ser realizada por medio de un modelo matemático, validado experimentalmente, que simule la distribución espacial de la humedad y la temperatura a medida que transcurre el procesamiento. A su vez, el problema de optimización debe considerar una función objetivo que represente adecuadamente la influencia de las condiciones de operación sobre la eficiencia energética del proceso y la calidad del producto.

4.5.1. Formulación de la función objetivo

De acuerdo a las consideraciones de Bon & Kudra (2007), la ganancia entálpica media del producto ponderada por la ganancia entálpica máxima es una función objetivo adecuada para estimar y optimizar el impacto de las condiciones tiempo-temperatura en el proceso de secado intermitente. Por tal razón, la función objetivo fue definida a partir de la ganancia entálpica mediante el procedimiento descrito a continuación.

El flujo de ganancia entálpica (Q , kW, Ec. 4.5.1) está definido por la suma de los flujos de calor neto a través de las superficies del cubo (Figura 4.9).

$$Q = 2Q_x + 2Q_y + 2Q_z \quad (4.5.1)$$

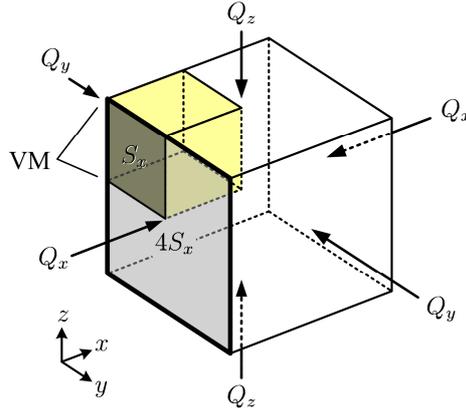


Figura 4.9. Flujos de calor neto a través de la superficie del cubo. VM es el octavo del volumen del sistema considerado por el modelo, y S_x (m^2) es el área de la superficie de VM perpendicular a la dirección x .

Los flujos de calor neto (Q_x, Q_y, Q_z) corresponden a las diferencias entre los flujos de calor transmitido por convección y los flujos de calor necesarios para evaporar la humedad superficial (Ec. 4.5.2–4.5.4).

$$Q_x = Q_{c,x} - Q_{v,x} \quad (4.5.2)$$

$$Q_y = Q_{c,y} - Q_{v,y} \quad (4.5.3)$$

$$Q_z = Q_{c,z} - Q_{v,z} \quad (4.5.4)$$

Si se analiza una de las superficies del cubo perpendicular a la dirección x , el flujo calor transmitido por convección ($Q_{c,x}$, kW) y el flujo calor necesario para evaporar el agua que llega a esa superficie ($Q_{v,x}$, kW), están dados por las Ecs. (4.5.5) y (4.5.6), respectivamente,

$$Q_{c,x} = 4 \int_{S_x} (q_c|_{x=L}) dS_x = 4 \int_{S_x} [h(T_\infty - T|_{x=L})] dS_x \quad (4.5.5)$$

$$Q_{v,x} = 4 \int_{S_x} (q_v|_{x=L}) dS_x = 4 \int_{S_x} \left[-D_e \rho_{ds} Q_s \frac{\partial W}{\partial x} \Big|_{x=L} \right] dS_x \quad (4.5.6)$$

siendo S_x (m^2) el área de la superficie del volumen del sistema considerado por el modelo y perpendicular a la dirección x ; $q_c|_{x=L}$ (kW m^{-2}) el flujo de calor por convección por unidad de área desde el aire hacia la superficie; $q_v|_{x=L}$ (kW m^{-2}) el flujo de calor por unidad de área necesario para evaporar el agua que llega a la superficie; h ($\text{kW m}^{-2} \text{K}^{-1}$) el coeficiente promedio de transferencia de calor por convección; $T|_{x=L}$ ($^{\circ}\text{C}$) la temperatura en la superficie del sólido; T_{∞} ($^{\circ}\text{C}$) la temperatura en el aire fuera de la capa límite; D_e ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) la difusividad efectiva; ρ_{ds} (kg m^{-3}) la densidad del sólido seco; Q_s (kJ kg^{-1}) el calor isostérico de sorción; y W (kg kg^{-1} b.s.) el contenido de humedad.

Así, el flujo de ganancia entálpica del producto (Q , kW) (Ec. 4.5.7) se estableció, a partir de las Ecs. (4.5.1)-(4.5.6), como el calor total transmitido por convección entre el aire y el sólido menos el calor total requerido para evaporar el agua que llega a la superficie del cubo.

$$Q = 8 \left\{ \int_{S_x} \left[h(T_{\infty} - T|_{x=L}) + D_e \rho_{ds} Q_s \frac{\partial W}{\partial x} \Big|_{x=L} \right] dS_x + \int_{S_y} \left[h(T_{\infty} - T|_{y=L}) + D_e \rho_{ds} Q_s \frac{\partial W}{\partial y} \Big|_{y=L} \right] dS_y + \int_{S_z} \left[h(T_{\infty} - T|_{z=L}) + D_e \rho_{ds} Q_s \frac{\partial W}{\partial z} \Big|_{z=L} \right] dS_z \right\} \quad (4.5.7)$$

Por su parte, la ganancia entálpica (G , kJ) (Ec. 4.5.8) se definió como la integral del flujo de ganancia entálpica (Ec. 4.5.7) a lo largo del tiempo.

$$G = \int_0^t Q dt \quad (4.5.8)$$

Finalmente, la ganancia entálpica (Ec. 4.5.8) fue promediada (Ec. 4.5.9) y ponderada por la ganancia entálpica máxima para obtener la función objetivo (OF , kJ^2) (Ec. 4.5.10).

$$\bar{G} = \frac{1}{t_P} \int_0^{t_P} G dt \quad (4.5.9)$$

$$OF = \bar{G} \max(G) \quad (4.5.10)$$

En las Ecs. (4.5.7)-(4.5.10), \bar{G} (kJ) es la ganancia entálpica media; y t_P (s) es el tiempo total del proceso.

4.5.2. Formulación del problema de optimización

El problema de optimización (Ec. 4.5.11-4.5.15) fue definido como la búsqueda de los tiempos de duración de cada periodo de calentamiento y reposo, que minimizaran la función objetivo (Ec. 4.5.10).

$$\text{Minimizar } OF(\vec{t}_H, \vec{t}_R) \quad (4.5.11)$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} t_I &\leq t_C \\ t_P &\leq \tau t_C \\ \bar{W}_f &\leq 0.3 \text{ kg kg}^{-1} \end{aligned} \quad (4.5.12)$$

donde:

$$\vec{t}_H = (t_{H_1} \ t_{H_2} \ \cdots \ t_{H_{(N+1)}}); \quad \vec{t}_R = (t_{R_1} \ t_{R_2} \ \cdots \ t_{R_N}) \quad (4.5.13)$$

$$t_I = \sum_{i=1}^{N+1} t_{H_i} \quad (4.5.14)$$

$$t_P = \sum_{i=1}^{N+1} t_{H_i} + \sum_{j=1}^N t_{R_j} \quad (4.5.15)$$

En las Ecs. 4.5.11–4.5.15, \vec{t}_H y \vec{t}_R (s) son los vectores para los tiempos de duración de los periodos de calentamiento y reposo, respectivamente (Ec. 4.5.13); t_I (s) es el tiempo de calentamiento efectivo del proceso de secado intermitente (Ec. 4.5.14); t_C (s) es el tiempo total del proceso de secado continuo; t_P (s) es el tiempo total del proceso de secado intermitente (Ec. 4.5.15); τ es la constante que limita la duración del proceso de secado intermitente; \bar{W}_f (kg kg⁻¹) es el contenido de humedad final deseado; y N es el número de ciclos.

La duración del proceso de secado intermitente fue sometida a restricciones (Ec. 4.5.12) de modo que el tiempo de calentamiento total (t_I) (Ec. 4.5.14) no excediera la duración del tiempo de calentamiento en un proceso de secado continuo (t_C) a iguales condiciones, y también que el tiempo total del proceso (t_P) (Ec. 4.5.15) no excediera en más del 30 % ($\tau = 1.3$) el tiempo total del secado continuo (t_C). Asimismo, que el contenido de humedad final (\bar{W}_f) fuera menor o igual a 0.3 kg kg⁻¹ (b.s.).

El problema de optimización fue resuelto, utilizando el modelo del proceso previamente identificado y validado, en procesos de secado intermitente de uno a tres ciclos ($N = 1, 2, 3$), a temperaturas de calentamiento (T_H) de 50, 60 y 70 °C, y velocidades de aire (v_∞) de 2, 3 y 4 m s⁻¹. Las condiciones del producto consideradas en cada problema de optimización fueron los valores promedio de aquellas usadas en las experiencias de secado (Tabla 4.1).

4.6. Simulación y optimización computacional

Una vez completada la formulación del modelo del proceso y definido el problema de optimización, se desarrollaron los algoritmos para su solución empleando las herramientas computacionales COMSOL Multiphysics® 3.4 (COMSOL AB., Estocolmo, Suecia) y Matlab® R2007b (The MathWorks Inc., Natick, MA, EEUU).

4.6.1. Modelización mediante COMSOL Multiphysics®

La herramienta COMSOL Multiphysics® 3.4 fue utilizada para resolver, aplicando el método de elementos finitos, el conjunto de ecuaciones en derivadas parciales que definen el modelo del proceso (Ecs. 4.2.4, 4.2.10, 4.2.11 y 4.2.22–4.2.24) (COMSOL AB., 2007). Esta herramienta ha sido empleada por diversos autores para la resolución numérica de modelos matemáticos que describen fenómenos físicos asociados a la deshidratación de alimentos (Bialobrzewski et al., 2008; De Bonis & Ruocco, 2008; Kittiworrawatt & Devahastin, 2009; Niamnuy et al., 2008).

Para definir el modelo en el entorno de trabajo de COMSOL Multiphysics®, inicialmente fueron seleccionados los modos de aplicación (modelos físicos predefinidos) para “difusión” y “transferencia de calor por conducción” en régimen transitorio para un sistema de tres dimensiones espaciales.

Utilizando la herramienta de dibujo de COMSOL Multiphysics® se definió la geometría del sistema (un octavo del cubo), se establecieron sus dimensiones (lado = 0.0125 m), y se ubicó el origen de coordenadas en uno de los vértices.

Tabla 4.3. Especificaciones de las ecuaciones de gobierno en los modos de aplicación de COMSOL Multiphysics® para difusión y transferencia de calor por conducción

Modo de aplicación: Difusión	
Ecuación	$\delta_{ts} \frac{\partial u1}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla u1) = R$
Condición inicial	$u1(t_0)$ u1: Contenido de humedad local (kg kg ⁻¹ b.s.)
Parámetro	Valor/Expresión
δ_{ts} : Coeficiente tiempo-escala	1
D: Coeficiente de difusión (m ² s ⁻¹)	D_e
R: Velocidad de reacción (kg m ⁻³ s ⁻¹)	0
$u1(t_0)$: Humedad inicial (kg kg ⁻¹ b.s.)	W_0
Modo de aplicación: Transferencia de calor por conducción	
Ecuación	$\delta_{ts} \rho c_p \frac{\partial u2}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla u2) = Q$
Condición inicial	$u2(t_0)$ u2: Temperatura local (°C)
Parámetro	Valor/Expresión
δ_{ts} : Coeficiente tiempo-escala	1
k: Conductividad térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	D_e
ρ : Densidad (kg m ⁻³)	ρ_{ds}
c_p : Calor específico a presión cte. (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	$c_{pdm} + W c_{pw}$
Q: Fuente de calor (W m ⁻³)	$D_e \rho_{ds} c_{pw} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right)$
$u2(t_0)$: Temperatura inicial (°C)	T_0

Posteriormente se especificaron los parámetros de las ecuaciones de gobierno, y las condiciones iniciales y de contorno del modelo, de acuerdo a las ecuaciones propias de cada uno de los modos de aplicación, tal como se muestra en las Tablas 4.3 y 4.4.

Las constantes, variables y ecuaciones para el cálculo de las propiedades físicas del producto y del aire húmedo se especificaron en los apartados “constantes” y “expresiones globales”. Adicionalmente, se utilizó el apartado “variables de integración” para el cálculo de las integrales en el sistema y los contornos, que son necesarias para el

cálculo del contenido de humedad promedio, la temperatura promedio y el flujo de ganancia entálpica del producto.

Tabla 4.4. Especificaciones de las condiciones de contorno en los modos de aplicación de COMSOL Multiphysics® para difusión y para transferencia de calor por conducción

Modo de aplicación: Difusión						
Ecuación: $\mathbf{n} \cdot (-D \nabla u_1) = N_0 + k_c (c_b - u_1)$						
u1: Contenido de humedad local (kg kg ⁻¹ b.s.)						
N ₀ : Flujo interno (kg m ⁻² s ⁻¹)						
k _c : Coeficiente de transferencia de materia (m s ⁻¹)						
c _b : Concentración exterior (kg m ⁻³)						
Contorno	Condición de contorno	N ₀	k _c	c _b		
1,2,3	<i>Aislamiento/simetría</i>	0	0	0		
4,5,6	<i>Flujo de materia</i>	$\frac{h_m P_M}{\rho_{ds} R} \left[\frac{\varphi P_s}{T_{abs}} - \frac{\varphi_{\infty} P_{s\infty}}{T_{\infty,abs}} \right]$	0	0		
Modo de aplicación: Transferencia de calor por conducción						
Ecuación: $\mathbf{n} \cdot (-k \nabla u_2) = q_0 + h(T_{inf} - u_2) + \text{Const}(T_{amb}^4 - u_2^4)$						
u2: Temperatura local (°C)						
q ₀ : Flujo de calor interno (W m ⁻²)						
h: Coeficiente de transferencia de calor (W m ⁻² K ⁻¹)						
T _{inf} : Temperatura externa (°C)						
Const: Constante dependiente del problema (W m ⁻² K ⁻⁴)						
T _{amb} : Temperatura ambiente (°C)						
Contorno	Condición de contorno	q ₀	h	T _{inf}	Const	T _{amb}
1,2,3	<i>Aislamiento/simetría</i>	0	0	0	0	0
4	<i>Flujo de calor</i>	$D_e \rho_{ds} Q_s \frac{\partial W}{\partial x}$	h	T _∞	0	0
5	<i>Flujo de calor</i>	$D_e \rho_{ds} Q_s \frac{\partial W}{\partial y}$	h	T _∞	0	0
6	<i>Flujo de calor</i>	$D_e \rho_{ds} Q_s \frac{\partial W}{\partial z}$	h	T _∞	0	0

La complejidad del modelo impidió su resolución mediante la configuración predeterminada de COMSOL Multiphysics® debido a problemas frecuentes de convergencia y a tiempos de cálculo considerablemente largos. Con el fin de especificar una configuración

apropiada a las características del modelo, se realizaron ensayos preliminares para ajustar los parámetros de resolución de la herramienta y establecer una adecuada discretización de la geometría.

Una malla de $7 \times 7 \times 7$ elementos rectangulares con tamaños que decrecen exponencialmente hacia las superficies de contorno (Figura 4.10) fue seleccionada como la mejor opción en términos de tiempo de cálculo, convergencia y precisión.

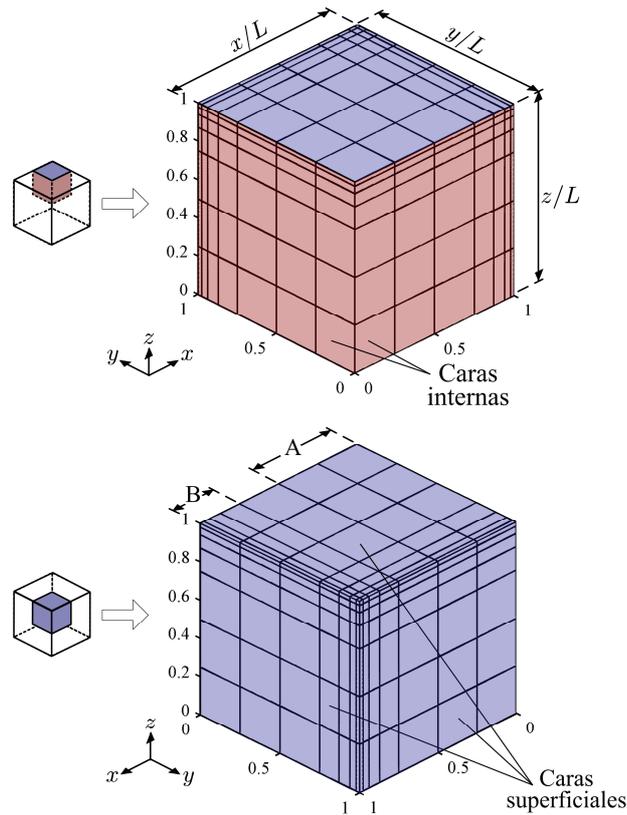


Figura 4.10. Discretización de la geometría usada en la modelización mediante COMSOL Multiphysics®. Detalle de las caras internas y de las caras superficiales de la geometría. A: Elementos de tamaño regular; B: Elementos cuyo tamaño decrece exponencialmente hacia la superficie.

La discretización de la geometría que se muestra en la Figura 4.10 permite estimar con mayor precisión la variación de la humedad y la temperatura respecto del espacio en las zonas superficiales del producto, donde dicha variación es mayor (De Bonis & Ruocco, 2008).

Para resolver el modelo del proceso, se seleccionó la configuración empleada en la solución de sistemas de ecuaciones en derivadas parciales que dependen del tiempo (time-dependent solver), junto con el algoritmo de linealización UMFPACK. El valor de las tolerancias absoluta y relativa, las cuales controlan el error en cada iteración, se estableció en 1×10^{-3} (menor al valor por defecto). Además, se especificó un intervalo de tiempo inicial de 1×10^{-2} s (mayor al valor por defecto) y un intervalo de tiempo máximo de 240 s entre cada paso de tiempo de la solución.

4.6.2. Desarrollo de algoritmos en Matlab® para la identificación del modelo, y la simulación y optimización del proceso

La herramienta Matlab® fue empleada en el desarrollo de los algoritmos generales para el ajuste del modelo del proceso a los datos experimentales y la resolución de los problemas de optimización (Ecs. 4.4.7 y 4.5.11, respectivamente). En el ajuste del modelo y en la optimización del proceso fue empleada la función `fmincon`, la cual utiliza un método basado en el gradiente para encontrar mínimos locales de problemas no lineales, multivariantes y con restricciones (The MathWorks, 2007). A partir de los argumentos de entrada de dicha función, se estableció como método de solución del problema el algoritmo de optimización a media escala (`LargeScale : off`) y el valor de tolerancia de terminación (`TolFun`) en 1×10^{-3} . La tolerancia de terminación establece el cambio en el valor de la función objetivo a

partir del cual finaliza la optimización. Una descripción detallada del algoritmo de optimización a media escala (*medium-scale optimization*) empleado por la función `fmincon` es presentado en el apartado “optimización con restricciones” (*constrained optimization*) del manual del usuario de Matlab® R2007b (The MathWorks, 2007).

El modelo, una vez formulado y resuelto en el entorno de trabajo de COMSOL Multiphysics®, fue exportado a un fichero tipo Matlab® (extensión *.m) desde el cual se extrajo el código que permitió la programación de funciones para la definición y resolución del modelo desde Matlab®. Las entradas de las funciones se establecieron de forma que pudieran ser especificadas a partir de la información y las condiciones de los experimentos de secado. Mediante dichas funciones, Matlab® emplea el motor de cálculo de COMSOL Multiphysics® para simular el proceso, durante la identificación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva y durante el cálculo de la función objetivo en la optimización del proceso de secado intermitente.

4.7. Análisis estadístico y estimación de parámetros

La raíz cuadrada del error cuadrático medio ($RMSE$) y la varianza explicada (VAR) fueron los estadísticos usados para evaluar la bondad de los ajustes. $RMSE$ (Ec. 4.7.1) es una medida del error estándar del componente aleatorio en la estimación. VAR (Ec. 4.7.2) indica el porcentaje de varianza que es tenida en cuenta por el modelo (Sheskin, 2004).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^{n_d} (k_{exp_i} - k_{cal_i})^2} \quad (4.7.1)$$

$$VAR = 100 \left(1 - \frac{\sigma_{yx}^2}{\sigma_y^2} \right) \quad (4.7.2)$$

En la Ec. (4.7.2), la desviación estándar total (σ_y) y la desviación estándar de la estimación (σ_{yx}) están definidas por las Ecs. (4.7.3) y (4.7.4), respectivamente.

$$\sigma_y = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_d} (k_{exp_i} - \bar{k}_{exp})^2}}{n_d - 1} \quad (4.7.3)$$

$$\sigma_{yx} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_d} (k_{exp_i} - k_{cal_i})^2}}{n_d - n_p} \quad (4.7.4)$$

En las Ecs. (4.7.1)-(4.7.4), k representa la variable de interés; los subíndices exp y cal hacen referencia a los datos experimentales y estimados, respectivamente; \bar{k}_{exp} es el promedio de los datos experimentales; n_d es el número de datos utilizados en el ajuste; y n_p es el número de parámetros del modelo.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con la metodología expuesta, se establecieron las propiedades físicas del mango necesarias para la solución del modelo propuesto. Una vez completada la formulación del modelo del proceso con las ecuaciones de las propiedades físicas del material, se desarrollaron los algoritmos para su solución empleando las herramientas computacionales COMSOL Multiphysics® y Matlab®.

Se identificaron los parámetros del modelo de la difusividad efectiva mediante el ajuste de las estimaciones del modelo con cinéticas de secado en continuo e intermitente. El modelo identificado fue posteriormente validado empleando un conjunto de datos experimentales, independiente del utilizado en el ajuste para comprobar que el modelo representaba satisfactoriamente las cinéticas de secado en el rango de condiciones estudiadas.

Disponer de un modelo validado permite el análisis del proceso bajo diferentes hipótesis. A modo de ejemplo se determinó la duración óptima de los periodos de calentamiento y reposo en procesos de secado intermitente a diferentes condiciones de operación mediante la minimización de la ganancia entálpica del producto.

5.1. Propiedades físicas del mango

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la determinación experimental de la conductividad térmica, el calor específico y las isotermas de sorción de la pulpa de mango, con el objetivo de establecer ecuaciones para las propiedades físicas del producto que son requeridas en la resolución del modelo del proceso (Ecs. 4.2.4, 4.2.10, 4.2.11 y 4.2.22–4.2.24).

5.1.1. Conductividad térmica

Con el objeto de establecer una ecuación que representara la conductividad térmica de la pulpa de mango, se desarrollaron experimentos a diferentes contenidos de humedad y temperatura, de acuerdo al procedimiento descrito en el apartado 4.3.1.

En la Tabla A3.1 (Anexo 3) se muestran los datos experimentales de la determinación de la conductividad térmica de la pulpa de mango a temperaturas entre 20 y 80 °C, y contenidos de humedad entre 1.1 y 9 kg kg⁻¹ (b.s.). Los datos experimentales comprendieron un rango entre 0.6227 y 0.3867 W m⁻¹ K⁻¹.

El modelo ajustado utilizado para describir la conductividad térmica de la pulpa de mango (κ , W m⁻¹ K⁻¹) en función del contenido de humedad (W , kg kg⁻¹ b.s) y la temperatura (T , °C) se expresó según la Ec. (5.1.1).

$$\kappa = 8.4 \times 10^{-2} + 0.546 \left(\frac{W}{W+1} \right) + 5.9 \times 10^{-4} T \quad (5.1.1)$$

En la Figura A3.1 (Anexo 3) se muestran los valores experimentales frente a los valores estimados obtenidos mediante el

modelo ajustado (Ec. 5.1.1). El estadístico VAR (4.7.2) indica que la Ec. (5.1.1) explica el 99.3 % de la variabilidad en κ . La raíz cuadrada del error cuadrático medio ($RMSE$, Ec. 4.7.1) en el ajuste fue de 1.34×10^{-3} .

La conductividad térmica presentó una mayor dependencia con el contenido de humedad que con la temperatura, un comportamiento usual en alimentos con alto contenido de agua (Figura & Teixeira, 2007; Sahin & Sumnu, 2006). La conductividad térmica mostró una variación de $0.206 \pm 0.005 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ entre contenidos de humedad de 1.1 y 9 kg kg^{-1} (b.s.) para las diferentes temperaturas, y una variación de $0.044 \pm 0.018 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ entre temperaturas de 20 y 80 °C para los diferentes contenidos de humedad (Tabla A3.1). En los valores estimados que se muestran en la Figura 5.1 puede apreciarse la influencia del contenido de humedad y la temperatura sobre la conductividad térmica de la pulpa de mango.

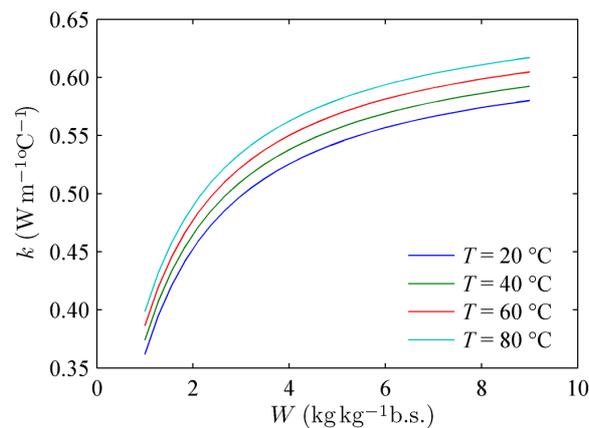


Figura 5.1. Influencia del contenido de humedad (W , $\text{kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$) y la temperatura (T , $^\circ\text{C}$) en la conductividad térmica de la pulpa de mango (κ , $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

En el Anexo 3 se comparan los resultados de la conductividad térmica de la pulpa de mango variedad “Tommy Atkins”, determinada en el presente estudio, y los resultados obtenidos por Telis et al. (2007) y Laohasongkram et al. (1995) para la conductividad térmica de pulpa de mango de las variedades “Keith” y “Kaew”, respectivamente.

5.1.2. Calor específico

Según la metodología descrita en el apartado 4.3.2, fueron determinados experimentalmente el calor específico de la materia seca y el calor específico de la pulpa de mango, mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) y el método de la celda, respectivamente.

5.1.2.1. Calor específico de la materia seca

Los resultados experimentales para el calor específico de la materia seca de mango obtenidos por DSC en función de la temperatura fueron ajustados a un polinomio de segundo orden con el objetivo de establecer una ecuación de esta propiedad para su uso dentro del modelo del proceso.

En la Tabla A4.1 (Anexo 4) se resumen los datos experimentales de la determinación del calor específico de la materia seca del mango a temperaturas de 20, 30, 40, 50, 60 y 70 °C. Los datos experimentales presentaron valores entre 1.317 y 2.105 (kJ kg⁻¹ K⁻¹).

El modelo ajustado, que describe la dependencia del calor específico de la materia seca del mango ($c_{p_{dm}}$, kJ kg⁻¹ K⁻¹) con la temperatura (T , °C), fue definido según la Ec. (5.1.2).

$$c_{p_{dm}} = 0.363 + 0.052T - 3.94 \times 10^{-4} T^2 \quad (5.1.2)$$

El modelo ajustado (Ec. 5.1.2) presentó valores en los estadísticos *VAR* y *RMSE* de 99.3 % y 0.021, respectivamente. En la Figura A4.1 (Anexo 4) se muestra la bondad del ajuste de la regresión polinomial entre datos experimentales y estimados considerando la totalidad de los puntos determinados (100).

En los valores estimados que se muestran en la Figura 5.2 puede apreciarse la influencia de la temperatura sobre el calor específico de la materia seca del mango. Tal como se muestra en la Figura 5.2, el calor específico de la materia seca del mango presentó una mayor dependencia con la temperatura entre 20 y 50 °C.

En el intervalo de temperaturas representado, las estimaciones muestran un valor medio ($1.84 \pm 0.27 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) entre las capacidades caloríficas de los principales constituyentes de la materia seca del mango: carbohidratos ($1.62 \pm 0.02 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) y fibra ($1.92 \pm 0.02 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) (Lozano, 2006; Nesvadba, 2005; Sahin & Sumnu, 2006).

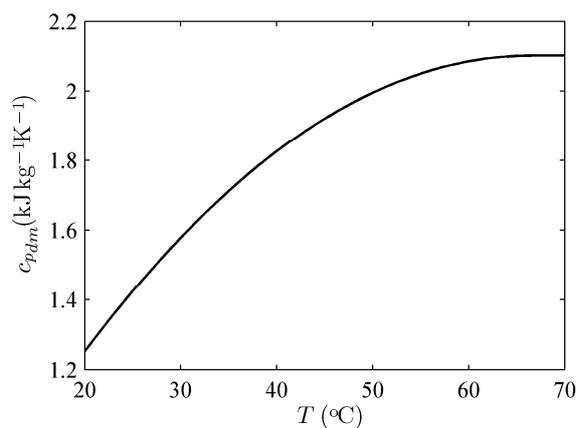


Figura 5.2. Influencia de la temperatura (T , °C) en el calor específico de la materia seca del mango ($c_{p_{dm}}$, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).

5.1.2.2. Calor específico de la pulpa

El calor específico de la pulpa de mango fue determinado por el método de la celda a diferentes contenidos de humedad y temperaturas. Los resultados experimentales fueron utilizados para ajustar un modelo lineal multivariado, el cual fue posteriormente comparado con el modelo empleado para la estimación del calor específico de la materia seca del mango.

La determinación del calor específico por el método de la celda se realizó a contenidos de humedad mayores a 1.1 kg kg⁻¹ (b.s.) ya que no fue posible el llenado del espacio que ocupa la muestra por la textura que presenta la pulpa a valores por debajo de dicha concentración.

En la Tabla A5.1 (Anexo 5) se muestran los datos experimentales del calor específico de la pulpa de mango determinados a temperaturas entre 20 y 80 °C, y contenidos de humedad entre 1.1 y 9 kg kg⁻¹ (b.s.). Los datos experimentales presentaron valores entre 4.093 y 2.738 kJ kg⁻¹ K⁻¹.

Los resultados de la determinación de la densidad, que fueron necesarios para el cálculo del calor específico, se muestran en el Anexo 6.

La influencia del calor específico de la pulpa de mango (c_p , kJ kg⁻¹ K⁻¹) con el contenido de humedad (W , kg kg⁻¹ b.s) y la temperatura (T , °C) fue descrita satisfactoriamente mediante el modelo empírico indicado en la Ec. (5.1.3).

$$c_p = 1.119 + 3.274 \left(\frac{W}{W + 1} \right) - 1.52 \times 10^{-3} T \quad (5.1.3)$$

La varianza explicada (VAR) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio ($RMSE$) del ajuste de la Ec. (5.1.3) fueron 99.5 % y 6.65×10⁻³,

respectivamente. Los valores estimados y experimentales mostrados en la Figura A5.1 (Anexo 5) ilustran la bondad del ajuste.

Al igual que en la conductividad térmica, el calor específico de la pulpa de mango presentó una mayor dependencia con el contenido de humedad que con la temperatura. El calor específico presentó una variación de $1.23 \pm 0.05 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ entre contenidos de humedad de 1.1 y 9 kg kg^{-1} (b.s.) para las diferentes temperaturas, y una variación de $0.12 \pm 0.03 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ entre temperaturas de 20 y 80 °C para los diferentes contenidos de humedad (Tabla A5.1). En los valores estimados que se muestran en la Figura 5.3 puede apreciarse la influencia del contenido de humedad y la temperatura sobre el calor específico de la pulpa de mango.

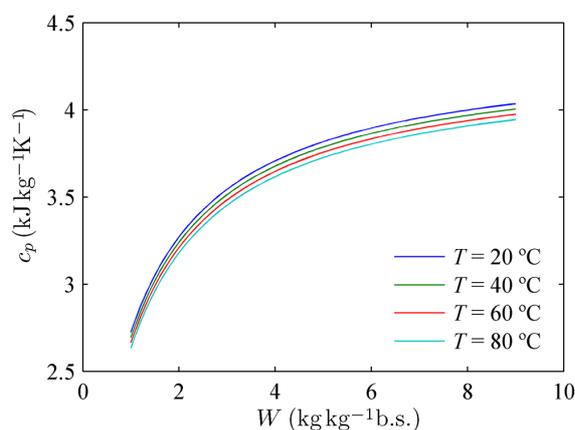


Figura 5.3. Influencia del contenido de humedad (W , kg kg^{-1} b.s.) y de la temperatura (T , °C) en el calor específico de la pulpa de mango (c_p , $\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

En el Anexo 5 se comparan los resultados del calor específico determinados en el presente estudio para pulpa de mango de la variedad “Tommy Atkins” con los resultados obtenidos por

Laohasongkram et al. (1995) para el calor específico de la pulpa de mango de la variedad “Kaew”.

5.1.2.3. Comparación de los modelos para la estimación del calor específico de la materia seca y la pulpa de mango

A partir de los resultados reportados en el apartado 5.1.2.1 para el calor específico de la materia seca de mango variedad “Tommy Atkins”, se estimaron valores de calor específico mediante el modelo predictivo de la Ec. (4.3.6) para contenidos de humedad de 9 y 1.1 kg kg⁻¹ (b.s.) y temperaturas de 20 y 80 °C. Dichas estimaciones presentaron diferencias promedio con los resultados correspondientes a la pulpa de mango del orden de 0.123 kJ kg⁻¹ K⁻¹ (~4 %) y 0.065 kJ kg⁻¹ K⁻¹ (~2 %) para contenidos de humedad de 1.1 y 9 kg kg⁻¹ (b.s.), respectivamente.

5.1.3. Isotermas de sorción y calor isostérico de sorción

El conocimiento de la actividad de agua de la pulpa de mango y el calor isostérico de sorción a diferentes contenidos de humedad y temperaturas fue necesario para el cálculo de las condiciones de contorno en la solución del modelo del proceso

Para la obtención de las isotermas de sorción, la actividad de agua y el contenido de humedad de muestras de pulpa de mango deshidratado fueron determinados experimentalmente mediante el procedimiento descrito en el apartado 4.3.3.

La Tabla A7.1 (Anexo 7) muestra las actividades de agua de la pulpa de mango a contenidos de humedad de equilibrio entre 0.031 y 2.83 kg kg⁻¹ (b.s.), y temperaturas de 10, 20, 30, 40 y 50 °C. En las condiciones experimentales estudiadas, las actividades de agua abarcaron un rango entre 0.215 y 0.977.

Los datos experimentales (Tabla A7.1) presentan un comportamiento típico de los productos agroalimentarios: a un contenido de humedad de equilibrio constante, la actividad de agua se incrementa cuando aumenta la temperatura (Basu et al., 2006; Janjai et al., 2007; Rizvi, 2005; Sahin & Sumnu, 2006). Esto indica que la pulpa de mango se hace menos higroscópica a mayor temperatura debido al incremento de la energía cinética asociada a las moléculas de agua en el material (Janjai et al., 2007). Las isotermas de sorción de la pulpa de mango variedad “Tommy Atkins” muestran un comportamiento característico de los alimentos ricos en componentes solubles (Basu et al., 2006; Rizvi, 2005; Sahin & Sumnu, 2006).

Tabla 5.1. Resultado del ajuste de los modelos de GAB, Oswin, Henderson y Halsey

Modelo	Ecuación	Parámetros	VAR	RMSE
GAB	(2.1.2-2.1.4)	$W_m = 0.112 \text{ kg kg}^{-1}$ (b.s.) $C_{G0} = 0.056$ $K_{G0} = 161.4$ $H_m = 63.6 \text{ kJ mol}^{-1}$ $H_n = 56.6 \text{ kJ mol}^{-1}$	99.6 %	0.057
Oswin	(2.1.5)	$a = 0.39$ $b = -8.1 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ $c = 0.83$	99.3 %	0.072
Henderson	(2.1.6)	$a = 5 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ $b = 179 \text{ }^\circ\text{C}$ $c = 0.4$	99.3 %	0.071
Halsey	(2.1.7)	$a = -0.33$ $b = -6.8 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ $c = 1.14$	99.1 %	0.083

La Tabla 5.1 muestra los parámetros identificados junto con los estadísticos *VAR* y *RMSE* resultantes del ajuste de las isotermas de sorción a los modelos de GAB (Ecs. 2.1.2-2.1.4), Oswin (Ec. 2.1.5), Henderson (Ec. 2.1.6) y Halsey (Ec. 2.1.7). Todos los modelos utilizados

para correlacionar el contenido de humedad de equilibrio (W_e , kg kg^{-1} b.s) con la actividad de agua (φ) y la temperatura (T , $^{\circ}\text{C}$) presentaron valores de VAR mayores a 99 % y valores de $RMSE$ menores a 0.085. Sin embargo, el modelo de GAB es el que ofrece una mejor estimación de las isotermas de sorción por cuanto posee significado físico y presenta el mejor resultado en el ajuste ($RMSE = 0.057$ y $VAR = 99.6\%$). En la Figura A7.1 (Anexo 7) se muestra la bondad del ajuste del modelo de GAB a los valores experimentales del contenido de humedad de equilibrio (W_e , kg kg^{-1} b.s).

En la Figura 5.4 se muestra la influencia de la actividad de agua y la temperatura sobre el contenido de humedad de equilibrio de la pulpa de mango estimada mediante el modelo de GAB a temperaturas de 10 y 50 $^{\circ}\text{C}$.

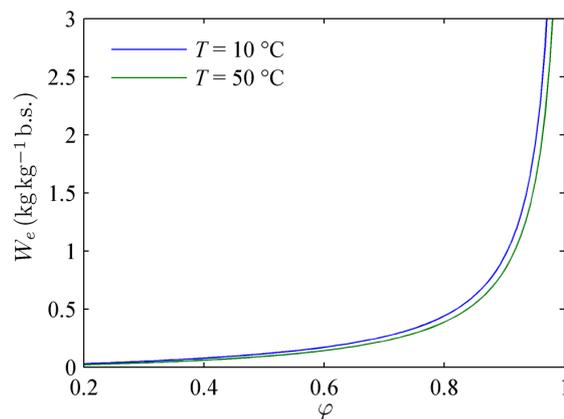


Figura 5.4. Influencia de la actividad de agua (φ) y la temperatura en el contenido de humedad de equilibrio (W_e , kg kg^{-1} b.s.) de la pulpa de mango. Estimaciones a temperaturas de 10 y 50 $^{\circ}\text{C}$ mediante el modelo de GAB

En el Anexo 7 se comparan los resultados de las isotermas de sorción determinadas en el presente estudio para pulpa de mango de la

variedad “Tommy Atkins” con los resultados obtenidos por otros autores en las variedades de mango “Nam Dok Mai” (Janjai et al., 2007), “Haden” (Telis-Romero et al., 2005) y “Manila” (Hernández et al., 2004).

El calor isostérico de sorción fue calculado de acuerdo a la Ec. (2.1.8) y al modelo de GAB (Tabla 5.1). En la Figura 5.5 se muestran valores estimados para el calor isostérico de sorción a temperaturas de 10 y 50 °C. El calor isostérico de sorción disminuye cuando el contenido de humedad se incrementa, presentando valores cercanos a la energía de vaporización del agua pura a contenidos de humedad por encima de 0.8 kg kg⁻¹ b.s. (Figura 5.5). Esta tendencia es similar a la reportada por Janjai et al. (2007) para pulpa de mango de la variedad “Nam Dok Mai”.

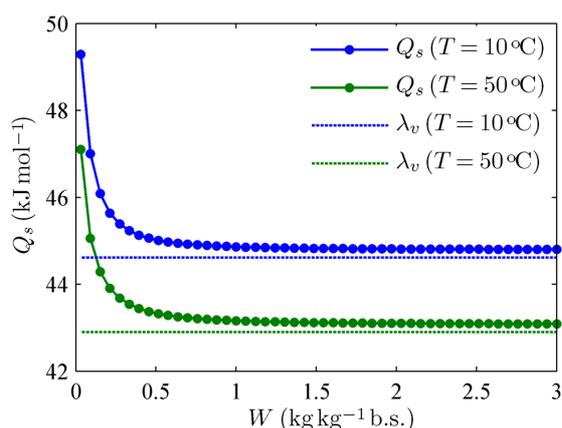


Figura 5.5. Influencia del contenido de humedad (W , kg kg⁻¹ b.s.) y la temperatura (T , °C) en el calor isostérico de sorción de la pulpa de mango (Q_s , kJ mol⁻¹). Valores calculados a partir del modelo de GAB y su comparación con el calor latente de vaporización del agua pura (λ_v , kJ mol⁻¹) a 10 y 50 °C.

El incremento en el calor de sorción a bajos contenidos de humedad es atribuido a la existencia de espacios polares altamente activos en el material, es decir, espacios de sorción donde la energía de interacción entre el agua y el alimento es mayor que la energía que mantiene las moléculas de agua en estado líquido. Tales espacios son ocupados cuando el contenido de humedad se incrementa, presentando valores de calor isostérico de sorción similares al calor latente de vaporización del agua pura, lo cual es a menudo tomado como indicativo de la cantidad de agua ligada que existe en el alimento (Al-Muhtaseb et al., 2002; García-Pérez et al., 2008; Janjai et al., 2007; Simal et al., 2007).

5.2. Algoritmos computacionales

A fin de resolver el modelo del proceso (Ecs. 4.2.4, 4.2.10, 4.2.11 y 4.2.22–4.2.24), realizar la identificación de los parámetros y la resolución de los problemas de optimización, se desarrollaron algoritmos empleando las herramientas computacionales COMSOL Multiphysics® 3.4 y Matlab® R2007b. Al igual que en el estudio realizado por De Temmerman et al. (2007), sobre secado de pasta de sémola, la utilización de COMSOL Multiphysics® y Matlab® permitió la solución numérica y la identificación paramétrica del modelo difusivo.

El modelo fue inicialmente formulado y resuelto en el entorno de trabajo de COMSOL Multiphysics®, de acuerdo al procedimiento descrito en el apartado 4.6.1. En la Figura 5.6 se ilustra un resultado de la modelización una vez ajustada la discretización de la geometría (mallado) y la configuración de COMSOL Multiphysics® para la resolución.

El modelo fue posteriormente exportado desde COMSOL Multiphysics® a un fichero con formato Matlab® para extraer el código que permite especificar las ecuaciones de gobierno, las condiciones iniciales y de contorno, y las propiedades físicas mediante programación desde Matlab®.

5.2.1. Algoritmos para la resolución del modelo del proceso

Con el objeto de facilitar el desarrollo del algoritmo para la simulación del proceso de secado intermitente cuando tienen lugar varios ciclos de intermitencia (Figura 5.7), se desarrolló una programación modular de los periodos de calentamiento y reposo. En los Anexos 8.1 y 8.2 se muestra el código en Matlab® de los módulos

para la simulación de cada uno de estos periodos. Estos módulos fueron empleados en las funciones para la simulación del proceso de secado continuo (Anexo 8.3) e intermitente (Anexo 8.4).

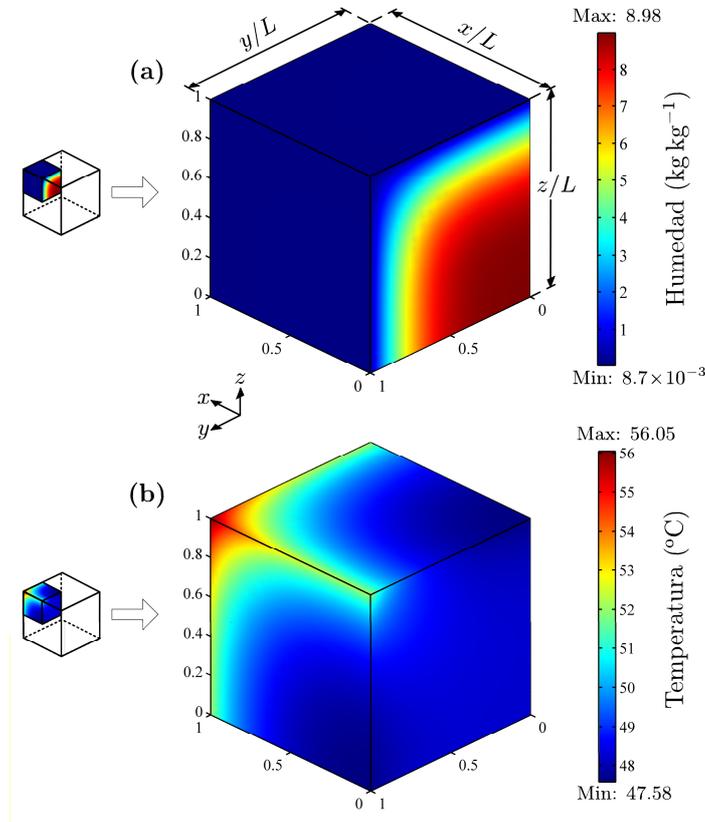


Figura 5.6. Resultado de la modelización mediante COMSOL Multiphysics®. Distribución del contenido de humedad (a) y temperatura (b) en el contorno del sistema transcurrido 2 h de un proceso de secado continuo a una temperatura de calentamiento de 60°C y una velocidad de aire de 3 m s^{-1} .

El módulo de calentamiento (Anexo 8.1), al ser el primero en ejecutarse durante la simulación del proceso, incluye el código que establece las ecuaciones de gobierno junto con las respectivas

condiciones iniciales y de contorno en los modos de aplicación de COMSOL Multiphysics® para difusión y transferencia de calor por conducción (apartado 4.6.1). Tanto el módulo de calentamiento (Anexo 8.1) como el de reposo (Anexo 8.2) incluyen un apartado de “expresiones globales”, donde se especifican, además de las propiedades físicas del producto y del aire húmedo, los números adimensionales empleados para el cálculo de los coeficientes de transferencia interfacial que corresponden a cada caso (transferencia de materia y calor por convección forzada o natural).

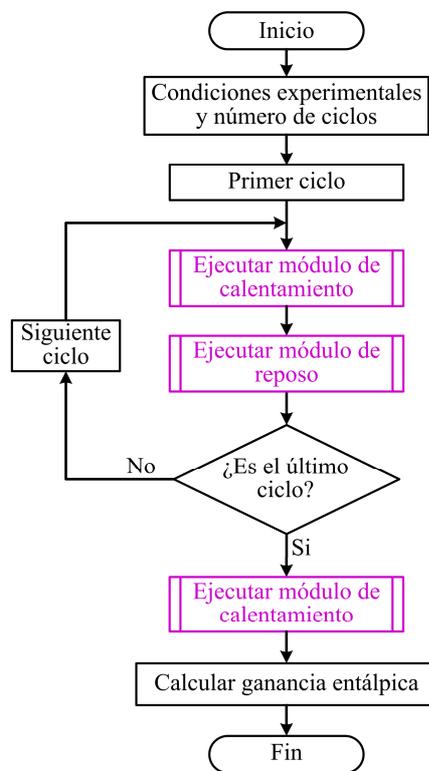


Figura 5.7. Organigrama del algoritmo para la simulación del proceso de secado intermitente.

En la programación de los módulos (Anexos 8.1 y 8.2) se definió la configuración para la solución del problema en COMSOL Multiphysics® para la resolución de cada periodo (apartado “resolver el problema” en los Anexos 8.1 y 8.2). Si la resolución corresponde al primer periodo de calentamiento del proceso de secado intermitente, o al secado continuo, la simulación parte de valores de humedad y temperatura uniformes en toda la muestra (condiciones iniciales del sistema). En los demás casos, cuando la resolución corresponde a los demás periodos de calentamiento o a periodos de reposo, la simulación parte del resultado de la distribución de humedades y temperaturas de la solución anterior. En el caso del último periodo de calentamiento también se establece si el criterio de finalización es la humedad final deseada o la duración total del proceso.

Cada módulo (Anexos 8.1 y 8.2), una vez completada la resolución, devuelve como resultado la evolución del flujo de ganancia entálpica, junto con la evolución de los contenidos de humedad y las temperaturas del producto para el valor promedio de la muestra, el valor promedio de la superficie y el valor en el centro del cubo.

En las funciones para la simulación del proceso de secado continuo (Anexo 8.3) e intermitente (Anexo 8.4) se ejecutan los módulos dependiendo de las condiciones experimentales del proceso, el número de ciclos de intermitencia y la duración de cada uno de los periodos. Asimismo, se organizan los resultados de los módulos y se calcula la función objetivo empleada en la optimización del proceso.

Al aplicar las funciones para la simulación del proceso (Anexos 8.3 y 8.4), una solución (o iteración en el caso de la optimización) demandó un tiempo de cálculo entre 5 y 36 min en un servidor (Windows Server 2003 R2 Standard x64 Edition, Intel Core 2 Quad CPU 2.67 GHz, 8 GB de RAM), dependiendo del tipo de secado (continuo o intermitente), la

temperatura de calentamiento (entre 50 y 70 °C) y la velocidad del aire (entre 2 y 4 m s⁻¹).

5.2.2. Algoritmos para la identificación paramétrica

Tal como ha sido descrito en la metodología (apartado 4.4.4), la identificación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva se realizó empleando simultáneamente cinéticas de secado de experiencias en diferentes condiciones.

En el algoritmo desarrollado (Figura 5.8) se estableció inicialmente la ubicación de los ficheros que contienen la información experimental de las experiencias que son utilizadas en la identificación paramétrica. El modelo fue posteriormente resuelto a las condiciones experimentales almacenadas en cada uno de los ficheros, y a partir de los resultados simulados y los valores experimentales se determinaron los criterios de ajuste f_W (Ec. 4.4.5) y f_T (Ec. 4.4.6).

Una vez completada la solución para la totalidad de ficheros de las experiencias se calculó la función objetivo f_D (Ec. 4.4.7). La función `fmincon` de Matlab® controló el bucle de iteración (Figura 5.8) que determina la combinación de parámetros que minimizan f_D y con la cual el modelo representa adecuadamente la información experimental.

En los Anexos 8.5 y 8.7 se muestran las funciones programadas en Matlab® para el cálculo de la función objetivo f_D y para la identificación de los parámetros, respectivamente.

5.2.3. Algoritmos para la optimización del proceso

La resolución del problema de optimización en procesos de secado intermitente fue desarrollada de acuerdo al algoritmo de la Figura 5.9.

En cada problema de optimización se fijaron como características del producto los valores promedio de aquellas correspondientes a las experiencias de secado (Tabla 4.1).

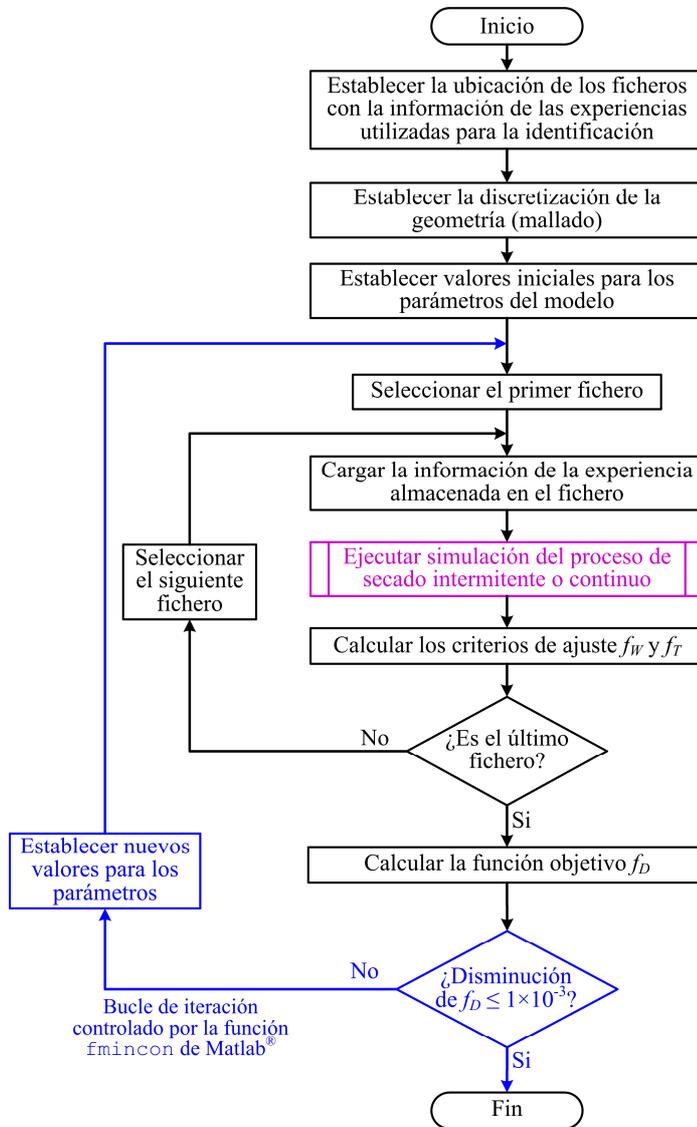


Figura 5.8. Organigrama del algoritmo para la identificación de los parámetros del modelo

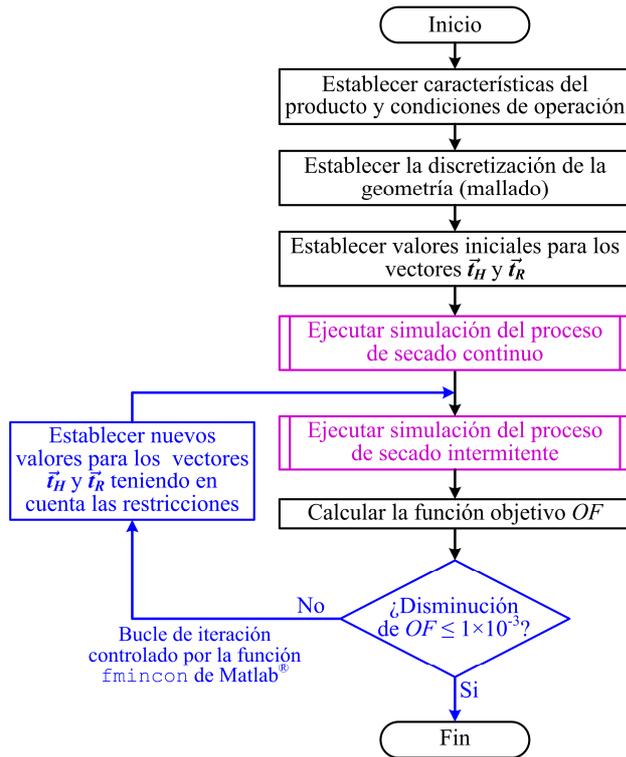


Figura 5.9. Organigrama del algoritmo para la optimización del proceso de secado intermitente.

A partir de las características del producto fue resuelto el problema de optimización a cada una de las condiciones de operación consideradas (de uno a tres ciclos de intermitencia, a temperaturas de calentamiento de 50, 60 y 70 °C, y velocidades de aire de 2, 3 y 4 m s⁻¹).

Tal como se indica en la Figura 5.9, se ejecutó la simulación del proceso de secado continuo luego de establecer las características del producto, las condiciones de operación, la discretización de la geometría y los valores iniciales para los vectores de los periodos de calentamiento y reposo.

Para reducir el tiempo de cálculo, se realizó una única discretización de la geometría que luego fue empleada tanto en la simulación del proceso de secado continuo como en las simulaciones de los procesos del secado intermitente que se ejecutan dentro del bucle de iteración.

La previa simulación del proceso de secado continuo permite el cálculo de las restricciones (Ec. 4.5.12) para la resolución del problema de optimización, además de la comparación con los resultados del secado intermitente.

La función `fmincon` de Matlab® controló el bucle de iteración dentro del cual se ejecuta la simulación del proceso de secado intermitente y se calcula la función objetivo OF (Ec. 4.5.10). La búsqueda de los valores para los vectores de los periodos de calentamiento y reposo que minimizan OF es realizada por `fmincon` teniendo en cuenta las restricciones del problema (Ec. 4.5.12).

En los Anexos 8.6 y 8.8 se muestran las funciones programadas en Matlab® para el cálculo de la función objetivo OF y para la optimización del proceso de secado intermitente, respectivamente.

5.3. Experiencias de secado

5.3.1. Materia prima

Los frutos de mango seleccionados para las experiencias de secado presentaron un peso promedio de 368 ± 24 g, un contenido de pulpa promedio del 88.4 ± 0.8 % (b.h.), y dimensiones promedio de 10.7 ± 0.6 , 7.6 ± 0.5 y 8.2 ± 0.4 cm, para el largo, el diámetro mínimo y el diámetro máximo, respectivamente. Los valores promedio para el contenido de sólidos solubles, la acidez titulable y el contenido de humedad inicial de la totalidad de los frutos empleados en las experiencias, según los métodos oficiales 942.12, 932.14C y 934.06 de la AOAC (1997), fueron 11.6 ± 1 % (°Brix), 0.64 ± 0.09 % (ácido málico) y 9.3 ± 2.2 kg kg⁻¹ b.s., respectivamente.

5.3.2. Cinéticas de secado

Tanto en la identificación de parámetros como en la validación del modelo de la difusividad efectiva fue empleada información experimental de cinéticas de secado continuo e intermitente de cubos de mango (25 mm de lado) a diferentes temperaturas de calentamiento y diferentes velocidades. Cada una de las Figuras 5.10, 5.11 y A9.1-A9.4 (Anexo 9) muestra 40 puntos experimentales de dichas cinéticas. La identificación y validación se realizó con la totalidad de los puntos experimentales (registros de la humedad promedio y la temperatura en el centro del cubo cada 2 min hasta la finalización del ensayo). En todas las gráficas se utiliza el contenido de humedad adimensional promedio (\bar{W}/W_0) con el propósito de facilitar la representación de los datos experimentales en muestras de diferente humedad inicial.

En la Figuras 5.10–5.11 se muestra la evolución de la humedad adimensional promedio y la temperatura en el centro del cubo a temperaturas de calentamiento de 45, 50, 55, 60 y 65 °C, y velocidad de aire de 4 m s⁻¹, para las experiencias de secado continuo e intermitente empleadas en el ajuste del modelo.

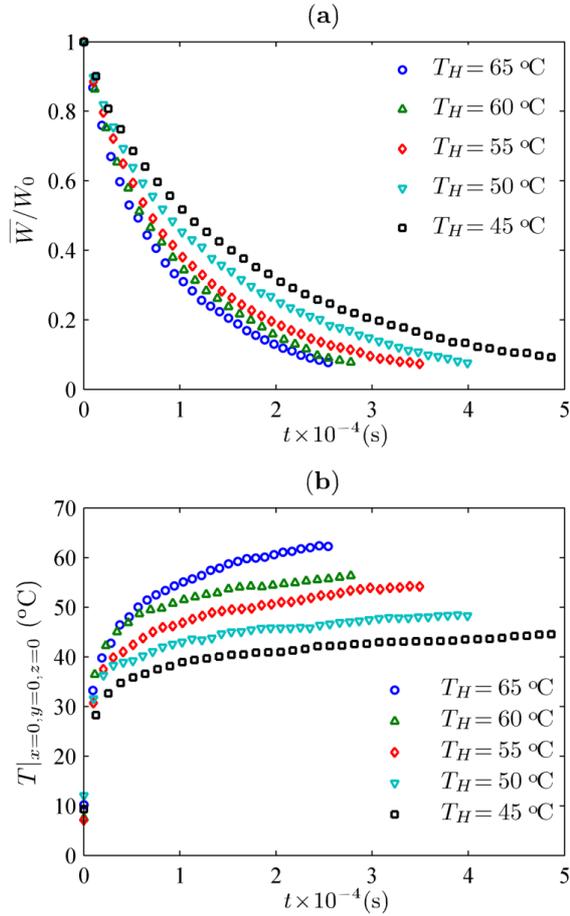


Figura 5.10. Experiencias de secado continuo empleadas en la identificación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva (Tabla 4.2, grupo 1). Evolución del contenido de humedad adimensional promedio (a) y de la temperatura en el centro del cubo (b) a temperaturas de calentamiento (T_H) de 45, 50, 60 y 65 °C y una velocidad (v_∞) de 4 m s⁻¹.

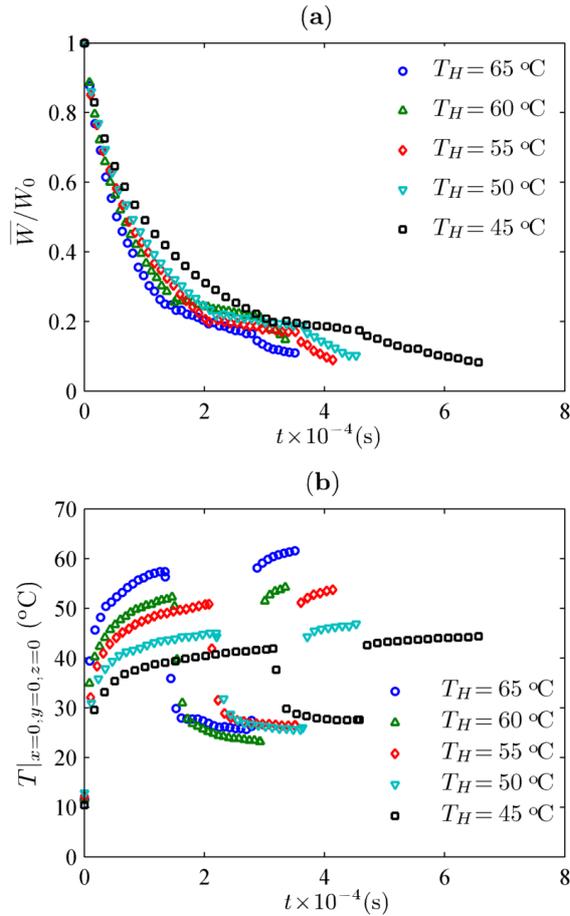


Figura 5.11. Experiencias de secado intermitente empleadas en la identificación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva (Tabla 4.2, grupo 2). Evolución del contenido de humedad adimensional promedio (a) y de la temperatura en el centro del cubo (b) a temperaturas de calentamiento (T_H) de 45, 50, 55, 60 y 65 °C y velocidad de aire (v_∞) de 4 m s⁻¹.

Por otro lado, las Figuras A9.1–A9.4 (Anexo 9), correspondientes a las experiencias de secado intermitente empleadas en la validación, muestran la evolución de la humedad adimensional promedio y la

temperatura en el centro del cubo a temperaturas de calentamiento entre 45 y 70 °C, y velocidades de aire entre 2 y 4 m s⁻¹.

Todas las cinéticas siguieron un comportamiento propio del secado de productos agroalimentarios, es decir, a mayores temperaturas de calentamiento la velocidad de secado se incrementó, con la consiguiente reducción del tiempo del proceso. La temperatura en el centro de las muestras siguió una tendencia hacia el valor de la temperatura de calentamiento, con un incremento considerable al inicio del proceso cuando es mayor el gradiente entre las temperaturas del aire y del material. La evolución de la temperatura fue similar en las experiencias de secado continuo e intermitente.

En el periodo de reposo de las experiencias de secado intermitente las condiciones aún favorecen la pérdida de humedad en el material, la cual es mayor al inicio de los periodos de reposo cuando la temperatura del producto comienza a disminuir. Sin embargo, esta pérdida de humedad ocurre a una velocidad considerablemente menor que en los periodos de calentamiento al estar regida por fenómenos de transferencia por convección natural. En este periodo, la temperatura del material tiende rápidamente al valor de la temperatura de reposo (temperatura ambiente).

5.4. Identificación paramétrica y validación del modelo

Una vez completada la formulación del modelo propuesto con las ecuaciones de las propiedades del mango, se realizó la identificación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva a través del ajuste del modelo del proceso a cinéticas de experiencias de secado continuo e intermitente, a temperaturas de calentamiento de 45, 50, 55, 60 y 65 °C, y velocidades de aire de 4 m s⁻¹, según la metodología descrita en el apartado 4.4.4.

La bondad de los parámetros fue validada con un grupo de experimentos independiente a los empleados en la identificación de los parámetros, el cual incluía experiencias de secado intermitente a temperaturas de calentamiento entre 45 y 70 °C, y velocidades de aire de 2, 3 y 4 m s⁻¹.

5.4.1. Identificación paramétrica de la difusividad efectiva

Con el propósito de identificar el modelo de la difusividad efectiva, el cual fue definido como una función de tres parámetros (Ec. 4.4.1) en términos de la humedad y la temperatura, se llevó a cabo el procedimiento de identificación descrito en el apartado 4.4.4.

De forma implícita, la metodología desarrollada permite que los parámetros del modelo de la difusividad efectiva, identificados mediante el ajuste del modelo del proceso a las cinéticas de secado continuo e intermitente, sean independientes de las condiciones de operación de las experiencias empleadas en el ajuste, tras haber asumido que tales parámetros dependían de las características del producto (al ser la difusividad una propiedad del material), y no de la

temperatura o velocidad del aire, o de la duración u ocurrencia de la intermitencia.

Los valores de los parámetros α_1 , α_2 y α_3 del modelo de la difusividad efectiva (Ec. 4.4.1) fueron $2.933 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, $3.892 \times 10^4 \text{ kJ kmol}^{-1}$ y -1.885×10^{-2} , respectivamente.

Según los parámetros identificados, la influencia del contenido de humedad (W , kg kg^{-1} b.s.) y la temperatura (T_{abs} , K) sobre la difusividad efectiva del mango (D_e , $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$) fue expresada según la Ec. (5.4.1).

$$D_e = 2.933 \times 10^{-3} \exp \left[-\frac{3.892 \times 10^4}{RT_{abs}} \left(\frac{W}{W+1} \right)^{-1.885 \times 10^{-2}} \right] \quad (5.4.1)$$

Los resultados estadísticos indicaron una buena correlación entre los valores estimados y los datos experimentales para la humedad ($VAR > 99.5\%$ y $RMSE < 0.34$) y la temperatura ($VAR > 93.1\%$ y $RMSE < 3.35$) usando la Ec. (5.4.1), para el conjunto de datos empleados en la identificación (Tabla 5.2).

A contenidos de humedad entre 9 y 0.03 kg kg^{-1} b.s., el valor de la difusividad efectiva del mango (Figura 5.12), estimada mediante la Ec. (5.4.1), varía entre 6.14×10^{-11} y $1.86 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a 10°C , y entre 1.35×10^{-9} y $3.37 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a 70°C , respectivamente. Los valores de la difusividad efectiva estuvieron dentro del rango de valores esperados para el secado de materiales alimentarios (Marinos-Kouris & Maroulis, 2006), y son similares a los obtenidos por otros autores en la modelización de cinéticas de secado de láminas de mango de diferentes variedades (Corso et al., 2008; Goyal et al., 2006; Janjai et al., 2008). En el rango de condiciones representadas, los valores de difusividad efectiva abarcan los resultados obtenidos en la modelización de cinéticas de secado de láminas de mango por Corso et al. (2008) (2.30×10^{-10} a $3.28 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), Goyal et al. (2006) (2.62×10^{-10} a

$4.39 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) y Janjai et al. (2008) (8.84×10^{-11} a $1.93 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) en las variedades “Hilacha”, “Dasehari” y “Nam Dok Mai”, respectivamente. Sin embargo, los modelos y consideraciones utilizados por Corso et al. (2008), Goyal et al. (2006) y Janjai et al. (2008) se diferencian notoriamente de los empleados en el presente estudio (apartado 2.3.3).

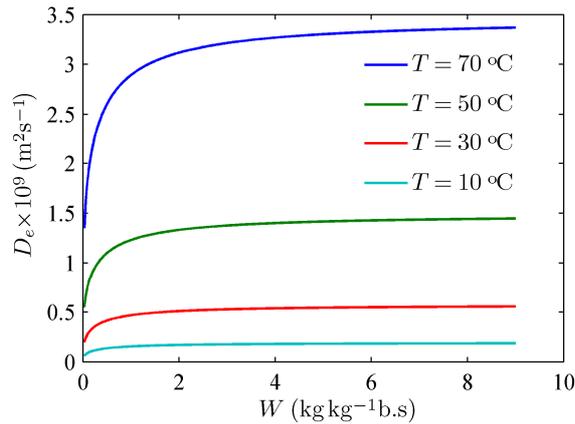


Figura 5.12. Influencia del contenido de humedad (W , $\text{kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$) y la temperatura (T , $^{\circ}\text{C}$) sobre la difusividad efectiva (D_e , $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$). Valores estimados a partir del modelo identificado para la difusividad efectiva (Ec. 5.4.1).

Tal como se ha comentado (Figura 5.12), la difusividad efectiva en mango está influenciada por el contenido de humedad y la temperatura. A temperatura constante, la influencia de la humedad es mayor a valores menores a $1 \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$ (Figura 5.12). Así, a una temperatura de $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ la difusividad efectiva presenta una variación de $3.13 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ($\sim 16.9\%$) para el rango de humedades comprendido entre 1 y $9 \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$, mientras que a humedades entre 0.03 y $1 \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$, la variación es de $9.31 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ($\sim 60.3\%$). A una temperatura de $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$, la difusividad efectiva presenta una variación de $4.76 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

(~14.1 %) a contenidos de humedad entre 1 y 9 kg kg⁻¹ b.s., en comparación con una variación de 1.54×10⁻⁹ m² s⁻¹ (~53.3 %) a contenidos de humedad entre 0.03 y 1 kg kg⁻¹ b.s. Así pues, parece necesario considerar la variación de la difusividad efectiva en función de la humedad a bajos valores de esta.

En el modelo de la difusividad efectiva (Ec. 5.4.1), la energía de activación es el término que incluye la dependencia del contenido de humedad. Tal como se muestra en la Figura 5.13, la energía de activación presentó valores entre 39 y 41.6 kJ mol⁻¹ a contenidos de humedad entre 9 y 0.03 kg kg⁻¹ b.s., respectivamente. Estos valores están dentro del rango de aquellos reportados para productos agroalimentarios (Marinos-Kouris & Maroulis, 2006).

La energía de activación, al reflejar la influencia del contenido de humedad, presenta mayor variación con esta variable por debajo de 1 kg kg⁻¹ b.s. (Figura 5.13), mostrando una variación de 0.43 kJ mol⁻¹ (~1.1 %), para humedades entre 1 y 9 kg kg⁻¹ b.s., y de 2.17 kJ mol⁻¹ (~5.5 %), para humedades entre 0.03 y 1 kg kg⁻¹ b.s.

Con el fin de identificar los parámetros α_1 , α_2 y α_3 del modelo de la difusividad efectiva (Ec. 4.4.1) fue resuelto el problema de optimización multiobjetivo de la Ec. (4.4.7), considerando simultáneamente la información experimental de 10 experiencias de secado (Tabla 4.2, grupos 1 y 2), las cuales incluían cinco experiencias para cada tipo de proceso (secado continuo e intermitente), a temperaturas de calentamiento de 45, 50, 55, 60 y 65 °C, y velocidades de aire de 4 m s⁻¹.

La Tabla 5.2 muestra los resultados de los estadísticos en la identificación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva, los cuales presentaron valores de *VAR* mayores al 99.5 % y valores de *RMSE* menores a 0.34, en el ajuste de las humedades medias; y valores

de VAR mayores al 93.1 % y valores de $RMSE$ menores a 3.35, en el ajuste de las temperaturas en el centro de las muestras.

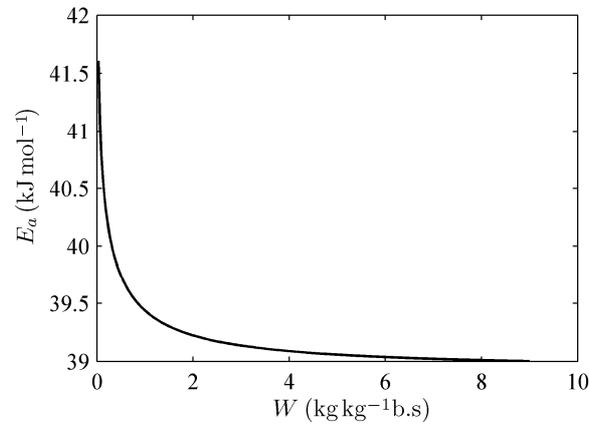


Figura 5.13. Influencia del contenido de humedad (W , kg kg^{-1} b.s.) sobre la energía de activación (E_a , kJ mol^{-1}). Valores estimados a partir de modelo de la difusividad efectiva (Ec. 5.4.1).

Tabla 5.2. Resultados estadísticos de la identificación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva.

Experiencias	v_∞ (m s^{-1})	T_H ($^\circ\text{C}$)	Contenido de humedad promedio		Temperatura en el centro	
			$RMSE$	VAR (%)	$RMSE$	VAR (%)
Secado continuo (Tabla 4.2, grupo 1)	4	45	0.089	99.8	1.128	95.7
		50	0.243	99.9	2.489	93.1
		55	0.214	99.9	1.953	95.2
		60	0.333	99.8	1.519	97.9
		65	0.161	99.9	1.808	97.8
Secado intermitente (Tabla 4.2, grupo 2)	4	45	0.145	99.9	2.086	94.5
		50	0.212	99.9	1.919	96.1
		55	0.187	99.7	2.459	95.1
		60	0.141	99.9	2.846	96.5
		65	0.279	99.5	3.350	96.3

En todos los ajustes los estadísticos VAR y $RMSE$ presentaron mejores resultados en la humedad que en la temperatura. En el ajuste de la temperatura en el centro de las muestras, la mayor diferencia entre los datos experimentales y estimados se presentó al inicio del proceso y durante los periodos de reposo del secado intermitente. Esta desviación sería producto de las simplificaciones y consideraciones usadas en la formulación del modelo del proceso.

En las Figuras 5.14 y 5.15 se muestran el resultado de la identificación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva. Las gráficas presentan valores estimados y experimentales del contenido de humedad adimensional promedio y de la temperatura en el centro del cubo en procesos de secado continuo (Figura 5.14) e intermitente (Figura 5.15) a temperaturas de calentamiento (T_H) de 45, 55 y 65 °C, a una velocidad de aire (v_∞) de 4 m s⁻¹.

Las experiencias de secado intermitente usadas en la identificación de parámetros (Tabla 4.2, grupos 1 y 2) emplearon un amplio rango de velocidades de aire: durante los periodos de calentamiento el aire fluía a la mayor velocidad empleada en los experimentos (4 m s⁻¹), mientras que durante los periodos de reposo el aire prácticamente no fluía (0 m s⁻¹). La combinación de velocidades (0 y 4 m s⁻¹), temperaturas de calentamiento (45, 50, 55, 60 y 65 °C) y duración de los periodos, permitió que la información experimental presentara suficiente variabilidad para que los parámetros α_1 , α_2 y α_3 identificados en el modelo de la difusividad efectiva (Ec. 4.4.1) fueran independientes de las condiciones experimentales.

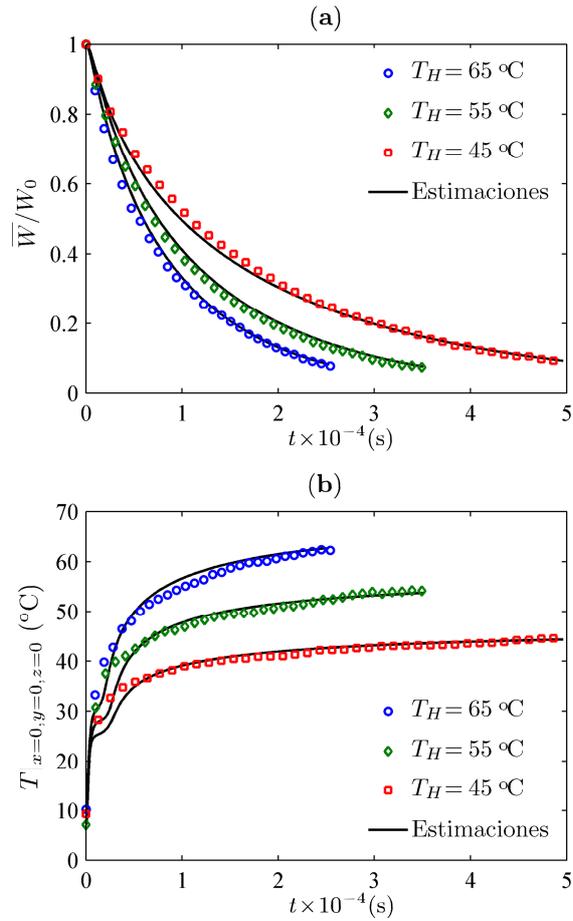


Figura 5.14. Resultados de la identificación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva en experiencias de secado continuo (Tabla 4.2, grupo 1) a temperaturas de calentamiento (T_H) de 45, 55 y 65 °C, y velocidad de aire (v_∞) de 4 m s⁻¹. Valores experimentales y estimados del contenido de humedad adimensional promedio (a) y de la temperatura en el centro de las muestras (b).

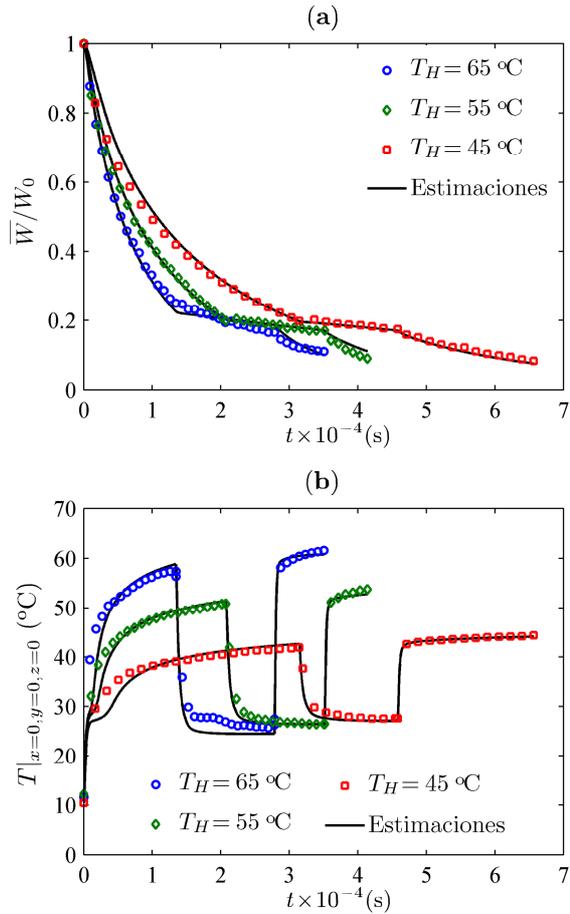


Figura 5.15. Resultados de la identificación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva en experiencias de secado intermitente (Tabla 4.2, grupo 2) a temperaturas de calentamiento (T_H) de 45, 55 y 65 °C, y velocidad de aire (v_∞) de 4 m s⁻¹. Valores experimentales y estimados del contenido de humedad adimensional promedio (a) y de la temperatura en el centro de las muestras (b).

5.4.2. Validación del modelo difusivo

El modelo fue validado a diferentes condiciones de operación mediante experiencias de secado intermitente, diferentes a las empleadas en la identificación de los parámetros, a temperaturas de calentamiento entre 45 y 70 °C, y velocidades de aire entre 2 y 4 m s⁻¹.

Los resultados indicaron que el modelo del proceso describe adecuadamente la información experimental en el conjunto de datos empleados en la validación del modelo, tal como lo muestran los estadísticos *VAR* y *RMSE* en la Tabla 5.3. Los resultados presentaron valores de *VAR* mayores al 99.7 % y valores de *RMSE* menores a 0.46, en el ajuste de las humedades medias; y valores de *VAR* mayores al 91.1 % y valores de *RMSE* menores a 5.87, en el ajuste de las temperaturas en el centro de las muestras.

En las Figuras 5.16 y 5.17 se muestra el resultado de la validación del modelo a partir de valores experimentales y estimados del contenido de humedad adimensional promedio y de la temperatura en el centro del cubo en procesos de secado intermitente a temperaturas de calentamiento (T_H) entre 45 y 70 °C, y velocidades de aire (v_∞) de 4 y 3 m s⁻¹ (Tabla 4.2, grupos 3 y 5). En las Figuras A10.1 y A10.2 (Anexo 10) se muestran los valores experimentales y estimados del contenido de humedad adimensional promedio y de la temperatura en el centro del cubo para el resto de las experiencias empleadas en la validación, las cuales incluyen experiencias de secado intermitente a temperaturas de calentamiento (T_H) entre 45 y 70 °C, y velocidades de aire (v_∞) de 4 y 2 m s⁻¹ (Tabla 4.2, grupos 4 y 6).

Tabla 5.3. Resultados estadísticos de la validación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva.

Experiencias	v_{∞} (m s ⁻¹)	T_H (°C)	Contenido de humedad promedio		Temperatura en el centro	
			RMSE	VAR (%)	RMSE	VAR (%)
Secado intermitente (Tabla 4.2, grupo 3)	4	45	0.214	99.8	1.053	98.4
		50	0.453	99.7	2.247	94.3
		55	0.241	99.9	2.235	97.4
		60	0.247	99.7	2.731	96.7
		65	0.257	99.8	2.785	97.9
Secado intermitente (Tabla 4.2, grupo 4)	4	45	0.205	99.7	3.043	94.7
		50	0.389	99.8	2.580	91.3
		55	0.335	99.8	4.055	97.5
		60	0.293	99.9	3.272	97.2
		65	0.262	99.9	1.755	93.4
Secado intermitente (Tabla 4.2, grupo 5)	3	50	0.245	99.8	5.533	98.2
		60	0.375	99.8	2.619	96.1
		70	0.126	99.8	3.940	96.9
Secado intermitente (Tabla 4.2, grupo 6)	2	50	0.094	99.9	2.451	95.4
		60	0.217	99.8	4.973	95.2
		70	0.138	99.9	5.869	91.1

Al igual que en la identificación de los parámetros, todos los ajustes usados en la validación presentaron mejores resultados en la humedad que en la temperatura. En el ajuste de la temperatura en el centro de las muestras, la mayor diferencia entre los datos experimentales y estimados se presentó también al inicio del proceso y durante los periodos de reposo del secado intermitente.

Aunque la modelización se realizó empleando información experimental de cinéticas de secado a una velocidad de 4 m s⁻¹, la validación a experiencias de secado a 2 y 3 m s⁻¹ presentó resultados similares, lo cual es un indicativo de la independencia de los

parámetros identificados respecto a las condiciones experimentales empleadas en las experiencias de secado.

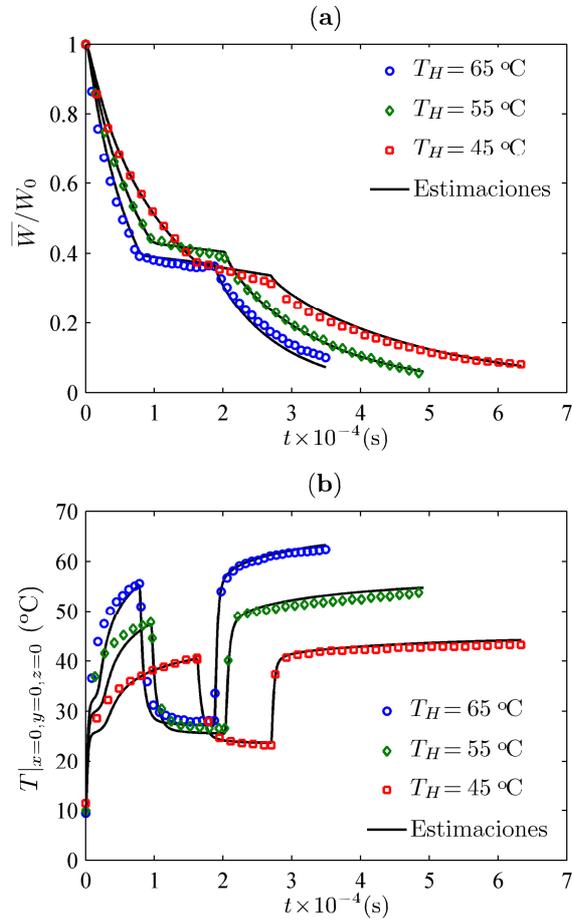


Figura 5.16. Resultados de la validación del modelo de la difusividad efectiva en experiencias de secado intermitente (Tabla 4.2, grupo 3) a temperaturas de calentamiento (T_H) de 45, 55 y 65 °C, y velocidad de aire (v_∞) de 4 m s⁻¹. Valores experimentales y estimados del contenido de humedad adimensional promedio (a) y de la temperatura en el centro de las muestras (b).

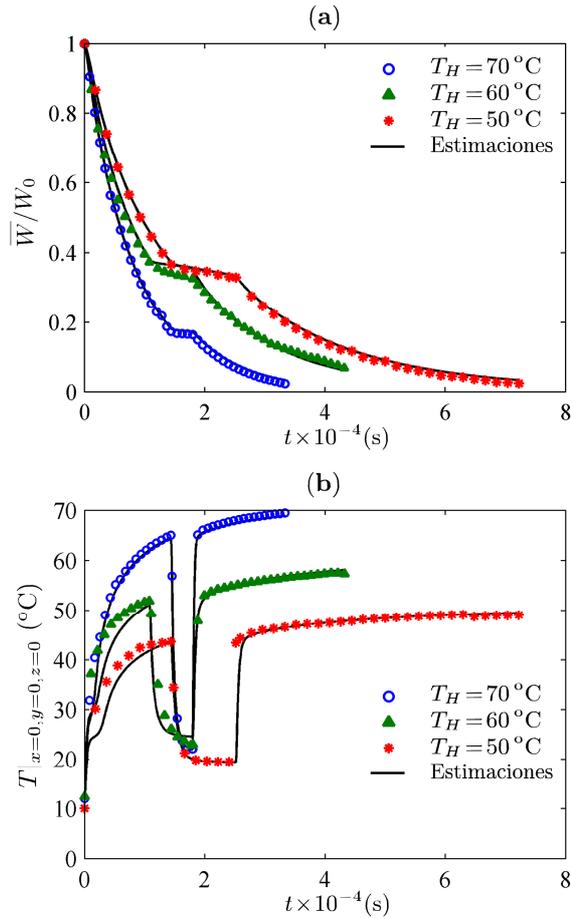


Figura 5.17. Resultados de la validación del modelo de la difusividad efectiva en experiencias de secado intermitente (Tabla 4.2, grupo 5) a temperaturas de calentamiento (T_H) de 50, 60 y 70°C , y velocidad de aire (v_∞) de 3 m s^{-1} . Valores experimentales y estimados del contenido de humedad adimensional promedio (a) y de la temperatura en el centro de las muestras (b).

5.5. Influencia de las condiciones de operación sobre la cinética del proceso

A partir del modelo identificado y validado se analizó la influencia de las condiciones de operación sobre la cinética del proceso de secado intermitente durante los periodos de calentamiento y reposo. Las simulaciones se realizaron considerando las características del producto y la actividad de agua del aire de acuerdo a los valores promedio mostrados en la Tabla 4.1.

Al igual que en el secado continuo, durante los periodos de calentamiento el proceso se desarrolla a condiciones de operación constantes. Es durante los periodos de calentamiento donde tiene lugar la mayor pérdida de humedad en el material, la cual depende de las condiciones del aire de secado y de la disponibilidad de agua en el producto para ser evaporada. Como representación de los periodos de calentamiento se analizó la influencia de la velocidad del aire y la temperatura de calentamiento sobre la velocidad de secado en procesos de secado continuo, dentro del rango de condiciones consideradas en este estudio. Las simulaciones se realizaron hasta una humedad final de 0.3 kg kg^{-1} (b.s.).

En la Figura 5.18 se muestra la influencia de la temperatura de calentamiento sobre la velocidad de secado en procesos de secado continuo a una velocidad de aire (v_{∞}) de 3 m s^{-1} . En la Figura 5.19 se muestra la influencia de la velocidad de aire (v_{∞}) sobre la velocidad de secado en procesos de secado continuo a una temperatura de calentamiento de (T_H) $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

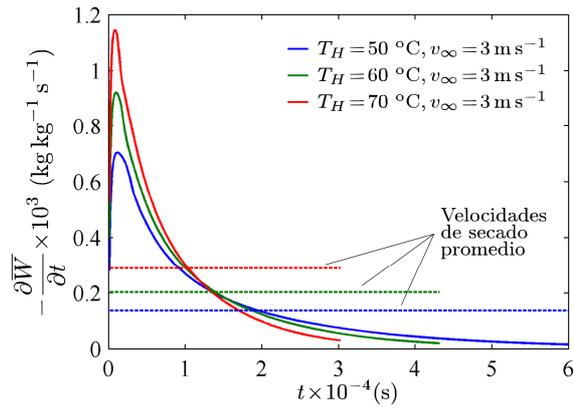


Figura 5.18. Influencia de la temperatura de calentamiento (T_H , °C) sobre la velocidad de secado ($-\frac{\partial W}{\partial t}$, $\text{kg kg}^{-1} \text{s}^{-1}$). Valores estimados para procesos de secado continuo a una velocidad de aire (v_∞) de 3 m s^{-1} . Las líneas discontinuas representan la velocidad de secado promedio ($-\frac{1}{t_P} \int_0^{t_P} \frac{\partial W}{\partial t} dt$, $\text{kg kg}^{-1} \text{s}^{-1}$) para cada caso.

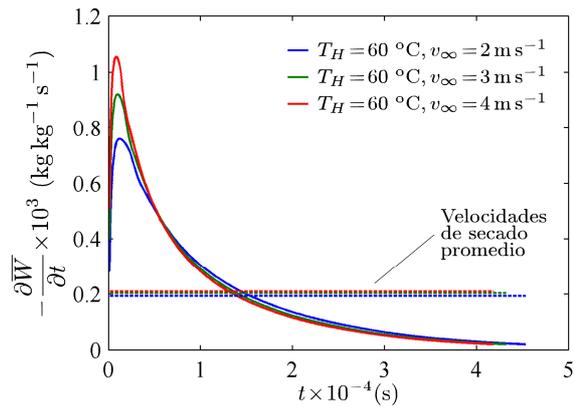


Figura 5.19. Influencia de la velocidad del aire (v_∞ , m s^{-1}) sobre la velocidad de secado ($-\frac{\partial W}{\partial t}$, $\text{kg kg}^{-1} \text{s}^{-1}$). Valores estimados para procesos de secado continuo a una temperatura de calentamiento (T_H) de 60 °C . Las líneas discontinuas representan la velocidad de secado promedio ($-\frac{1}{t_P} \int_0^{t_P} \frac{\partial W}{\partial t} dt$, $\text{kg kg}^{-1} \text{s}^{-1}$) para cada caso.

En ambas figuras (5.18 y 5.19) puede apreciarse que la velocidad de secado al inicio del proceso presenta un comportamiento correspondiente al periodo de inducción (Figura 2.1), en el cual aumenta la velocidad de secado a medida que el producto se adecúa a las condiciones del proceso. El incremento en la velocidad de secado durante este periodo está asociado al efecto que tiene el aumento de la temperatura del producto sobre los mecanismos de transferencia de materia. A partir del valor máximo de velocidad de secado esta disminuye progresivamente mostrando un comportamiento típico del periodo de velocidad decreciente (Figura 2.1).

La velocidad de secado aumentó a mayor temperatura de calentamiento y velocidad de aire, un comportamiento típico del secado de productos agroalimentarios. Para el rango de condiciones representado en la Figura 5.18, la velocidad de secado promedio ($-\frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} \frac{\partial \bar{W}}{\partial t} dt$) mostró una variación de $1.53 \times 10^{-4} \text{ kg kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ entre temperaturas de calentamiento de 50 y 70 °C. Por otro lado, para el rango de condiciones representado en la Figura 5.19, la velocidad de secado promedio mostró una variación de $1.63 \times 10^{-5} \text{ kg kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ entre velocidades de aire de 2 y 4 m s^{-1} . Lo anterior indica que en los rangos de condiciones representados es mayor el efecto de la temperatura de calentamiento que el de la velocidad del aire.

En los procesos de secado intermitente, la aplicación de los periodos de reposo se realiza con el fin de lograr que la redistribución de la humedad en el interior del sólido aumente la disponibilidad de agua en las zonas superficiales, y por consiguiente aumente la velocidad de secado en los periodos de calentamiento posteriores al atemperamiento. Por tanto, se analizó el contenido de humedad en la superficie considerando diferentes condiciones para la duración y

temperatura del aire del periodo de calentamiento, así como para la temperatura del aire durante el periodo de reposo.

Para ilustrar la influencia de la distribución de humedades al inicio del periodo de reposo sobre la redistribución de humedad que se realiza durante el mismo, en la Figura 5.20 se muestra la evolución del contenido de humedad superficial promedio durante periodos de reposo posteriores a periodos de calentamiento de diferente duración. Tal como se observa en la Figura 5.20, tanto el valor máximo de humedad superficial promedio (\overline{W}_S) como el tiempo de reposo necesario para alcanzar este valor dependen de la humedad promedio del producto (\overline{W}).

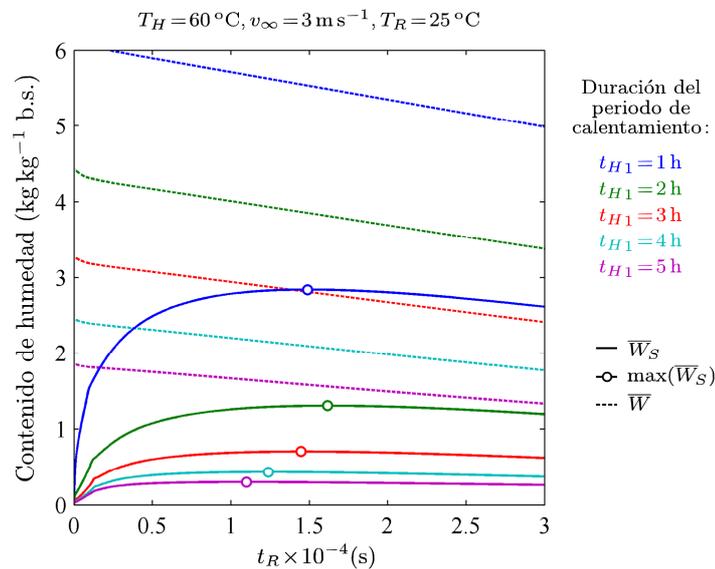


Figura 5.20. Evolución del contenido de humedad superficial promedio (\overline{W}_S) durante periodos de reposo posteriores a periodos de calentamiento de diferente duración (t_{H1}). Valores estimados para periodos de reposo a una temperatura (T_R) de $25\text{ }^\circ\text{C}$, periodos de calentamiento a una temperatura (T_H) de $60\text{ }^\circ\text{C}$, y velocidad de aire (v_∞) de 3 m s^{-1} .

Al aumentar la duración del periodo de calentamiento que precede al periodo de reposo, y por tanto realizar el atemperamiento a partir de contenidos de humedad promedio cada vez menores, el valor máximo que alcanza la humedad superficial promedio disminuye, incluso respecto al contenido de humedad promedio en cada caso. Es así como el valor máximo que alcanza la humedad superficial representa el 51, 34, 25, 20 y 18 % respecto al contenido de humedad promedio de todo el cubo, cuando el periodo de reposo tiene lugar transcurridos 1, 2, 3, 4 y 5 h de calentamiento, respectivamente.

En la Figura 5.21 se muestra el comportamiento de la humedad superficial cuando el proceso de calentamiento, anterior al periodo de reposo, es realizado a diferentes temperaturas, pero considerando que el periodo de reposo inicia tras haber alcanzado un mismo contenido de humedad promedio ($4.5 \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$). Como puede observarse, existe poca diferencia entre los contenidos de humedad superficial a 50 y 70 °C, y tal diferencia permanece a medida que transcurre el atemperamiento con un comportamiento similar al de los valores del contenido de humedad promedio.

No se apreció diferencia entre los valores de humedad superficial al representar gráficamente la evolución del contenido de humedad superficial promedio en periodos de reposo posteriores a periodos de calentamiento realizados a una temperatura de 60 °C y velocidades de aire de 2 y 4 m s^{-1} .

Para analizar el efecto de las condiciones de operación durante el periodo de reposo, en la Figura 5.22 se evalúa la influencia de la temperatura sobre la redistribución de humedad durante el atemperamiento. La humedad absoluta del aire de secado se considera igual en todos los casos y su valor corresponde con una actividad de agua de 0.6 a 25 °C (Tabla 4.1).

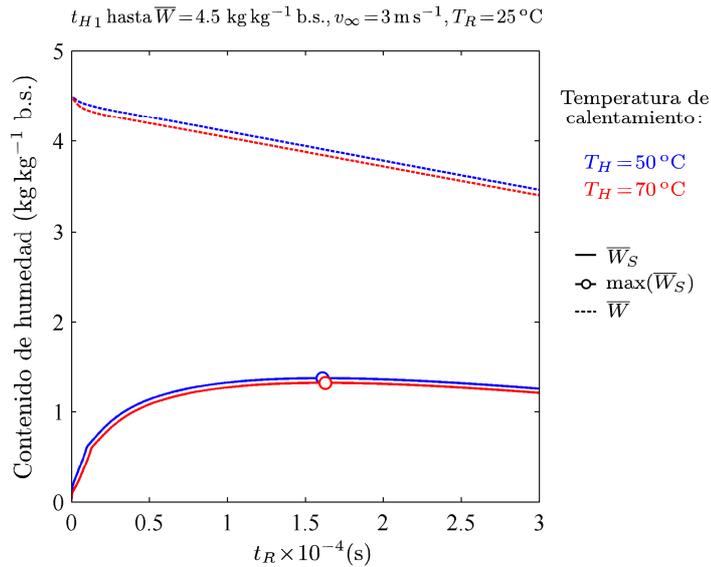


Figura 5.21. Evolución de la humedad superficial durante periodos de reposo posteriores a periodos de calentamiento realizados a diferentes temperaturas (T_H). Valores estimados para periodos de reposo a una temperatura (T_R) de 25 °C, periodos de calentamiento a una temperatura (T_H) de 60 y 70 °C, y velocidad de aire (v_{∞}) de 3 m s⁻¹, donde la humedad promedio del producto (\bar{W}) se ha reducido un 50 % (4.5 kg kg⁻¹ b.s.).

En la Figura 5.22 puede observarse cómo a menores temperaturas de reposo es mayor el contenido de humedad superficial promedio. Esto indica que a mayor temperatura la transferencia de materia por convección natural en la interfase sólido-aire es mayor y por consiguiente el producto continúa deshidratándose y se acumula menos humedad en la superficie. El valor máximo que alcanza la humedad superficial, representa el 56, 35 y 23 % respecto al contenido de humedad promedio de todo el cubo, cuando el periodo de reposo se realiza a una temperatura de 20, 25 y 30 °C, respectivamente.

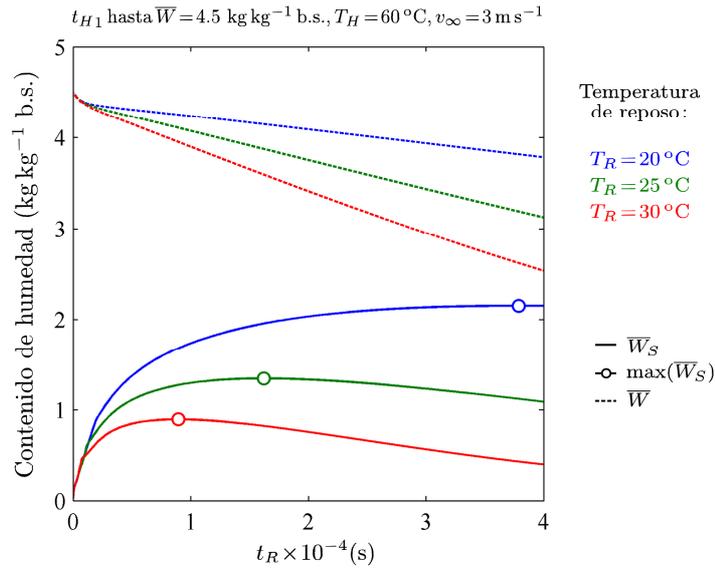


Figura 5.22. Evolución del contenido de humedad superficial promedio (\bar{W}_s) durante periodos de reposo realizados a diferentes temperaturas (T_R). Valores estimados para periodos de reposo posteriores a un periodo de calentamiento a una temperatura (T_H) de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ y una velocidad de aire (v_∞) de 3 m s^{-1} , donde la humedad promedio del producto (\bar{W}) se ha reducido un 50% ($4.5 \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$).

Como ha podido apreciarse en las Figuras 5.20, 5.21 y 5.22 la humedad superficial que se alcanza durante los periodos de reposo depende principalmente de la distribución de humedades al inicio del atemperamiento y de las condiciones durante el mismo. Si las condiciones durante el periodo de reposo se asumen constantes, por ejemplo igual a las condiciones ambientales, es lógico pensar que la determinación de tiempos de duración adecuados para los periodos de calentamiento y reposo permitiría controlar la difusión de agua hacia la superficie durante el atemperamiento, con el consiguiente efecto sobre la cinética del proceso.

5.6. Análisis del proceso de secado intermitente: Optimización

Dado que se ha obtenido y validado un modelo que describe adecuadamente la intermitencia en las condiciones de secado, resulta interesante utilizarlo para analizar aspectos que puedan influir en el resultado del proceso. Cabe pensar que se puedan determinar a partir de diferentes criterios la duración de los periodos de calentamiento y reposo, para lo cual puede ser útil definir un problema de optimización.

El problema de optimización del proceso de secado intermitente (Ec. 4.5.11–4.5.15) fue definido como la búsqueda de los tiempos de duración de cada periodo de calentamiento y reposo, que minimizaran la ganancia entálpica media del producto ponderada por la ganancia entálpica máxima (Ec. 4.5.10).

Los resultados de la optimización, considerando diferentes ciclos de intermitencia, temperaturas de calentamiento y velocidades de aire, fueron comparados con simulaciones del proceso de secado continuo a iguales condiciones con el fin de resaltar las ventajas del proceso de secado intermitente, en cuanto a disminución de la ganancia entálpica y el tiempo de calentamiento.

5.6.1. Duración óptima de los periodos de calentamiento y reposo

A continuación se presentan los resultados de la optimización del secado intermitente, utilizando el modelo del proceso previamente ajustado y validado.

En la Tabla 5.4 se muestran las soluciones de los problemas de optimización para procesos de secado intermitente de uno a tres ciclos

a temperaturas de calentamiento de 50, 60 y 70 °C, y velocidades de 2, 3 y 4 m s⁻¹. Los resultados suministran valores óptimos para la duración de cada periodo de calentamiento y reposo que minimizan la función objetivo (ganancia entálpica media ponderada por la ganancia entálpica máxima) definida según la Ec. (4.5.10), cumpliéndose las restricciones al tiempo de calentamiento y a la duración del proceso establecidas en la Ec. (4.5.12).

Aunque pueden existir diferentes combinaciones de tiempos de calentamiento y reposo que permitan obtener el mismo resultado de la función objetivo (mínimos relativos), los resultados de la optimización (Tabla 5.4) se ciñen a las restricciones impuestas al problema y al método de resolución empleado por la función `fmincon` de Matlab®.

En todos los casos (Tabla 5.4), el primer periodo de calentamiento presentó la menor duración (entre el 1.4 y el 14.5 % con respecto al tiempo total de calentamiento) y el último periodo de calentamiento la mayor duración (entre el 51.8 y el 68.7 %). Así, la duración del último periodo de calentamiento, correspondiente a más de la mitad de la duración de todo el proceso, indica que la intermitencia tuvo lugar en el transcurso de la primera mitad de la operación.

Partiendo del hecho de que la minimización de la ganancia entálpica busca la mayor efectividad del atemperamiento mediante la duración y ocurrencia de los periodos de reposo (limitadas por las restricciones del problema de optimización), estos pudieron localizarse en el instante del proceso donde la migración de agua desde el interior hacia la superficie ocurre con mayor facilidad.

La duración de los periodos de calentamiento y reposo varía a medida que transcurre el proceso (Tabla 5.4), presentando diferencias entre el 41.3 y el 67 % entre periodos de calentamiento, y entre el 0.9 y el 13.6 % entre periodos de reposo de un mismo proceso.

Tabla 5.4. Resultados de la optimización del proceso de secado intermitente a diferentes temperaturas de calentamiento (T_H), velocidades de aire (v_∞) y número de ciclos de intermitencia (N). Los valores entre paréntesis son el porcentaje de la duración del periodo con respecto a la duración total del proceso.

T_H (°C)	v_∞ (m s ⁻¹)	N	Duración de los periodos de calentamiento y reposo (h)							
			t_{H_1}	t_{R_1}	t_{H_2}	t_{R_2}	t_{H_3}	t_{R_3}	t_{H_4}	
50	3	1	2.1 (9.3 %)	6.4 (28.6 %)	14 (62.1 %)					
		4	2	0.9 (3.9 %)	3.4 (15 %)	0.7 (3.1 %)	2.9 (12.9 %)	14.7 (65 %)		
		3	0.4 (1.6 %)	3.1 (13.6 %)	0.5 (2.1 %)	2 (8.8 %)	0.5 (2.3 %)	1 (4.3 %)	15.2 (67.2 %)	
	3	1	3.1 (13.4 %)	6.7 (29.1 %)	13.3 (57.5 %)					
		2	1.8 (7.6 %)	4.9 (21.2 %)	2 (8.4 %)	1.8 (7.6 %)	12.8 (55.1 %)			
		3	0.3 (1.5 %)	2.4 (10.2 %)	1 (4.5 %)	1.9 (8.4 %)	1.7 (7.2 %)	2 (8.8 %)	13.8 (59.4 %)	
		1	3.5 (14.5 %)	7.1 (29.7 %)	13.4 (55.8 %)					
		2	2	1.2 (5.1 %)	2.5 (10.6 %)	3.3 (13.6 %)	4.5 (18.9 %)	12.5 (51.8 %)		
		3	0.3 (1.4 %)	1.9 (7.9 %)	1.2 (5.2 %)	1.8 (7.7 %)	0.4 (1.7 %)	2.2 (9.5 %)	15.5 (66.4 %)	
		1	1.2 (8.1 %)	4 (26.5 %)	9.9 (65.3 %)					
		4	2	0.4 (2.8 %)	2.3 (15.2 %)	0.6 (4 %)	1.6 (10.6 %)	10.2 (67.4 %)		
		3	0.3 (2 %)	1.3 (8.3 %)	0.3 (1.9 %)	1.4 (9.2 %)	0.3 (1.7 %)	1.3 (8.3 %)	10.4 (68.7 %)	
60	3	1	1.4 (8.8 %)	4.1 (26.4 %)	10.1 (64.8 %)					
		2	0.5 (3 %)	2.1 (13.8 %)	1.5 (9.6 %)	2 (12.6 %)	9.5 (61.1 %)			
		3	0.3 (1.7 %)	1.2 (7.5 %)	0.4 (2.7 %)	1.4 (8.8 %)	0.7 (4.6 %)	1.5 (9.7 %)	10.1 (65 %)	
	2	1	2 (12 %)	4.4 (26.9 %)	10 (61.1 %)					
		2	2	0.5 (2.9 %)	2 (12.2 %)	2.4 (14.7 %)	2.3 (14.2 %)	9.2 (56.1 %)		
		3	0.2 (1.4 %)	1.1 (6.5 %)	0.8 (5.1 %)	1.4 (8.8 %)	0.9 (5.7 %)	1.8 (11.3 %)	10 (61.3 %)	
		1	1.2 (11.2 %)	2.7 (25.8 %)	6.6 (63 %)					
		4	2	0.2 (2.2 %)	1.1 (10.8 %)	1 (9.6 %)	1.4 (13.9 %)	6.6 (63.6 %)		
		3	0.2 (2.3 %)	0.6 (5.4 %)	0.3 (2.6 %)	1.1 (10 %)	0.3 (2.9 %)	1.1 (10 %)	7 (66.8 %)	
		1	1.2 (11.2 %)	2.8 (25.6 %)	6.9 (63.1 %)					
		3	2	0.4 (3.5 %)	1.2 (10.7 %)	1.1 (10 %)	1.6 (14.7 %)	6.7 (61 %)		
			3	0.3 (2.6 %)	0.9 (8.3 %)	0.4 (3.9 %)	0.9 (8.1 %)	0.6 (5.8 %)	1 (9 %)	6.8 (62.3 %)
1	1.6 (13.7 %)		2.9 (25.1 %)	7 (61.2 %)						
2	2	0.3 (2.9 %)	1 (8.5 %)	1.5 (13.1 %)	1.9 (16.6 %)	6.8 (58.9 %)				
	3	0.3 (2.5 %)	0.8 (7.2 %)	0.4 (3.6 %)	1 (8.4 %)	0.4 (3.9 %)	1.1 (9.4 %)	7.5 (65 %)		

La reducción de la ganancia entálpica está relacionada con la cantidad de agua que alcanza la superficie durante el atemperamiento, la cual depende del contenido de humedad promedio, de la distribución de humedades en el interior del producto y de la duración del periodo de reposo. A medida que transcurre el proceso es menor la cantidad de humedad que alcanza la superficie, ya que existe menor cantidad de agua en el material, especialmente en las capas exteriores.

La duración de los periodos de reposo estuvo condicionada por la restricción impuesta a la duración total del proceso de secado intermitente (Ec. 4.5.12), mediante la cual no debe superar en más de un 30 % la duración de un secado continuo a iguales condiciones de temperatura de calentamiento y velocidad. En todos los casos se agotó dicha restricción, de modo que la duración de los procesos de secado intermitente fue prácticamente del 130 %, respecto a la duración de los procesos de secado continuo. Resultaría por tanto interesante en un caso industrial realizar un análisis coste/beneficio para determinar en cuánto sería conveniente incrementar este valor.

5.6.2. Comparación entre procesos de secado continuo e intermitente

Con el fin de analizar las posibles ventajas del secado intermitente frente al secado continuo a continuación se compara la ganancia entálpica media y tiempo de calentamiento en ambos procesos, considerando diferentes temperaturas de calentamiento, velocidades de aire y ciclos de intermitencia.

En las Tablas 5.5 y 5.6, se presentan los resultados obtenidos para la ganancia entálpica media y el tiempo de calentamiento, respectivamente. En las tablas mencionadas, los valores correspondientes al secado intermitente corresponden a resultados de

procesos optimizados de uno a tres ciclos de intermitencia ($N = 1, 2, 3$), a temperaturas de calentamiento (T_H) de 50, 60 y 70 °C, y velocidades de aire (v_∞) de 2, 3 y 4 m s⁻¹.

Tabla 5.5. Comparación de la ganancia entálpica media entre procesos de secado continuo (\bar{G}_C , kJ) e intermitente (\bar{G} , kJ) a diferentes temperaturas de calentamiento (T_H), velocidades de aire (v_∞) y número de ciclos de intermitencia (N). Los valores entre paréntesis son el porcentaje de reducción de la ganancia entálpica media respecto al proceso de secado continuo.

T_H (°C)	v_∞ (m s ⁻¹)	Secado continuo	Secado intermitente		
			$N = 1$	$N = 2$	$N = 3$
50	2	1.45	1.22 (16.0 %)	1.21 (16.8 %)	1.17 (19.7 %)
	3	1.53	1.28 (16.4 %)	1.27 (17.1 %)	1.24 (19.4 %)
	4	1.59	1.33 (16.3 %)	1.30 (18.2 %)	1.27 (20.1 %)
60	2	1.81	1.50 (17.1 %)	1.48 (18.3 %)	1.45 (19.7 %)
	3	1.91	1.57 (17.7 %)	1.56 (18.3 %)	1.54 (19.4 %)
	4	1.99	1.66 (16.7 %)	1.60 (19.3 %)	1.59 (19.9 %)
70	2	2.12	1.80 (15.0 %)	1.77 (16.5 %)	1.70 (20.0 %)
	3	2.26	1.92 (14.9 %)	1.89 (16.3 %)	1.84 (18.6 %)
	4	2.35	2.03 (13.4 %)	1.97 (16.0 %)	1.95 (16.9 %)

La ganancia entálpica media aumentó a mayor temperatura y velocidad, y disminuyó a mayor número de ciclos (Tabla 5.5, Figura 5.23.a). Por el contrario, el tiempo de calentamiento disminuyó a mayor temperatura y velocidad, pero aumentó ligeramente a mayor número de ciclos (Tabla 5.6, Figura 5.23.b). Considerando las diferentes velocidades y ciclos, los valores de ganancia entálpica media (kJ) en el secado intermitente abarcaron un rango de 1.17 – 1.59, 1.45 – 1.99, y 1.7 – 2.35, para los procesos a temperaturas de calentamiento de 50, 60 y 70 °C, respectivamente. Asimismo, los valores de tiempo de

calentamiento (h) abarcaron un rango de 16.1 – 18.5, 11.1 – 12.6, y 7.8 – 8.9, para los procesos de secado intermitente a temperaturas de calentamiento de 50, 60 y 70 °C, respectivamente.

Tabla 5.6. Comparación del tiempo de calentamiento entre procesos de secado continuo (t_C , h) e intermitente (t_I , h) a diferentes temperaturas de calentamiento (T_H), velocidades de aire (v_∞) y número de ciclos de intermitencia (N). Los valores entre paréntesis son el porcentaje de reducción del tiempo de calentamiento respecto al proceso de secado continuo.

T_H (°C)	v_∞ (m s ⁻¹)	Secado continuo	Secado intermitente		
			$N = 1$	$N = 2$	$N = 3$
50	2	18.52	16.93 (8.6 %)	16.96 (8.4 %)	17.50 (5.5 %)
	3	17.82	16.42 (7.9 %)	16.48 (7.5 %)	16.81 (5.7 %)
	4	17.39	16.13 (7.2 %)	16.26 (6.4 %)	16.53 (4.9 %)
60	2	12.59	11.94 (5.2 %)	12.01 (4.5 %)	12.01 (4.5 %)
	3	12.00	11.45 (4.6 %)	11.49 (4.3 %)	11.52 (4.0 %)
	4	11.65	11.11 (4.6 %)	11.21 (3.8 %)	11.23 (3.6 %)
70	2	8.88	8.57 (3.6 %)	8.61 (3.1 %)	8.63 (2.8 %)
	3	8.40	8.11 (3.4 %)	8.13 (3.2 %)	8.14 (3.1 %)
	4	8.10	7.82 (3.5 %)	7.87 (2.9 %)	7.86 (3.0 %)

Según los resultados de la optimización (Tablas 5.5 y 5.6), la ganancia entálpica para el proceso de secado intermitente decreció, respecto al proceso de secado continuo, entre el 13.4 % ($T_H = 70$ °C, $v_\infty = 4$ m s⁻¹, $N = 1$) y el 20.1 % ($T_H = 50$ °C, $v_\infty = 4$ m s⁻¹, $N = 3$); mientras que el tiempo de calentamiento decreció entre el 2.8 % ($T_H = 70$ °C, $v_\infty = 2$ m s⁻¹, $N = 3$) y el 8.6 % ($T_H = 50$ °C, $v_\infty = 2$ m s⁻¹, $N = 1$), de acuerdo a las temperaturas de calentamiento y el número de ciclos considerados. Estos porcentajes de reducción equivalen a una disminución entre 0.13 y 0.43 kJ para la ganancia entálpica media de

la base de cálculo (masa del cubo de mango); y entre 0.03 y 1.59 h, para el tiempo de calentamiento.

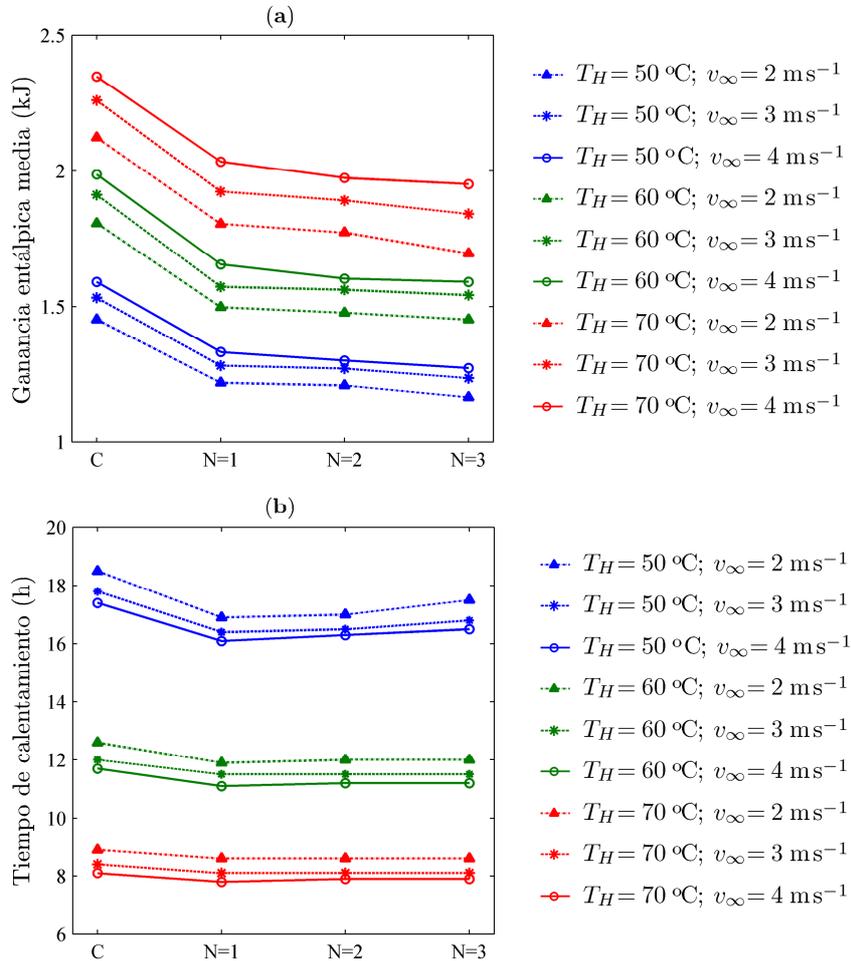


Figura 5.23. Ganancia entálpica media (a) y tiempo de calentamiento (b) en procesos de secado continuo (C) e intermitente a diferentes temperaturas de calentamiento (T_H), velocidades de aire (v_∞) y número de ciclos de intermitencia (N).

Al disminuir la temperatura del aire de secado se obtuvo un mayor porcentaje de reducción en la ganancia entálpica media y en el tiempo de calentamiento. A iguales temperaturas de calentamiento, el mayor porcentaje de reducción en la ganancia entálpica media se presentó en los procesos de secado intermitente de tres ciclos ($N = 3$), mientras que la mayor reducción en el tiempo de calentamiento se presentó con un ciclo de intermitencia ($N = 1$).

El efecto del secado intermitente hace que la ganancia entálpica y el tiempo de calentamiento obtenidos en procesos de secado intermitente sean equivalentes a procesos de secado continuo desarrollados a menores temperaturas o velocidades. Tal es el caso de los todos procesos de secado intermitente a una velocidad de 2 m s^{-1} y temperaturas de calentamiento de 70 y $60 \text{ }^\circ\text{C}$, los cuales presentan ganancias entálpicas menores que los procesos de secado continuo a una velocidad de 4 m s^{-1} y temperaturas de 60 y $50 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente (Tabla 5.5, Figura 5.23.a). En todos los procesos de secado intermitente a una misma temperatura de calentamiento, los valores de ganancia entálpica a una velocidad de 4 m s^{-1} fueron inferiores a los valores del secado continuo a 2 m s^{-1} (Tabla 5.5, Figura 5.23.a). Asimismo, los valores de tiempo de calentamiento a velocidades de calentamiento de 3 y 2 m s^{-1} fueron inferiores a los valores del secado continuo a 4 y 3 m s^{-1} , respectivamente (Tabla 5.6, Figura 5.23.b).

Aunque los periodos de calentamiento determinan la distribución de humedades y temperaturas al inicio de los periodos de reposo, son la duración y las condiciones de los periodos de reposo las que establecen tanto la reducción del efecto tiempo-temperatura sobre la calidad del producto, como la difusión de humedad hacia la superficie. Ya que en las simulaciones las condiciones del aire durante los periodos de reposo fueron constantes, la efectividad del

atemperamiento estuvo determinada principalmente por su duración. Tal duración estuvo condicionada por el tiempo adicional que, con respecto al secado continuo, se fijó para el secado intermitente mediante la restricción $t_P \leq 1.3t_C$. Esta restricción ocasionó que el tiempo de reposo, y por tanto el efecto del atemperamiento, fuera inferior en aquellos procesos realizados a mayores temperaturas de calentamiento y velocidades, donde la duración del proceso continuo (t_C) es menor.

Para ilustrar la evolución de la ganancia entálpica durante el proceso de secado intermitente y su comparación con el proceso de secado continuo, en la Figura 5.24 se presentan los resultados obtenidos para procesos de secado intermitente optimizados a uno y tres ciclos, para una temperatura de calentamiento de 60 °C y una velocidad de aire de 4 m s⁻¹. Del mismo modo, en las Figuras A11.1 y A11.2 (Anexo 11) se muestra la evolución de la ganancia entálpica para procesos de secado intermitente optimizados a uno y tres ciclos, para temperaturas de calentamiento de 50 y 70 °C, y una velocidad de aire de 4 m s⁻¹.

La Figura 5.24 muestra cómo la aplicación de periodos de reposo disminuye la ganancia entálpica media en comparación con el proceso de secado continuo. Tal como se ha mencionado, esta disminución es mayor cuando se aplican más ciclos de intermitencia.

La ganancia entálpica aumenta durante los períodos de calentamiento (Figura 5.24), cuando la transferencia de calor entre el aire y el sólido suministra suficiente energía térmica para evaporar la humedad superficial y para aumentar la temperatura del material. La ganancia entálpica se incrementa más rápidamente, cuando existe un mayor gradiente de temperatura entre la superficie del sólido y el aire, menor humedad en la superficie del sólido para ser evaporada, y mayor velocidad del aire de secado.

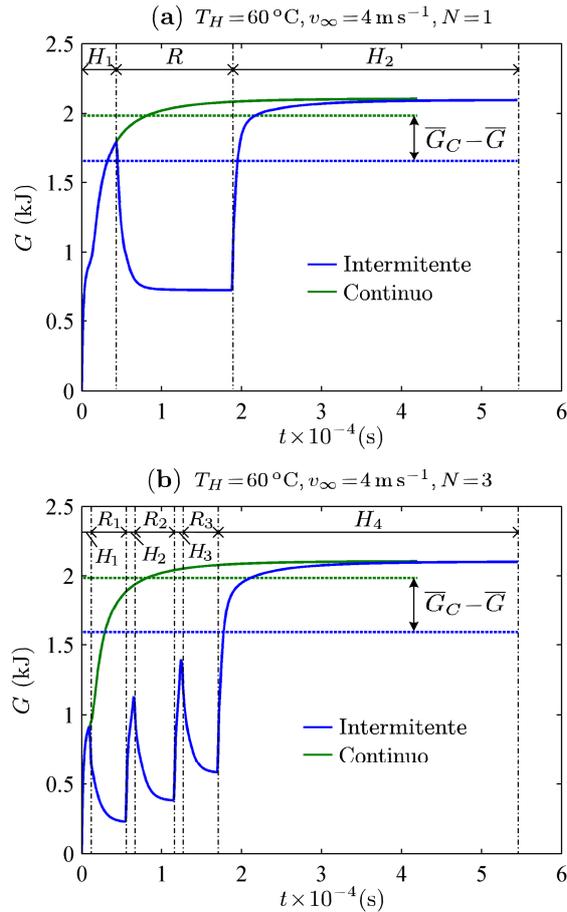


Figura 5.24. Evolución de la ganancia entálpica en procesos de secado continuo e intermitente a diferentes ciclos de intermitencia: (a) $T_H = 60\text{ }^\circ\text{C}, v_\infty = 4\text{ m s}^{-1}, N = 1$; (b) $T_H = 60\text{ }^\circ\text{C}, v_\infty = 4\text{ m s}^{-1}, N = 3$. $\bar{G}_C - \bar{G}$ es la diferencia en la ganancia entálpica media entre el secado continuo e intermitente. H y R representan los periodos de calentamiento y reposo, respectivamente.

Por otro lado, la ganancia entálpica disminuye en los periodos de reposo (Figura 5.24) cuando la transferencia de calor principalmente ocurre desde el sólido hacia el aire y, adicionalmente, las condiciones

higroscópicas aún favorecen el transporte de humedad y el consumo de energía térmica asociado a la evaporación.

Para ilustrar la distribución de humedades y temperaturas en un proceso de secado intermitente optimizado, la Figura 5.25 muestra la evolución de los valores locales de humedad y temperatura a través del eje central del cubo para un proceso de secado intermitente a una temperatura de calentamiento de 60 °C, una velocidad de aire de 4 m s⁻¹, y un ciclo de intermitencia ($N = 1$). De forma complementaria, en la Figura 5.26 se muestra la evolución de los gradientes de humedad y temperatura para el mismo proceso de secado de la Figura 5.25.

Adicionalmente, las Figuras A12.1 y A12.2 (Anexo 12) muestran la evolución de los valores locales de humedad y temperatura para procesos de secado intermitente a una temperatura de calentamiento de 60 °C, una velocidad de aire de 4 m s⁻¹, aplicando dos y tres ciclos de intermitencia ($N = 2$ y 3).

El aumento del contenido de humedad local en las zonas superficiales muestra cómo, durante los periodos de reposo, el agua se difunde desde el interior ($x/L > 0.7$) hacia la superficie ($x/L > 0.85$) produciendo una redistribución del agua contenida en el sólido (Figura 5.25.a). Esta migración de agua es causada por los gradientes de humedad establecidos durante el primer periodo de calentamiento, los cuales son mayores en zonas superficiales (Figura 5.26.a).

Tal como se indica en la Figura 5.26.a, los valores absolutos de los gradientes de humedad en la superficie y en las capas adyacentes ($x/L > 0.7$) disminuyen por la aplicación de las condiciones de reposo, pues se va reduciendo la evaporación superficial y acumulando la humedad en la superficie. La notable diferencia entre los valores de humedad local a lo largo del eje central del cubo (Figura 5.25.a) indica

que durante todo el proceso el material ejerce una resistencia interna importante a transferencia de materia.

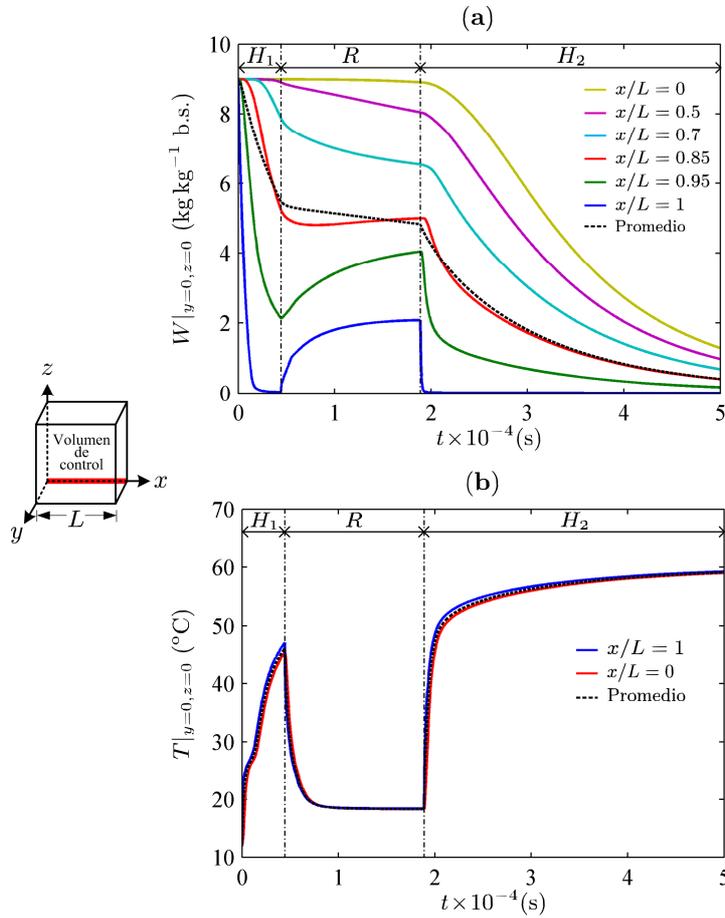


Figura 5.25. Evolución del contenido de humedad (a) y la temperatura (b) a través del eje central del cubo sobre la coordenada x . Resultados para un proceso de secado intermitente optimizado a una temperatura de calentamiento de 60°C , velocidad de aire de 4 m s^{-1} , y un ciclo de intermitencia ($N = 1$). x/L es la posición adimensional con respecto a la coordenada x . H y R representan los periodos de calentamiento y reposo, respectivamente.

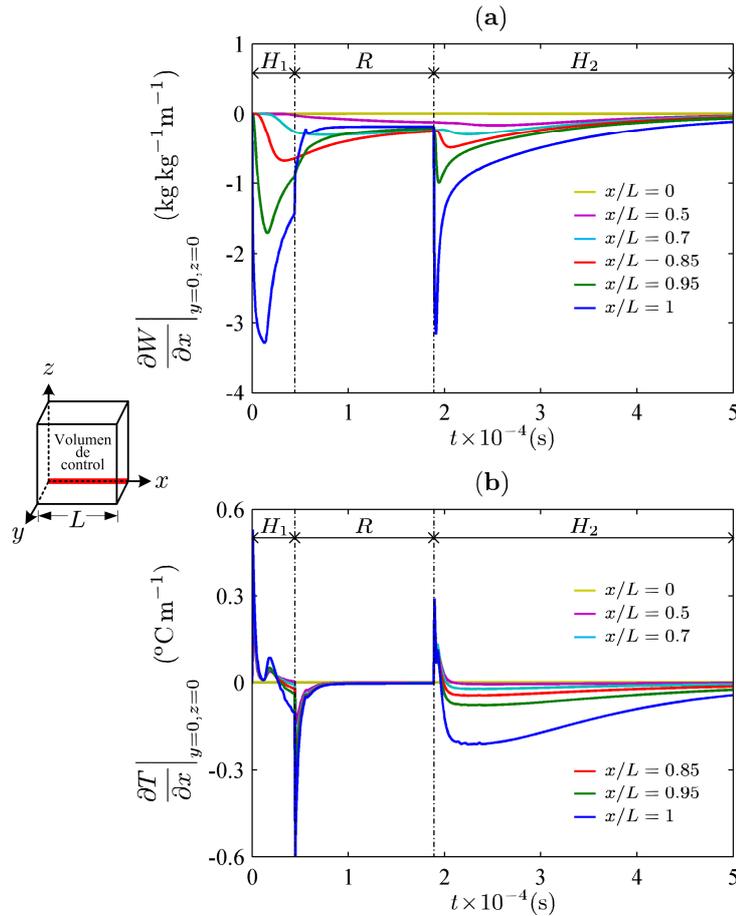


Figura 5.26. Evolución de los gradientes de humedad (a) y temperatura (b) a través del eje central del cubo sobre la coordenada x . Resultados para un proceso de secado intermitente optimizado a una temperatura de calentamiento de 60°C , velocidad de aire de 4 m s^{-1} , y un ciclo de intermitencia ($N = 1$). x/L es la posición adimensional con respecto a la coordenada x . H y R representan los periodos de calentamiento y reposo, respectivamente.

A diferencia de la distribución de humedad, la Figura 5.25.b muestra que las temperaturas locales en el centro ($x/L = 0$) y en la superficie ($x/L = 1$) son muy similares, indicando una baja resistencia

interna a la transferencia de calor comparada con la resistencia interna a la transferencia de materia.

Asimismo, los gradientes de temperatura durante el primer periodo de calentamiento y durante el periodo de reposo (Figura 5.26.b) muestran valores similares a lo largo del eje, lo cual es un indicativo de la uniformidad en el flujo de calor a través del material. Durante el segundo periodo de calentamiento, la diferencia entre los gradientes de temperatura entre las capas más externas ($x/L > 0.85$) se presenta porque la disminución en el contenido de humedad superficial tiene un efecto importante sobre el valor de las propiedades térmicas, y por tanto, sobre la transferencia de calor.

Por otro lado, la Figura 5.27 ilustra la evolución del flujo de ganancia entálpica del producto para un proceso de secado intermitente a una temperatura de calentamiento de 60 °C, velocidad de 4 m s⁻¹, y un ciclo de intermitencia ($N = 1$). En ella puede apreciarse que durante los periodos de calentamiento la mayor parte del calor que se transfiere por convección desde el aire hacia el sólido (Q_c) es empleado en la evaporación de la humedad superficial (Q_v), en lugar de incrementar el flujo de ganancia entálpica del producto (Q).

Por el contrario, durante los periodos de reposo, la transferencia de calor desde el sólido hacia el aire (enfriamiento) y la pérdida de humedad superficial causan la disminución en el flujo de ganancia entálpica. Los valores máximos y mínimo en el flujo de calor por convección (Figura 5.27, Q_c) corresponden con el inicio de los periodos de calentamiento y reposo, donde existe una mayor diferencia entre la temperatura del aire y del producto (Figura 5.26.b, $x/L = 1$). Un menor contenido de humedad en el segundo periodo de calentamiento conduce a una menor evaporación y por tanto a un mayor calentamiento del sólido.

En el secado convectivo, tanto las altas temperaturas superficiales como los periodos de calentamiento excesivamente largos han sido asociados negativamente con diferentes parámetros de calidad como la degradación del color (pardeamiento no enzimático) y la pérdida de valor nutricional (destrucción de vitaminas y compuestos termolábiles) (Fernández-Vidal, 2007; Garau et al., 2007; Sablani, 2006). Así pues, el secado intermitente podría ser interesante para reducir estos efectos negativos sobre la calidad del producto ya que éste reduce la temperatura superficial así como el tiempo de calentamiento necesario para alcanzar un contenido de humedad final deseado (Ho et al., 2002; Pan et al., 1999b).

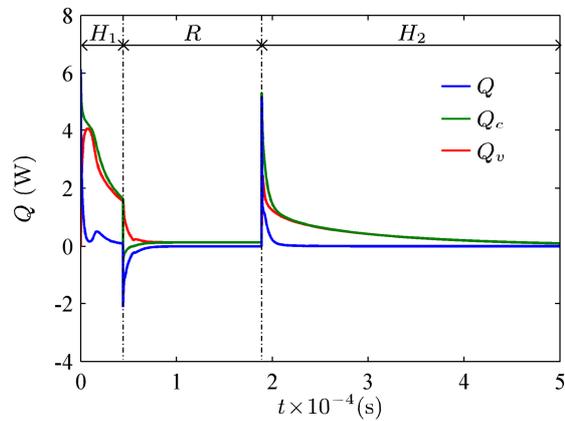


Figura 5.27. Evolución del flujo de ganancia entálpica del producto. Resultados para un proceso de secado intermitente optimizado a una temperatura de calentamiento de 60 °C, velocidad de aire de 4 m s⁻¹, y un ciclo de intermitencia ($N = 1$). Q (W) es el flujo de ganancia entálpica del producto; Q_c (W) es el flujo de calor por convección desde el aire hacia la superficie del sólido; Q_v (W) es el flujo de calor requerido para evaporar la humedad que llega a la superficie del cubo. H y R representan los periodos de calentamiento y reposo, respectivamente.

En la Figura 5.28.a puede observarse cómo el contenido de humedad superficial promedio se incrementa en cada período de reposo, ya que la disminución de la evaporación superficial, producto de las condiciones de convección natural y de la reducción de la temperatura del aire durante el periodo de reposo, permite la acumulación de humedad en la zona superficial hasta el inicio del siguiente periodo de calentamiento. Este incremento en la humedad superficial se reduce durante el segundo y el tercer periodo de reposo, ya que los gradientes de concentración a través del producto se van reduciendo a medida que el material se seca, y se requiere más tiempo para que una misma cantidad de agua alcance la superficie, si la humedad total presente en el producto lo permitiera.

La Figura 5.28.b muestra que durante el proceso de secado intermitente el producto alcanza temperaturas superficiales menores que en el secado continuo. Un mayor contenido de humedad en la superficie permite que parte de la energía térmica suministrada por el aire de secado sea utilizada para evaporar la humedad en lugar de aumentar la temperatura superficial (Figura 5.28.b).

La evolución de la velocidad de secado en procesos de secado continuo e intermitente a una temperatura de calentamiento de 60 °C, y diferentes ciclos de intermitencia se muestra en la Figura 5.29. Asimismo, en las Figuras A13.1 y A13.2 (Anexo 13) se presenta la evolución de la velocidad de secado en procesos de secado continuo e intermitente a temperaturas de calentamiento de 50 y 70 °C y diferentes ciclos de intermitencia.

Una alta velocidad de secado sigue a cada periodo de reposo (Figura 5.29) debido a que la redistribución del agua contenida en el material aumenta la disponibilidad de humedad en la superficie del sólido para evaporación.

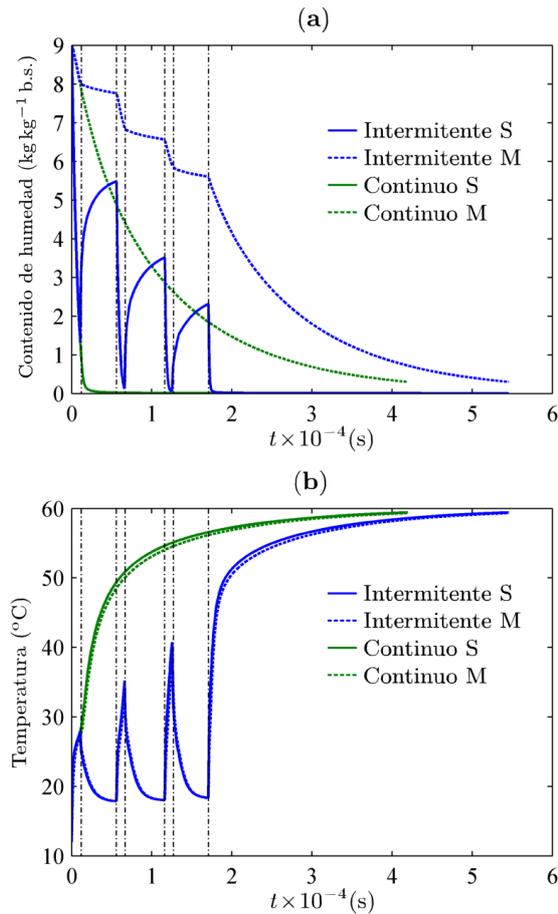


Figura 5.28. Contenido de humedad (a) y temperatura (b) superficiales en procesos de secado continuo e intermitente. Resultados para un proceso de secado intermitente (optimizado) a una temperatura de calentamiento de 60 °C, velocidad de aire de 4 m s⁻¹, y tres ciclos de intermitencia ($N=3$). S: Valor promedio en la superficie; M: Valor promedio en toda la muestra.

En cada periodo de secado posterior a un periodo de reposo, la humedad superficial se pierde rápidamente, cuando las condiciones del aire de calentamiento reducen el contenido de humedad de equilibrio y es más fácil retirar la humedad del sólido por su cercanía a la superficie.

Es este incremento en la velocidad de secado lo que disminuye el tiempo de calentamiento, y con ello, los requerimientos energéticos del proceso asociados a la generación de calor y al flujo del aire.

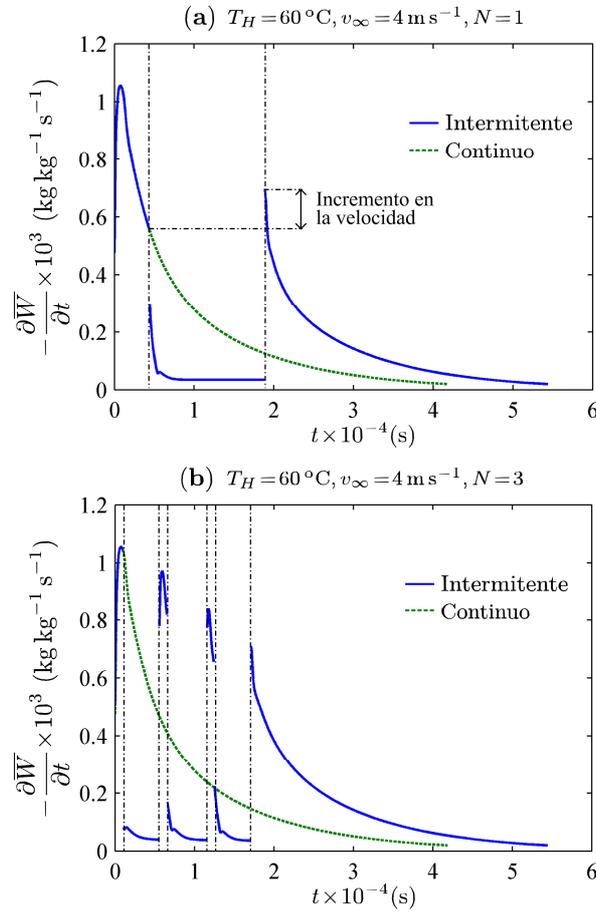


Figura 5.29. Evolución de la velocidad de secado en procesos de secado continuo e intermitente a diferentes ciclos de intermitencia: (a) $T_H = 60\text{ }^\circ\text{C}$, $v_\infty = 4\text{ m s}^{-1}$, $N = 1$; (b) $T_H = 60\text{ }^\circ\text{C}$, $v_\infty = 4\text{ m s}^{-1}$, $N = 3$.

6. CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

Propiedades físicas del mango (*Mangifera indica* L. variedad Tommy Atkins)

- La dependencia de la densidad, la conductividad térmica y el calor específico de la pulpa de mango con la humedad y la temperatura fue descrita satisfactoriamente mediante modelos lineales multivariados.
- El calor específico de la materia seca del mango presentó una mayor dependencia con la temperatura en el rango 20–50 °C.
- El calor específico de la materia seca del mango presentó un valor medio entre las capacidades caloríficas de los carbohidratos y la fibra.
- En las isotermas de sorción de la pulpa de mango, el contenido de humedad de equilibrio, a actividad de agua constante, disminuyó cuanto mayor era la temperatura.
- El modelo teórico de GAB se consideró como el más adecuado para la modelización de la influencia de la actividad de agua y la temperatura sobre el contenido de humedad de equilibrio de la pulpa de mango.
- Las isotermas y el calor isostérico de sorción mostraron un comportamiento acorde al de los materiales agroalimentarios y similar al reportado para pulpa de mango de otras variedades.

Modelización y validación de los procesos de secado continuo e intermitente

- Considerando los parámetros del modelo de la difusividad efectiva independientes de las condiciones de operación se obtuvieron resultados satisfactorios en todos los casos, lo que indicaría la bondad de esta hipótesis.
- Los valores de la difusividad efectiva, estimada mediante el modelo identificado, estuvieron dentro del rango de valores esperados para el secado de materiales alimentarios. Dichos valores son similares a los obtenidos por otros autores en la modelización de cinéticas de secado de láminas de mango de diferentes variedades.
- La difusividad efectiva mostró ser dependiente del contenido de humedad y a la temperatura, presentando, a temperatura constante, una mayor influencia de la humedad a valores menores a 1 kg kg^{-1} b.s.
- El modelo del proceso describe adecuadamente el secado continuo e intermitente de mango. Se obtuvieron correlaciones satisfactorias entre los valores estimados y los datos experimentales, en los conjuntos de datos empleados en la identificación paramétrica y la validación.
- El modelo del proceso constituye una importante contribución al considerar un sistema transitorio y tridimensional con propiedades físicas dependientes de la humedad y la temperatura. Se consideran tanto los fenómenos de transferencia de materia y calor en el producto, así como los fenómenos de transferencia de materia y calor por convección natural y forzada en la interfase producto-aire.
- Los algoritmos desarrollados utilizando COMSOL Multiphysics® y Matlab® son potentes herramientas de simulación y optimización

que permiten el estudio y validación experimental de diferentes condiciones y propiedades de forma simultánea.

- La metodología del presente estudio constituye una contribución al estudio de los fenómenos físicos involucrados en el secado convectivo de alimentos, y al desarrollo de algoritmos para la modelización simultánea de fenómenos de transferencia de materia y calor en sistemas alimentarios.

Optimización del proceso de secado intermitente

- La optimización se ha establecido como un paso necesario para la identificación de las condiciones que permitan un máximo aprovechamiento de las ventajas del proceso intermitente sobre el continuo, en cuanto a consumo energético directamente, y en cuanto a calidad del producto implícitamente.
- La aplicación y optimización del secado intermitente en el procesamiento del mango mejora la eficiencia energética del proceso por cuanto disminuye el tiempo de calentamiento efectivo del producto en comparación con un proceso donde el suministro de energía térmica es continuo.
- La aplicación y optimización del secado intermitente también podría mejorar la calidad del producto mediante la disminución de la ganancia entálpica, la temperatura superficial y el tiempo de exposición del producto al tratamiento térmico.
- En particular el secado intermitente podría ser conveniente para reducir problemas de calidad superficiales, tales como el pardeamiento no enzimático y el encostramiento, ya que éste reduce la temperatura superficial así como el tiempo de calentamiento necesario para alcanzar un contenido de humedad final deseado.

7. RECOMENDACIONES

7. RECOMENDACIONES

A partir de la metodología desarrollada y de los resultados obtenidos se sugieren a continuación varias vías para dar continuidad a este trabajo de investigación:

- Estudiar el secado intermitente en productos que por su estructura física y composición permitieran apreciar de forma más significativa el efecto de la intermitencia, como en el caso de aquellos que presentan una alta porosidad y un bajo contenido de sólidos solubles.
- Incluir dentro del modelo matemático la cinética de degradación de algún compuesto de interés nutricional y formular un problema optimización que tenga como objetivo minimizar el efecto de las condiciones tiempo-temperatura sobre este compuesto.
- Aplicar la tecnología de los ultrasonidos de potencia durante los periodos de reposo con el fin de favorecer la distribución de humedad al interior del sólido y, de esta manera, disminuir la duración del atemperamiento.
- Desarrollar un análisis de sensibilidad a partir del modelo propuesto con el objetivo de cuantificar la importancia de las diferentes propiedades físicas consideradas sobre la cinética del proceso.
- Estudiar y optimizar el proceso de secado intermitente en una aplicación industrial.
- Sería conveniente validar el modelo con el estudio de perfiles de humedad considerando simultáneamente la contracción.

8. NOMENCLATURA

8. NOMENCLATURA

a	Parámetro de los modelos de las propiedades físicas
A	Área efectiva de la superficie del sólido para la transferencia de calor o materia (m^2)
AR	Parámetro de forma
A_x, A_y, A_z	Área de la superficie del volumen de control perpendicular la dirección x, y y z , respectivamente (m^2)
b	Parámetro de los modelos de las propiedades físicas
c	Parámetro de los modelos de las propiedades físicas
c_p	Calor específico del producto a presión constante ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
c_p'	Calor específico del material de la celda ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
c_{pa}	Calor específico del aire húmedo a presión constante ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
c_{pda}	Calor específico del aire seco a presión constante ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
c_{pdm}	Calor específico de la materia seca a presión constante ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
c_{pw}	Calor específico del agua pura a presión constante ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
c_{pv}	Calor específico del vapor de agua a presión constante ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
C_s	Concentración de vapor de agua en el aire en contacto con la superficie del sólido (kg m^{-3})
C_∞	Concentración de vapor de agua en el aire fuera de la capa límite (kg m^{-3})
C_G, C_{G0}	Parámetros propios del modelo de GAB
D_0	Difusividad efectiva de referencia, factor preexponencial ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
D_e	Difusividad efectiva ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
D_{wa}	Difusividad molecular del vapor de agua en el aire ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
E_a	Energía de activación, (kJ kmol^{-1})

f_D	Criterio de ajuste para identificar los parámetros del modelo de la difusividad efectiva
f_T	Criterio de ajuste para los datos de temperatura en el centro del cubo
f_W	Criterio de ajuste para los datos de contenido de humedad promedio
g	Aceleración de la gravedad (m s^{-2})
G	Ganancia entálpica (kJ)
\bar{G}, \bar{G}_C	Ganancia entálpica media en procesos de secado intermitente y continuo, respectivamente (kJ)
Gr_ℓ	Número adimensional de Grashof
h, h_x	Coefficiente promedio y local de transferencia de calor por convección, respectivamente ($\text{kW m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
h_m, h_{m_x}	Coefficiente promedio y local de transferencia de materia por convección, respectivamente (m s^{-1})
H_m	Calor de sorción en la monocapa (kJ kmol^{-1})
H_n	Calor de sorción en la multicapa (kJ kmol^{-1})
I_0, I_1	Función modificada de Bessel de primera especie de orden cero y uno, respectivamente
J_0, J_1	Función de Bessel de primera especie de orden cero y uno, respectivamente
\bar{k}_{exp}	Valor promedio de los datos experimentales respecto a una variable de interés k
K_G, K_{G0}	Parámetros propios del modelo de GAB
ℓ	Longitud característica de la geometría del sólido (m)
l	Longitud de la celda la celda usada para medir la conductividad térmica y el calor específico (m)
L	Mitad del lado del cubo (m)
m_s	Flujo de materia por unidad de área en la superficie del sólido ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
m_v	Flujo convectivo de vapor de agua por unidad de área ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
m_x, m_y, m_z	Flujo de materia por unidad de área en la dirección x , y y z , respectivamente ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
M	Masa de agua en el volumen de control (kg)

n_d	Número de datos utilizados en el ajuste
n_m	Número de experiencias de secado utilizadas en la modelización
n_p	Número de parámetros del modelo
N	Número de ciclos de intermitencia
Nu_ℓ	Número adimensional promedio de Nusselt
OF	Función objetivo usada en la optimización de los procesos de secado intermitente (kJ^2)
P_M	Peso molecular del agua pura (kg kmol^{-1})
PP	Variación del peso (%)
Pr	Número adimensional de Prandtl
P_s	Presión de saturación del agua pura (kPa)
P_v	Presión de vapor ejercida por la humedad del producto en la interfase (kPa)
q_c	Flujo de calor por convección por unidad de área (kW m^{-2})
q_s	Flujo de calor por unidad de área en la superficie del sólido (kW m^{-2})
q_x, q_y, q_z	Flujo de calor por unidad de área en la dirección x , y y z , respectivamente (kW m^{-2})
Q	Flujo de ganancia entálpica del producto (kW)
Q_c	Flujo de calor transmitido por convección a través de la superficie del cubo (kW)
Q_r	Flujo de calor emitido por la resistencia eléctrica en la celda (W)
Q_s	Calor isostérico de sorción (kJ kmol^{-1})
Q_v	Flujo de calor requerido para evaporar la humedad que llega a la superficie del cubo (kW)
r	Radio de la celda usada para medir las propiedades térmicas (m)
r_1, r_2	Radio interno y externo de los cilindros interior y exterior de la celda, respectivamente (m)
R	Constante de los gases perfectos ($\text{kJ kmol}^{-1} \text{K}^{-1}$)
Re_ℓ	Número adimensional de Reynolds
$RMSE$	Raíz cuadrada del error cuadrático medio

S_x, S_y, S_z	Área de la superficie del el área de la superficie del volumen del sistema considerado por el modelo (un octavo del cubo) perpendicular a la dirección x , y y z , respectivamente (m^2)
S_c	Número adimensional de Schmidt
Sh_ℓ	Número adimensional promedio de Sherwood
t	Tiempo (s)
t_C	Tiempo total del proceso de secado continuo (s)
t_{H_i}	Duración del periodo de calentamiento i (s)
\vec{t}_H	Vector para los tiempos de duración de los periodos de calentamiento (s)
t_I	Tiempo de calentamiento efectivo (s)
t_P	Tiempo total del proceso de secado intermitente (s)
t_{R_j}	Duración del periodo de reposo j (s)
\vec{t}_R	Vector para los tiempos de duración de los periodos de reposo (s)
T_0	Temperatura inicial del producto ($^{\circ}C$)
T_1, T_2	Temperaturas superficiales de los cilindros interior y exterior de la celda, respectivamente ($^{\circ}C$)
T, T_{abs}	Temperatura del material ($^{\circ}C$ y K, respectivamente)
T_H	Temperatura del aire durante el secado continuo y durante los periodos de calentamiento del secado intermitente ($^{\circ}C$)
T_{ref}	Temperatura de referencia ($^{\circ}C$)
T_R	Temperatura del aire durante los periodos de reposo del secado intermitente ($^{\circ}C$)
T_s	Temperatura en la superficie del sólido ($^{\circ}C$)
$T_{\infty}, T_{\infty,abs}$	Temperatura del aire fuera de la capa límite ($^{\circ}C$ y K, respectivamente)
T_{α}	Valor asintótico que alcanza la temperatura al final del calentamiento de la celda ($^{\circ}C$)
v_e	Velocidad relativa basada en una linealización de la ecuación de conservación de momento en la capa límite laminar ($m\ s^{-1}$)

v_{∞}	Velocidad del aire fuera de la capa límite durante el secado continuo y durante los periodos de calentamiento del secado intermitente (m s^{-1})
VAR	Porcentaje de varianza explicada por el modelo (%)
W	Contenido de humedad del producto (kg kg^{-1} b.s.)
\bar{W}	Contenido de humedad promedio del producto (kg kg^{-1} b.s.)
W_0	Contenido de humedad inicial del producto (kg kg^{-1} b.s.)
W_e	Contenido de humedad de equilibrio (kg kg^{-1} b.s.)
W_m	Contenido de humedad de equilibrio en la monocapa (kg kg^{-1} b.s.)
\bar{W}_f	Contenido de humedad final promedio del producto (kg kg^{-1} b.s.)
x, y, z	Coordenadas espaciales (m)
y_v	Fracción molar del vapor de agua en el aire húmedo (mol mol^{-1})
Y	Contenido de humedad del aire (kg kg^{-1} b.s.)

Símbolos griegos

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	Parámetros del modelo de la difusividad efectiva ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$, kJ kmol^{-1} y adimensional, respectivamente)
β	Valores característicos del problema
γ	Parámetro de la capa límite
ε	Error absoluto promedio
θ	Entalpía específica del material (kJ kg^{-1})
θ_w	Entalpía específica del agua pura (kJ kg^{-1})
θ_{dm}	Entalpía específica de la materia seca (kJ kg^{-1})
$\theta_x, \theta_y, \theta_z$	Entalpía específica asociada a la materia que se difunde en la dirección x , y y z , respectivamente (kJ kg^{-1})
Θ	Entalpía del material del volumen de control (kJ)
κ	Conductividad térmica del producto ($\text{kW m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
κ_a	Conductividad térmica del aire húmedo ($\text{kW m}^{-1} \text{K}^{-1}$)

κ_{da}	Conductividad térmica del aire seco ($\text{kW m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
κ_v	Conductividad térmica del vapor de agua ($\text{kW m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
λ_v	Calor latente de vaporización del agua pura (kJ kmol^{-1})
μ_a	Viscosidad dinámica del aire húmedo ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)
μ_{da}	Viscosidad dinámica del aire seco ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)
μ_v	Viscosidad dinámica del vapor de agua ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)
ρ	Densidad del producto (kg m^{-3})
ρ'	Densidad del material de la celda (kg m^{-3})
ρ_a	Densidad del aire húmedo (kg m^{-3})
ρ_{ds}	Densidad del sólido seco (kg m^{-3})
σ_y	Desviación estándar total
σ_{yx}	Desviación estándar de la estimación
τ	Constante que limita la duración del proceso de secado intermitente
Φ	Combinación de funciones de Bessel de primera especie de orden cero
φ	Actividad de agua
$\psi_{da,v}, \psi_{v,da}$	Parámetros de las ecuaciones usadas para estimar la viscosidad dinámica y la conductividad térmica del aire húmedo

9. BIBLIOGRAFÍA

9. BIBLIOGRAFÍA

- Ahmed, J., Shivhare, U.S., Kaur, M. (2002). Thermal colour degradation kinetics of mango puree, *International Journal of Food Properties*, 5(2): 359-366.
- Al-Muhtaseb, A.H., McMinn, W.A.M., Magee, T.R.A. (2002). Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A Review, *Trans IChemE*, 80(C): 118-128.
- AOAC. (1997). *Official methods of analysis of AOAC International*, 16 edn., (Association of Official Analytical Chemist International AOAC, Gaithersburg, USA).
- Aquerreta, J., Iguaz, A., Arroqui, C., Virseda, P. (2007). Effect of high temperature intermittent drying and tempering on rough rice quality, *Journal of Food Engineering*, 80(2): 611-618.
- ASAE. (1999). Psychrometric data, D271.2 DEC99, (American Society of Agricultural Engineers ASAE, USA).
- Baehr, H.D., Stephan, K. (2006). *Heat and mass transfer*, 2 edn., (Springer, Berlin, Alemania).
- Baini, R., Langrish, T.A.G. (2007). Choosing an appropriate drying model for intermittent and continuous drying of bananas, *Journal of Food Engineering*, 79: 330-343.
- Barbosa-Cánovas, G., Ibarz, A. (2003). *Unit operations in food engineering*, (CRC Press, USA).
- Basu, S., Shivhare, U.S., Mujumdar, A.S. (2006). Models for sorption isotherms for foods: a review, *Drying Technology*, 24: 917-930.
- Bellet, D., Sengelin, M., Thirriot, C. (1975). Determination of Thermophysical Properties of Non-Newtonian Liquids Using A Coaxial Cylindrical Cell, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18(10): 1177-1187.
- Bialobrzeski, I., Zielinska, M., Mujumdar, A.S., Markowski, M. (2008). Heat and mass transfer during drying of a bed of shrinking particles, simulation for carrot cubes dried in a spout-fluidized-bed drier, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(19-20): 4704-4716.
- Bon, J., Kudra, T. (2007). Enthalpy-driven optimization of intermittent drying, *Drying Technology*, 25(4): 523-532.
- Bon, J., Rosselló, C., Femenia, A., Eim, V., Simal, S. (2007). Mathematical modeling of drying kinetics for apricots: Influence of the external resistance to mass transfer, *Drying Technology*, 25(11): 1829-1835.
- Cao, W., Nishiyama, Y., Koide, S. (2004). Simulation of intermittent drying of maitake mushroom by a simplified model, *Biosystems Engineering*, 87(3): 325-331.
- Chen, C. (2006). Obtaining the isosteric sorption heat directly by sorption isotherm equations, *Journal of Food Engineering*, 74(2): 178-185.

- Chen, J.P., Tai, C.Y., Chen, B.H. (2007). Effects of different drying treatments on the stability of carotenoids in Taiwanese mango (*Mangifera indica* L.), *Food Chemistry*, 100(3): 1005-1010.
- Chen, X.D. (2007a). Moisture diffusivity in food and biological materials, *Drying Technology*, 25(7-8): 1203-1213.
- Chen, X.D. (2007b). Simultaneous heat and mass transfer. En: Sablani, S.S., Rahman, M.S., Datta, A.K., Mujumdar, A.S. (eds.), *Handbook of food and bioprocess modeling techniques* (CRC Press, Boca Raton, FL, USA).
- Chou, S.K., Chua, K.J., Mujumdar, A.S., Hawlader, M.N.A., Ho, J.C. (2000). On the intermittent drying of an agricultural product, *Trans IChemE*, 78(C): 193-203.
- Chua, K.J., Chou, S.K., Ho, J.C., Mujumdar, A.S., Hawlader, M.N.A. (2000a). Cyclic air temperature drying of guava pieces: Effects on moisture and ascorbic acid contents, *Food and Bioprocess Processing*, 78(C2): 72-78.
- Chua, K.J., Mujumdar, A.S., Chou, S.K. (2003). Intermittent drying of bioproducts - an overview, *Bioresource Technology*, 90: 285-295.
- Chua, K.J., Mujumdar, A.S., Chou, S.K., Hawlader, M.N.A., Ho, J.C. (2000b). Convective drying of banana, guava and potato pieces: Effect of cyclical variations of air temperature on drying kinetics and color change, *Drying Technology*, 18(4-5): 907-936.
- Cihan, A., Kahveci, K., Hacıhafızoglu, O., De Lima, A.G.B. (2008). A diffusion based model for intermittent drying of rough rice, *Heat and Mass Transfer*, 44(8): 905-911.
- Cihan, A., Kahveci, K., Hacıhafızoglu, O. (2007). Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice, *Journal of Food Engineering*, 79: 293-298.
- Clemente, G. (2003). *Efecto de la contracción en la cinética de secado de músculos de jamón*, (Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España). Tesis Doctoral.
- Cnossen, A.G., Jimenez, M.J., Siebenmorgen, T.J. (2003). Rice fissuring response to high drying and tempering temperatures, *Journal of Food Engineering*, 59(1): 61-69.
- COMSOL AB. (2007). *COMSOL multiphysics user's guide version 3.4*, (COMSOL AB., Stockholm, Sweden).
- Corso, O., Bracho, N., Alvarez, C. (2008). Water effective diffusion coefficient of mango slices at different maturity stages during air drying, *Journal of Food Engineering*, 87: 479-484.
- Culham, J.R., Yovanovich, M.M., Teertstra, P., Wang, C.-S., Refai-Ahmed, G., Tain, R.M. (2001). Simplified Analytical Models for Forced Convection Heat Transfer From Cuboids of Arbitrary Shape, *Journal of Electronic Packaging*, 123(3): 182-188.
- Datta, A.K., Sablani, S.S. (2007). Mathematical modeling techniques in food and bioprocesses: an overview. En: Sablani, S.S., Rahman, M.S., Datta, A.K., Mujumdar, A.S. (eds.), *Handbook of food and bioprocess modeling techniques* (CRC Press, Boca Raton, FL, USA), pp. 2-11.

-
- De Bonis, M.V., Ruocco, G. (2008). A generalized conjugate model for forced convection drying based on an evaporative kinetics, *Journal of Food Engineering*, 89(2): 232-240.
- De La Cruz Medina, J., García, H.S. (2003). Mango: post-harvest operations. En: AGSI/FAO (eds.), *Compendium on post-harvest operations*, (INPhO/FAO). <http://www.fao.org/inpho/> [Consulta: Feb-2009]
- De Temmerman, J., Verboven, P., Nicolai, B., Ramon, H. (2007). Modelling of transient moisture concentration of semolina pasta during air drying, *Journal of Food Engineering*, 80(3): 892-903.
- Do Carmo, J.E.F., De Lima, A.G.B. (2008). Modeling and simulation of the continuous and intermittent drying (tempering) of lentil grains. En: Thorat, B.N. (ed.), *Proceedings of the 16th International Drying Symposium IDS 2008* (UICT, Mumbai, India), pp. 468-473.
- Dong, R.J., Lu, Z.H., Liu, Z.Q., Nishiyama, Y., Cao, W. (2009). Moisture distribution in a rice kernel during tempering drying, *Journal of Food Engineering*, 91(1): 126-132.
- FAO. (2009a). Current situation and medium-term outlook for tropical fruits, (FAO). <http://www.fao.org/es/esc/en/15/217/index.html> [Consulta: Feb-2009]
- FAO. (2009b). FAO statistical databases and data-sets FAOSTAT, (FAO Statistics Division). <http://faostat.fao.org/site/406/default.aspx> [Consulta: Feb-2009]
- Fernández-Vidal, L. (2007). *Contribución al análisis y control de procesos agroalimentarios: aplicación del análisis de imagen en procesos de secado*, (Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España). Tesis Doctoral.
- Figura, L.O., Teixeira, A.A. (2007). *Food physics*, (Springer, Berlin, Alemania).
- Galán-Saúco, V. (2004). Mango production and world market: Current situation and future prospects, *ISHS Acta Horticulturae*, 645: 107-116.
- Garau, M.C. (2008). *Optimización del proceso de secado de diferentes productos agrícolas para la obtención de concentrados de frutas y hortalizas de elevada calidad*, (Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España). Tesis Doctoral.
- Garau, M.C., Simal, S., Femenia, A., Rosselló, C. (2006). Drying of orange skin: drying kinetics modelling and functional properties, *Journal of Food Engineering*, 75(2): 288-295.
- Garau, M.C., Simal, S., Rosselló, C., Femenia, A. (2007). Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties of dietary fibre and antioxidant capacity of orange (*Citrus aurantium* v. Canoneta) by-products, *Food Chemistry*, 104(3): 1014-1024.
- García-Pascual, P. (2004). *Deshidratación y conservación de setas silvestres: Morchella esculenta y Boletus edulis*, (Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España). Tesis Doctoral.
- García-Pascual, P., Sanjuán, N., Melis, R., Mulet, A. (2006). Morchella esculenta (morel) rehydration process modelling, *Journal of Food Engineering*, 72(4): 346-353.

- García-Pérez, J.V. (2007). *Contribución al estudio de la aplicación de ultrasonidos de potencia en el secado convectivo de alimentos*, (Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España). Tesis Doctoral.
- García-Pérez, J.V., Cárcel, J.A., Clemente, G., Mulet, A. (2008). Water sorption isotherms for lemon peel at different temperatures and isosteric heats, *LWT-Food Science and Technology*, 41: 18-25.
- Gaston, A.L., Abalone, R.M., Giner, S.A. (2002). Wheat drying kinetics. Diffusivities for sphere and ellipsoid by finite elements, *Journal of Food Engineering*, 52(4): 313-322.
- Geankoplis, C.J. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*, 3 edn., (CECSA, México).
- Genskow, L.R., Beimesch, W.E., Hecht, J.P., Kemp, I.C., Langrish, T., Schwartzbach, C., Smith, L. (2008). Psychrometry, evaporative cooling, and solids drying. En: Green, D.W., Perry, R.H. (eds.), *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 8 edn. (McGraw-Hill, USA).
- Goyal, R.K., Kingsly, A.R.P., Manikantan, M.R., Ilyas, S.M. (2006). Thin-layer drying kinetics of raw mango slices, *Biosystems Engineering*, 95(1): 43-49.
- Hallström, B., Gekas, V., Sjöholm, I., Romulus, A.M. (2007). Mass transfer in foods. En: Heldman, D.R., Lund, B.B. (eds.), *Handbook of food engineering* (CRC Press, New York, USA).
- Hernández, J.A., García, M.A., Trystram, G., Heyd, B. (2004). Neural networks for the heat and mass transfer prediction during drying of cassava and mango, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5: 57-64.
- Ho, J.C., Chou, S.K., Chua, K.J., Mujumdar, A.S., Hawlader, M.N.A. (2002). Analytical study of cyclic temperature drying: effect on drying kinetics and product quality, *Journal of Food Engineering*, 51(1): 65-75.
- Ho, J.C., Chou, S.K., Mujumdar, A.S., Hawlader, M.N.A., Chua, K.J. (2001). An optimisation framework for drying of heat-sensitive products, *Applied Thermal Engineering*, 21: 1779-1798.
- Hottel, H.C., Noble, J.J., Sarofim, A.F., Silcox, G.D., Wancat, P.C., Knaebel, K.S. (2008). Heat and mass transfer. En: Green, D.W., Perry, R.H. (eds.), *Perry's chemical engineers' handbook*, 8 edn. (McGraw-Hill, New York, USA).
- Iguaz, A., Martín, M.B.S., Mate, J.I., Fernández, T., Virseda, P. (2003). Modelling effective moisture diffusivity of rough rice (Lido cultivar) at low drying temperatures, *Journal of Food Engineering*, 59(2-3): 253-258.
- Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer*, 6 edn., (John Wiley & Sons, USA).
- Islam, R., Ho, J.C., Mujumdar, A.S. (2003). Convective drying with time-varying heat input: Simulation results, *Drying Technology*, 21(7): 1333-1356.

-
- Janjai, S., Bala, B.K., Tohsing, K., Mahayothee, B., Haewsungcharern, M., Müller, J. (2007). Moisture sorption isotherms and heat of sorption of mango (*Mangifera Indica* L. cv. Nam Dok Mai), *International Agricultural Engineering Journal*, 16(3-4): 159-168.
- Janjai, S., Lamlert, N., Intawee, P., Mahayothee, B., Haewsungcharern, M., Bala, B.K., Müller, J. (2008). Finite element simulation of drying of mango, *Biosystems Engineering*, 99(4): 523-531.
- Jayaraman, K.S., Das Gupta, D.K. (2006). Drying of fruits and vegetables. En: Mujumdar, A.S. (ed.), *Handbook of Industrial Drying*, 3 edn. (CRC Press, Boca Raton, FL, USA).
- Jumah, R., Al-Kteimat, E., Al-Hamad, A., Telfah, E. (2007). Constant and intermittent drying characteristics of olive cake, *Drying Technology*, 25: 1421-1426.
- Jumah, R., Mujumdar, A.S. (2005). Modeling intermittent drying using an adaptive neuro-fuzzy inference system, *Drying Technology*, 23: 1075-1092.
- Karel, M., Lund, D.B. (2003). *Physical principles of food preservation*, 2 edn., (Marcel Dekker, New York, USA).
- Kaymak-Ertekin, F., Gedik, A. (2004). Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes, *LWT-Food Science and Technology*, 37(4): 429-438.
- Kittiworawatt, S., Devahastin, S. (2009). Improvement of amathematicalmodel for low-pressure superheated steamdrying of a biomaterial, *Chemical Engineering Science*, 64: 2644-2650.
- Kosterman, A.J.G.H., Bompard, J.M. (1993). *The mangoes, their botany, nomenclature, horticulture, and utilization*, (Academic Press, London, UK).
- Krokida, M., Maroulis, Z. (2000). Quality changes during drying of food materials. En: Mujumdar, A.S. (ed.), *Drying Technology in Agriculture and Food Sciences* (Science Pub Inc., Enfield, NH, USA), pp. 61-98.
- Kudra, T., Mujumdar, A.S. (2009). *Advanced drying technologies*, 2 edn., (CRC Press, Boca Raton, FL, USA).
- Laohasongkram, K., Chaiwanichsiri, S., Thunpithayakul, C., Ruedeesarnt, W. (1995). Thermal properties of mangoes, *Journal of the Science Society of Thailand*, 21: 63-74.
- Lee, S., Yovanovich, M.M., Jafarpur, K. (1991). Effects of geometry and orientation on laminar natural convection from isothermal bodies, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 5(2): 208-216.
- Lewicki, P.P. (2006). Design of hot air drying for better foods, *Trends in Food Science & Technology*, 17(4): 153-163.
- Liu, G., Yang, J., Whidborne, J. (2003). *Multiobjective optimisation and control*, (Research Studies Press, Baldock, Hertfordshire, England).
- Lozano, J.E. (2006). *Fruit manufacturing*, (Springer, New York, USA).
- Madamba, P.S., Yabes, R.P. (2005). Determination of the optimum intermittent drying conditions for rough rice (*Oryza sativa*, L.), *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 38: 157-165.

- Maneepun, S., Yunchalad, M. (2004). Developing processed mango products for international markets. En: Pinto, A.C.Q., Pereira, M.E.C., Alves, R.E. (eds.), *ISHS Acta Horticulturae 645* (ISHS, Recife, Brazil), pp. 93-105.
- Marfil, P.H.M., Santos, E.M., Telis, V.R.N. (2008). Ascorbic acid degradation kinetics in tomatoes at different drying conditions, *LWT-Food Science and Technology*, 41(9): 1642-1647.
- Marinos-Kouris, D., Maroulis, Z.B. (2006). Transport properties in the drying of solids. En: Mujumdar, A.S. (ed.), *Handbook of Industrial Drying*, 3 edn. (CRC Press, Boca Raton, FL, USA), pp. 81-119.
- Mikleš, J., Fikar, M. (2007). *Process modelling, identification, and control*, (Springer, NY, USA).
- Molnár, K. (2006). Experimental techniques in drying. En: Mujumdar, A.S. (ed.), *Handbook of Industrial Drying*, 3 edn. (CRC Press, Boca Raton, FL, USA).
- Mujumdar, A.S. (2004). Research and developments in drying: recent trends and future prospects, *Drying Technology*, 22(1): 1-26.
- Mujumdar, A.S. (2006). Principles, classification and selection of dryers. En: Mujumdar, A.S. (ed.), *Handbook of Industrial Drying*, 3 edn. (CRC Press, Boca Raton, FL, USA), pp. 3-32.
- Mulet, A., Blasco, M., García-Reverter, J., García-Pérez, J.V. (2005). Drying kinetics of *Curcuma longa* rhizomes, *Journal of Food Science*, 70(5): E318-E323.
- Mulet, A., Cárcel, J.A., Sanjuán, N., Bon, J. (2003). New food drying technologies - Use of ultrasound, *Food Science and Technology International*, 9(3): 215-221.
- Mulet, A., García-Reverter, J., Sanjuán, R., Bon, J. (1999). Sorption isosteric heat determination by thermal analysis and sorption isotherms, *Journal of Food Science*, 64: 64-68.
- Nesvadba, P. (2005). Thermal properties of unfrozen foods. En: Rao, M.A., Rizvi, S.S.H., Datta, A.K. (eds.), *Engineering Properties of Foods*, 3 edn. (CRC Press, New York, USA), pp. 149-173.
- Niamnuy, C., Devahastin, S., Soponronnarit, S., Raghavan, G.S.V. (2008). Modeling coupled transport phenomena and mechanical deformation of shrimp during drying in a jet spouted bed dryer, *Chemical Engineering Science*, 63(22): 5503-5512.
- Nishiyama, Y., Cao, W., Li, B. (2006). Grain intermittent drying characteristics analyzed by a simplified model, *Journal of Food Engineering*, 76: 272-279.
- Pakowski, Z., Mujumdar, A.S. (2006). Basic process calculations and simulations in drying. En: Mujumdar, A.S. (ed.), *Handbook of Industrial Drying*, 3 edn. (CRC Press, Boca Raton, FL, USA).
- Pan, Y.K., Zhao, L.J., Dong, Z.X., Mujumdar, A.S., Kudra, T. (1999a). Intermittent drying of carrot in a vibrated fluid bed: Effect on product quality, *Drying Technology*, 17(10): 2323-2340.

-
- Pan, Y.K., Zhao, L.J., Hu, W.B. (1999b). The effect of tempering-intermittent drying on quality and energy of plant materials, *Drying Technology*, 17(9): 1795-1812.
- Perera, C.O. (2005). Selected quality attributes of dried foods, *Drying Technology*, 23(4): 717-730.
- Poling, B.E., Prausnitz, J.M., O'Connell, J.P. (2000). *The properties of gases and liquids*, 5 edn., (McGraw-Hill, USA).
- Pott, I., Neidhart, S., Mühlbauer, W., Carle, R. (2005). Quality improvement of non-sulphited mango slices by drying at high temperatures, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 6: 412-419.
- Raghavan, G.S.V., Orsat, V. (2006). Recent advances in drying of bio-materials for superior quality bio-products, *Proceedings of the 15th International Drying Symposium IDS 2006*, A: 44-53.
- Raghavan, G.S.V., Rennie, T.J., Sunjka, P.S., Orsat, V., Phaphuangwittayakul, W., Terdtoon, P. (2005). Overview of new techniques for drying biological materials with emphasis on energy aspects, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 22(2): 195-201.
- Ramaswamy, H., Marcotte, M. (2005). *Food processing: principles and applications*, (Taylor & Francis, Boca Raton, FL, USA).
- Reyes, A., Alvarez, P.I., Marquardt, F.H. (2002). Drying of carrots in a fluidized bed. I. Effects of drying conditions and modelling, *Drying Technology*, 20(7): 1463-1483.
- Rizvi, S.S.H. (2005). Thermodynamic properties of food in dehydration. En: Rao, M.A., Rizvi, S.S.H., Datta, A.K. (eds.), *Engineering Properties of Foods*, 3 edn. (CRC Press, New York, USA), pp. 133-214.
- Sablani, S.S. (2006). Drying of fruits and vegetables: Retention of nutritional/functional quality, *Drying Technology*, 24(2): 123-135.
- Sahin, S., Sumnu, S.G. (2006). *Physical properties of foods*, (Springer, USA).
- Sanjuán, N., Cárcel, J.A., Clemente, G., Mulet, A. (2001). Modelling of the rehydration process of broccoli florets, *European Food Research and Technology*, 212(4): 449-453.
- Santos, P.H.S., Silva, M.A. (2008). Retention of Vitamin C in Drying Processes of Fruits and Vegetables A Review, *Drying Technology*, 26(12): 1421-1437.
- Saravacos, G.D. (2005). Mass transfer properties of foods. En: Rao, M.A., Rizvi, S.S.H., Datta, A.K. (eds.), *Engineering Properties of Foods*, 3 edn. (CRC Press, New York, USA), pp. 149-173.
- Saravacos, G.D., Maroulis, Z.B. (2001). *Transport properties of foods*, (Marcel Dekker, New York, USA).
- Schluterman, D.A., Siebenmorgen, T.J. (2007). Relating rough rice moisture content reduction and tempering duration to head rice yield reduction, *Transactions of the ASABE*, 50(1): 137-142.
- Senadeera, W., Bhandari, B.R., Young, G., Wijesinghe, B. (2003). Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying, *Journal of Food Engineering*, 58(3): 277-283.

- Shei, H.J., Chen, Y.L. (2002). Computer simulation on intermittent drying of rough rice, *Drying Technology*, 20(3): 615-636.
- Sheskin, D. (2004). *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures*, 3 edn., (CRC Press, Boca Raton, FL, USA).
- Simal, S., Femenia, A., Cárcel, J.A., Rosselló, C. (2005a). Mathematical modelling of the drying curves of kiwi fruits: influence of the ripening stage, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(3): 425-432.
- Simal, S., Femenia, A., Castell-Palou, A., Rosselló, C. (2007). Water desorption thermodynamic properties of pineapple, *Journal of Food Engineering*, 80(4): 1293-1301.
- Simal, S., Femenia, A., Garau, M.C., Rosselló, C. (2005b). Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit, *Journal of Food Engineering*, 66(3): 323-328.
- Simal, S., Garau, M.C., Femenia, A., Rosselló, C. (2006). A diffusional model with a moisture-dependent diffusion coefficient, *Drying Technology*, 24: 1365-1372.
- Srikiatden, J., Roberts, J.S. (2007). Moisture transfer in solid food materials: A review of mechanisms, models, and measurements, *International Journal of Food Properties*, 10(4): 739-777.
- Strumillo, C., Jones, P.L., Zylla, R. (2006). Energy aspects in drying. En: Mujumdar, A.S. (ed.), *Handbook of Industrial Drying*, 3 edn. (CRC Press, Boca Raton, FL, USA).
- Telis, V.R.N., Telis-Romero, J., Sobral, P.J.A., Gabas, A.L. (2007). Freezing point and thermal conductivity of tropical fruit pulps: mango and papaya, *International Journal of Food Properties*, 10: 73-84.
- Telis-Romero, J., Kohayakawa, M.N., Silveira Jr, V., Pedro, M.A.M., Gabas, A.L. (2005). Enthalpy-entropy compensation based on isotherms of mango, *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 25: 297-303.
- Telis-Romero, J., Telis, V.R.N., Gabas, A.L., Yamashita, F. (1998). Thermophysical properties of brazilian orange juice as affected by temperature and water content, *Journal of Food Engineering*, 38: 27-40.
- Thakur, A.K., Gupta, A.K. (2006). Two stage drying of high moisture paddy with intervening rest period, *Energy Conversion and Management*, 47(18-19): 3069-3083.
- The MathWorks. (2007). *MATLAB user's guide*, (The MathWorks Inc., South Natick, MA, USA).
- Timmermann, E.O., Chirife, J., Iglesias, H.A. (2001). Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters?, *Journal of Food Engineering*, 48(1): 19-31.
- Toledo, R.T. (2006). *Fundamentals of food process engineering*, 3 edn., (Springer, New York, USA).
- Torres, J.D. (2007). *Optimización de las condiciones de operación de tratamientos osmóticos destinados al procesado mínimo de mango (Mangifera indica L.)*, (Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España). Tesis Doctoral.

-
- Váquiro, H.A., Clemente, G., García-Pérez, J.V., Mulet, A., Bon, J. (2009). Enthalpy-driven optimization of intermittent drying of *Mangifera indica* L., *Chemical Engineering Research and Design*, 87: 885-898.
- Walstra, P. (2003). *Physical chemistry of foods*, (Marcel Dekker, New York).
- Wilhelm, L.R., Suter, D.A., Brisewitz, G.H. (2004). *Food & process engineering technology*, (American Society of Biological and Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan).
- Xing, H., Takhar, P.S., Helms, G., He, B. (2007). NMR imaging of continuous and intermittent drying of pasta, *Journal of Food Engineering*, 78: 61-68.
- Yovanovich, M.M., Jafarpur, K. (1993). Models of Laminar Natural Convection from Vertical and Horizontal Isothermal Cuboids for All Prandtl Numbers and Rayleigh Numbers Below 10^{11} , *ASME Heat Transfer Division, Publication HTD*, 264: 111-126.

10. ANEXOS

10. ANEXOS

Anexo 1. Cámara de secado del equipo de laboratorio utilizado en las experiencias

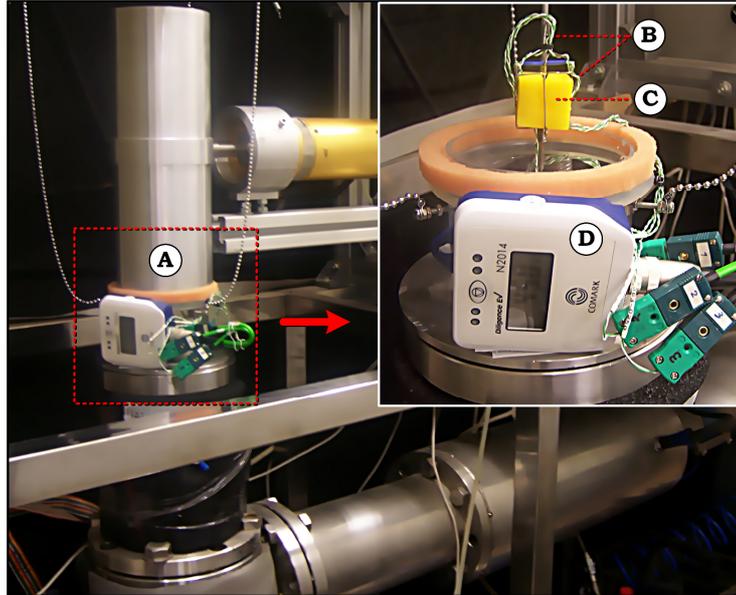


Figura A1.1. Detalle de la cámara de secado del equipo de laboratorio utilizado en las experiencias. A. Cámara de secado; B. Termopares; C. Muestra (cubo de mango); D. Registrador de temperaturas portable.

Anexo 2. Tráferencia de calor por conducci3n a trav3s de la celda utilizada en la medici3n del calor espec3fico

Seg3n el procedimiento empleado por Bellet et al. (1975), la soluci3n de la Ec. (4.3.4), con las condiciones iniciales y de contorno correspondientes, se reduce a la Ec. (10.1), la cual expresa diferencia entre la temperatura en la cara interna del cilindro interior (T_1 , °C), medida desde el inicio del calentamiento de la celda, y el valor asint3tico que esta alcanza al final del calentamiento (T_α , °C).

$$T_\alpha(r_1) - T_1(r_1, t) = \frac{Q_r}{2\pi\kappa} \Phi[J_0(\beta r_1)] \exp\left(\frac{\kappa\beta^2 t}{\rho c_p}\right) \quad (10.1)$$

donde r_1 (m) es el radio interno del cilindro interior; Φ es una combinaci3n de las funciones de Bessel de primera especie de orden cero (J_0); β representa los valores caracter3sticos del problema; Q_r es el flujo de calor emitido por la resistencia el3ctrica (W); ρ (kg m^{-3}), κ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) y c_p ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) son la densidad, la conductividad t3rmica y el calor espec3fico de la muestra, respectivamente.

Al representar gráficamente el logaritmo de la diferencia de temperaturas ($\log[T_\alpha(r_1) - T_1(r_1, t)]$) en funci3n del tiempo, se obtiene una l3nea recta cuya pendiente (p) es igual a la Ec. (10.2).

$$p = \frac{\kappa\beta^2}{\rho c_p} \quad (10.2)$$

Los valores de β que satisfacen la Ec. (10.3) se estimaron mediante un c3lculo iterativo y se reemplazaron en la Ec. (10.2) para estimar el calor espec3fico de la muestra, siendo J_1 la funci3n de Bessel de primera especie de orden uno; I_0 y I_1 la funci3n modificada de Bessel de primera especie de orden cero y uno, respectivamente.

$$\beta \left[\frac{J_1(\beta r_1) I_0(\beta r_2) - J_0(\beta r_2) I_1(\beta r_1)}{J_0(\beta r_1) I_0(\beta r_2) - J_0(\beta r_2) I_0(\beta r_1)} \right] = \frac{p \rho' c_p' r_1}{2\kappa} \quad (10.3)$$

El cálculo de la Ec. (10.3) requiere el conocimiento de la conductividad térmica y la densidad de la muestra (ρ y κ), así como de la densidad y el calor específico del material de la celda ($\rho' = 8890 \text{ kg m}^{-3}$ y $c_p' = 0.403 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

Anexo 3. Conductividad térmica de la pulpa de mango

Tabla A3.1. Conductividad térmica de la pulpa de mango (κ , $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) variedad “Tommy Atkins” a diferentes contenidos de humedad y temperaturas. Valores experimentales promedio y desviación estándar para tres repeticiones.

Temperatura (°C)	Contenido de humedad (W , kg kg^{-1} b.s.)				
	1.1	1.5	2.3	4	9
20	0.377 ± 0.002	0.422 ± 0.001	0.475 ± 0.002	0.530 ± 0.002	0.586 ± 0.002
28	0.387 ± 0.002	0.426 ± 0.001	0.486 ± 0.006	0.541 ± 0.001	0.589 ± 0.002
36	0.388 ± 0.001	0.436 ± 0.002	0.486 ± 0.001	0.541 ± 0.001	0.600 ± 0.003
44	0.392 ± 0.002	0.435 ± 0.002	0.491 ± 0.002	0.545 ± 0.001	0.600 ± 0.001
55	0.400 ± 0.000	0.447 ± 0.001	0.496 ± 0.002	0.551 ± 0.002	0.607 ± 0.001
66	0.407 ± 0.001	0.450 ± 0.001	0.509 ± 0.002	0.564 ± 0.003	0.611 ± 0.003
72	0.409 ± 0.002	0.454 ± 0.001	0.508 ± 0.002	0.562 ± 0.002	0.623 ± 0.002
80	0.419 ± 0.002	0.458 ± 0.001	0.513 ± 0.001	0.567 ± 0.002	0.622 ± 0.001

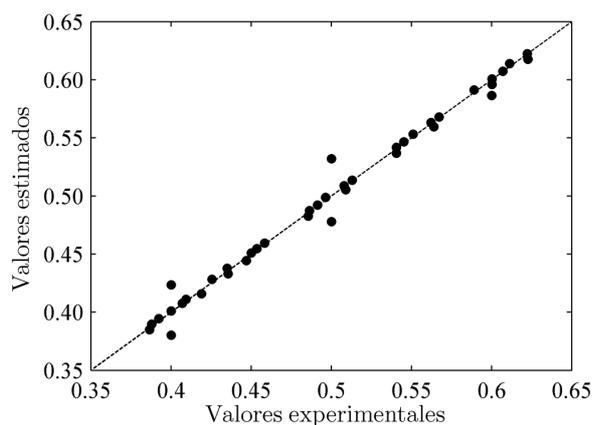


Figura A3.1. Conductividad térmica de la pulpa de mango (κ , $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$). Valores experimentales y estimados.

Comparación con los resultados de otras variedades

Los resultados obtenidos por Telis et al. (2007) en la determinación de la conductividad térmica de pulpa de mango de la variedad “Keith” a un contenido de humedad de 5.41 kg kg^{-1} (b.s.) y temperaturas de 18.3 y 74 °C presentaron una diferencia promedio de $0.029 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (~5 %) con los resultados del presente estudio. Por otra parte, los resultados reportados por Laohasongkram et al. (1995) para la conductividad térmica de pulpa de mango de la variedad “Kaew” a temperaturas de 60 y 80 °C presentaron diferencias promedio con los resultados del presente estudio del orden de $0.086 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (~20 %) y $0.276 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (~49 %) para contenidos de humedad de 1.5 y 4 kg kg^{-1} (b.s.), respectivamente.

Anexo 4. Calor específico de la materia seca del mango

Tabla A4.1. Calor específico de la materia seca del mango (c_{pdm} , $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) variedad “Tommy Atkins” a diferentes contenidos de humedad y temperaturas. Valores experimentales promedio y desviación estándar para 11 mediciones.

Temperatura (°C)	c_{pdm} ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)*
20	1.317 ± 0.213
25	1.416 ± 0.228
30	1.541 ± 0.244
35	1.690 ± 0.256
40	1.849 ± 0.283
45	1.951 ± 0.282
50	2.007 ± 0.271
55	2.044 ± 0.263
60	2.079 ± 0.258
65	2.091 ± 0.262
70	2.099 ± 0.249

*En la tabla se presentan los valores de calor específico en 11 temperaturas de un total de 100 puntos experimentales.

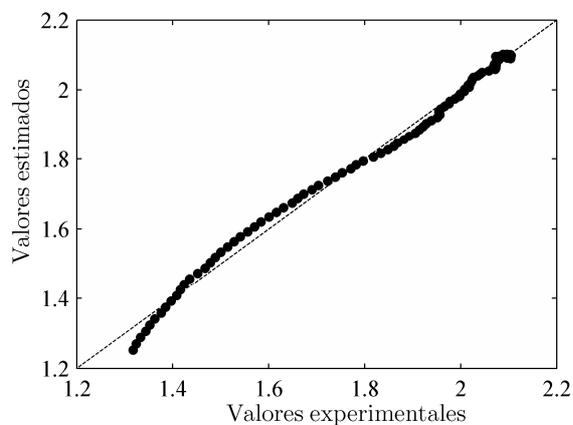


Figura A4.1. Calor específico de la materia seca del mango (c_{pdm} , $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$). Valores experimentales y estimados.

Anexo 5. Calor específico de la pulpa de mango

Tabla A5.1. Calor específico de la pulpa de mango (c_p , $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) variedad “Tommy Atkins” a diferentes contenidos de humedad y temperaturas. Valores experimentales promedio y desviación estándar para tres repeticiones

Temperatura (°C)	Contenido de humedad (W , kg kg^{-1} b.s.)				
	1.1	1.5	2.3	4	9
20	2.833 ± 0.012	3.019 ± 0.003	3.362 ± 0.010	3.727 ± 0.011	4.093 ± 0.012
28	2.787 ± 0.013	3.024 ± 0.010	3.290 ± 0.040	3.650 ± 0.007	4.091 ± 0.012
36	2.813 ± 0.009	2.961 ± 0.012	3.319 ± 0.004	3.682 ± 0.004	4.007 ± 0.020
44	2.816 ± 0.018	3.004 ± 0.014	3.307 ± 0.009	3.668 ± 0.007	4.042 ± 0.005
55	2.790 ± 0.000	2.939 ± 0.007	3.307 ± 0.014	3.662 ± 0.013	4.020 ± 0.005
66	2.782 ± 0.006	2.965 ± 0.007	3.234 ± 0.011	3.584 ± 0.021	4.020 ± 0.017
72	2.790 ± 0.014	2.959 ± 0.003	3.268 ± 0.012	3.621 ± 0.012	3.938 ± 0.009
80	2.738 ± 0.013	2.951 ± 0.004	3.258 ± 0.008	3.609 ± 0.011	3.975 ± 0.008

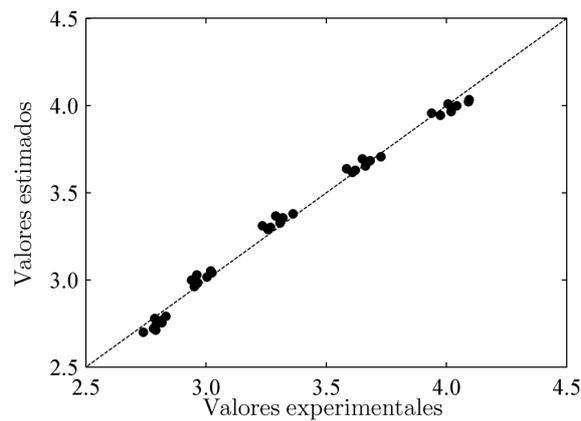


Figura A5.1. Calor específico de la pulpa de mango (c_p , $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$). Valores experimentales y estimados.

Comparación con los resultados de otras variedades

Los resultados reportados por Laohasongkram et al. (1995) para el calor específico de la pulpa de mango de la variedad “Kaew” a temperaturas de 60 y 80 °C presentaron diferencias promedio con los resultados del presente estudio del orden de $0.679 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (~23 %) y $0.141 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (~4 %) para contenidos de humedad de 0.6 y 0.8 kg kg^{-1} (b.h.), respectivamente.

Anexo 6. Densidad de la pulpa de mango

A continuación se presentan los resultados de la determinación de densidad de la pulpa de mango a diferentes contenidos de humedad y temperaturas. El conocimiento de la densidad es necesario para el cálculo del calor específico mediante el método de la celda (apartado 4.3.2.2)

En la Tabla A6.1 se muestran los datos experimentales de la determinación de la densidad de la pulpa de mango a temperaturas entre 20 y 80 °C, y contenidos de humedad entre 1.1 y 9 kg kg⁻¹ (b.s.). Los datos experimentales presentaron valores entre 1192 y 988.8 kg m⁻³.

El modelo ajustado que describe la influencia del contenido de humedad (W , kg kg⁻¹ b.s) y la temperatura (T , °C) sobre la densidad de pulpa de mango (ρ , kg m⁻³) fue definido según la Ec. (10.4).

Tabla A6.1. Densidad de la pulpa de mango (ρ , kg m⁻³) variedad "Tommy Atkins" a diferentes contenidos de humedad y temperaturas. Valores experimentales promedio y desviación estándar para tres repeticiones

Temperatura (°C)	Contenido de humedad (W , kg kg ⁻¹ b.s.)				
	1.1	1.5	2.3	4	9
20	1170.2 ± 5.3	1140.7 ± 1.9	1089.2 ± 4.5	1045.8 ± 3.5	1005.0 ± 1.5
28	1192.2 ± 3.5	1132.4 ± 4.3	1109.6 ± 7.5	1063.7 ± 3.2	1002.2 ± 3.4
36	1173.2 ± 1.9	1153.6 ± 4.1	1091.8 ± 1.8	1046.5 ± 1.6	1015.9 ± 4.0
44	1166.5 ± 4.4	1128.7 ± 5.1	1090.0 ± 1.8	1044.7 ± 1.6	999.5 ± 1.5
55	1172.1 ± 1.0	1149.2 ± 3.7	1081.3 ± 4.9	1037.8 ± 3.5	998.9 ± 1.5
66	1169.5 ± 1.7	1130.1 ± 1.9	1100.7 ± 3.6	1054.8 ± 3.7	995.9 ± 4.1
72	1161.7 ± 2.5	1128.8 ± 1.9	1083.5 ± 1.8	1038.3 ± 1.5	1007.5 ± 3.2
80	1183.0 ± 3.6	1126.9 ± 1.9	1081.7 ± 1.8	1036.4 ± 1.6	995.6 ± 2.4

$$\rho = 1417 - 453.2 \left(\frac{W}{W+1} \right) - 0.1878 T \quad (10.4)$$

La varianza explicada (*VAR*) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RMSE*) del ajuste de la Ec. (10.4) fueron 99.1 % y 1.29, respectivamente. En la Figura A6.1 se muestra la similitud entre los valores experimentales y los valores estimados mediante la Ec. (10.4).

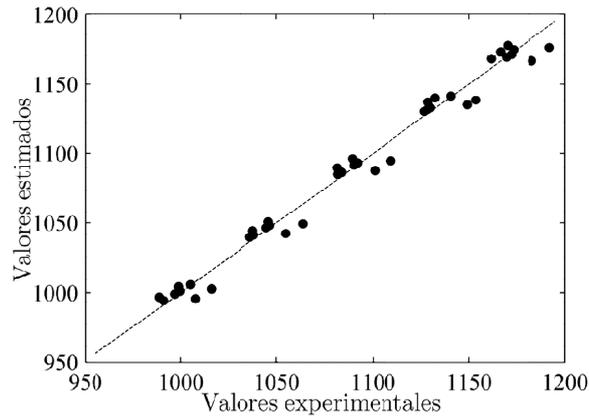


Figura A6.1. Densidad de la pulpa de mango (ρ , kg m^{-3}). Valores experimentales y estimados.

Al igual que en la conductividad térmica, la densidad de la pulpa de mango presentó una mayor dependencia con el contenido de humedad que con la temperatura. La densidad presentó una variación promedio de $173.1 \pm 14.8 \text{ kg m}^{-3}$ entre contenidos de humedad de 1.1 y 9 kg kg^{-1} (b.s.) para las diferentes temperaturas, y una variación promedio de $28 \pm 1.5 \text{ kg m}^{-3}$ entre temperaturas de 20 y 80 °C para los diferentes contenidos de humedad (Tabla A6.1). En los valores estimados que se muestran en la Figura A6.2 se aprecia la influencia del contenido de humedad y la temperatura sobre la densidad de la pulpa de mango.

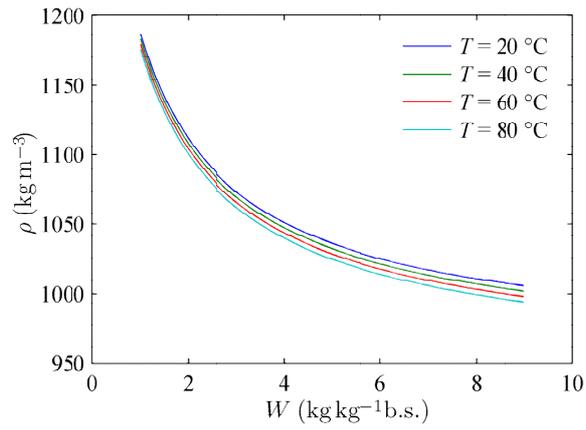


Figura A6.2. Influencia del contenido de humedad (W , kg kg⁻¹ b.s.) y la temperatura (T , °C) en la densidad de la pulpa de mango (ρ , kg m⁻³).

Anexo 7. Isotermas de sorción de la pulpa de mango

Tabla A7.1. Actividad de agua de la pulpa de mango (φ) var. “Tommy Atkins” a diferentes contenidos de humedad y temperaturas. Valores experimentales promedio y desviación estándar para tres mediciones

W_e (kg kg ⁻¹ b.s.)	Temperatura (°C)				
	10	20	30	40	50
2.829 ± 0.002	0.967 ± 0.014	0.973 ± 0.013	0.974 ± 0.014	0.977 ± 0.017	0.975 ± 0.006
1.925 ± 0.001	0.949 ± 0.019	0.957 ± 0.015	0.958 ± 0.013	0.959 ± 0.016	0.965 ± 0.019
1.564 ± 0.001	0.938 ± 0.017	0.941 ± 0.011	0.942 ± 0.011	0.945 ± 0.013	0.950 ± 0.017
1.251 ± 0.003	0.925 ± 0.013	0.927 ± 0.007	0.927 ± 0.006	0.930 ± 0.010	0.938 ± 0.015
0.725 ± 0.004	0.877 ± 0.025	0.883 ± 0.012	0.884 ± 0.009	0.886 ± 0.012	0.892 ± 0.018
0.192 ± 0.002	0.605 ± 0.019	0.607 ± 0.012	0.610 ± 0.012	0.618 ± 0.012	0.633 ± 0.012
0.146 ± 0.001	0.554 ± 0.009	0.561 ± 0.009	0.569 ± 0.007	0.578 ± 0.007	0.591 ± 0.007
0.078 ± 0.001	0.410 ± 0.014	0.417 ± 0.012	0.423 ± 0.015	0.434 ± 0.015	0.447 ± 0.015
0.386 ± 0.001	0.784 ± 0.018	0.787 ± 0.006	0.788 ± 0.005	0.793 ± 0.007	0.799 ± 0.013
0.035 ± 0.002	0.266 ± 0.024	0.250 ± 0.011	0.231 ± 0.004	0.226 ± 0.008	0.227 ± 0.017
0.031 ± 0.002	0.217 ± 0.011	0.217 ± 0.017	0.215 ± 0.004	0.217 ± 0.009	0.220 ± 0.019

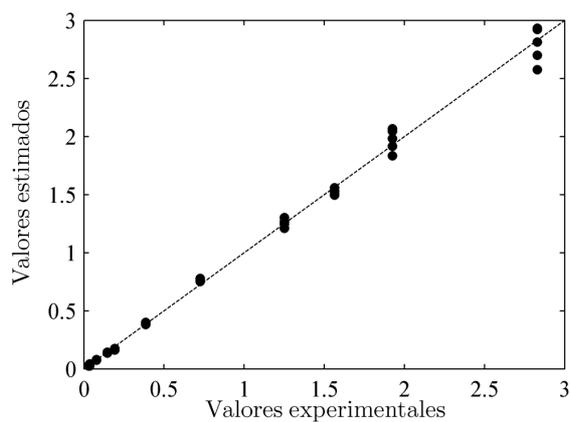


Figura A7.1. Contenido de humedad de equilibrio de la pulpa de mango (W_e , kg kg⁻¹ b.s.). Valores experimentales y valores estimados con el modelo de GAB.

Comparación con los resultados de otras variedades

Las isothermas de sorción determinadas en el presente estudio para pulpa de mango de la variedad “Tommy Atkins” han sido comparadas con los resultados reportados por Janjai et al. (2007), Hernández et al. (2004) y Telis-Romero et al. (2005) para isothermas de sorción de las variedades de mango “Nam Dok Mai”, “Manila” y “Haden”, respectivamente (Figura A7.2). Janjai et al. (2007) determinaron las isothermas de sorción usando un método dinámico a temperaturas entre 30 y 50 °C y actividades de agua entre 0.11 y 0.97. Telis-Romero et al. (2005) usaron un método gravimétrico estático a temperaturas entre 30 y 70 °C y actividades de agua entre 0.02 y 0.97.

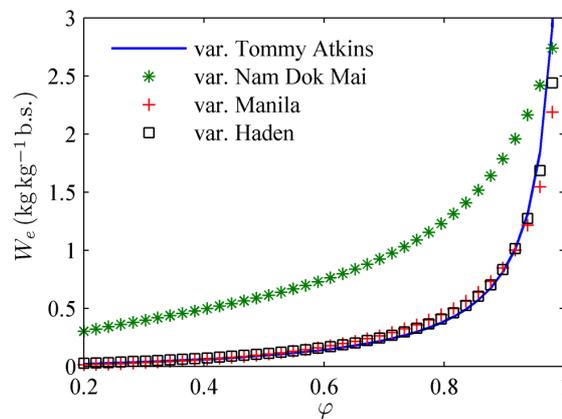


Figura A7.2. Isothermas de sorción estimadas para diferentes variedades de mango: “Tommy Atkins”, “Nam Dok Mai” (Janjai et al., 2007), “Manila” (Hernández et al., 2004) y “Haden” (Telis-Romero et al., 2005).

Para las variedades “Tommy Atkins”, “Nam Dok Mai” (Janjai et al., 2007), y “Haden” (Telis-Romero et al., 2005) se utilizaron valores estimados mediante el modelo de GAB a 50 °C, mientras que para la variedad “Manila” (Hernández et al., 2004) se emplearon valores

estimados a partir del modelo de Henderson modificado sin considerar el efecto de la temperatura (tal como fue reportado por los autores).

Las estimaciones correspondientes a las variedades “Haden” y “Manila” mostraron resultados muy cercanos a los de la variedad “Tommy Atkins” (Figura A7.2), con diferencias promedio en el contenido de humedad de equilibrio del orden de $0.001 \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$ ($\sim 0.27 \%$) y $0.011 \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$ ($\sim 3 \%$), respectivamente, en un rango de actividades de agua entre 0.2 y 0.98. Por su parte, las estimaciones correspondientes a la variedad “Nam Dok Mai” presentaron una notable discrepancia con los datos del presente estudio al mostrar diferencias promedio en el contenido de humedad de equilibrio del orden de $0.583 \text{ kg kg}^{-1} \text{ b.s.}$ ($\sim 164 \%$). La diferencia presentada por la variedad “Nam Dok Mai” puede ser atribuida a las características propias de la variedad o del estado fisiológico de los frutos, que conducen a diferencias en la composición química de la pulpa en comparación con las demás variedades.

Anexo 8. Programas desarrollados en MATLAB

Anexo 8.1. Módulo para la simulación de los periodos de calentamiento

```
function res=CALENT(VD, Periodo, X0, T0, T, t, tf, L, V, mss ,Tamb, awamb, ...
    atol, rtol, inistep, maxstep, crit, Xf, Pfin)

if Periodo==1,
    fem = evalin('base','fem');
else,
    fem0=evalin('base','fem0'); fem=fem0;
end;

ISO=[0.1121 0.056411 161.44 63601 56596]; % Parámetros Isoterma GAB
DIF = VD(1:3); % Parámetros modelo difusivo

% Constantes
fem.const = {'X0',num2str(X0), ...
    'awamb',num2str(awamb), ...
    'mss',num2str(mss), ...
    'L0',num2str(L), ...
    'T0',num2str(T0), ...
    'Xf',num2str(Xf), ...
    'V0',num2str(V), ...
    'Tamb',num2str(Tamb), ...
    'Xm', num2str(ISO(1)), ...
    'Cg0', num2str(ISO(2)), ...
    'Kg0', num2str(ISO(3)), ...
    'Hm', num2str(ISO(4)), ...
    'Hn', num2str(ISO(5)), ...
    'Rg','8.31', ...
    'PMas','28.9', ...
    'PMva','18', ...
    'Pt','1', ...
    'D1',num2str(DIF(1)), ...
    'D2',num2str(DIF(2)), ...
    'D3',num2str(DIF(3))};

% Aplicación - Transferencia de Calor
clear appl
appl.mode.class = 'HeatTransfer';
appl.dim = {'u2'};
appl.assignsuffix = '_ht';
clear prop
clear weakconstr
weakconstr.value = 'off';
weakconstr.dim = {'lm2'};
prop.weakconstr = weakconstr;
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.q0 = {0, 'D*dss*ulx*Qs', 'D*dss*uly*Qs', 'D*dss*ulz*Qs'};
bnd.type = {'q0','q','q','q'};
bnd.Tinf = {0, 'Ts', 'Ts', 'Ts'};
bnd.h = {0, 'hc', 'hc', 'hc'};
bnd.ind = [1,1,1,4,3,2];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.C = 'Cpss+ul*Cpw';
```



```

'ks', '0.201+0.00139*u2-0.00000433*u2^2', ...
'dss', 'mss/(1e3*(2*L)^3)', ...
' Cpss', '0.363+0.052*u2-3.94e-4*u2^2', ...
' Cpw', '1e-3*(4176.2-0.0909*u2+0.0054731*u2^2)', ...
' Kg', 'Kg0*exp((Lr*PMva-Hn)/(Rg*(u2+273.16)))', ...
' Cg', 'Cg0*exp((Hm-Hn)/(Rg*(u2+273.16)))', ...
' a', 'Kg^2*(Cg-1)', ...
' b', 'Kg*(2-Cg*(1-Xm/if(u1<=Xe,Xe,u1)))', ...
' aw0', '(-b+sqrt(b^2+4*a))/(2*a)', ...
' aw', 'if(aw0<awc,awc,if(aw0>1,1,aw0))', ...
' Lr', '2502.535259-2.38576424*u2', ...
' Qs', 'Lr+8.31*((u2+273.16)^2)*(1/aw)*diff(aw,u2)/PMva', ...
' dah', '(1+Xa)*Pt/((1/28.9+Xa/18)*0.082*(Tp+273))', ...
' Xa', 'Pv/(Pt-Pv)*PMva/PMas', ...
' xa', 'Xa/(0.622+Xa)', ...
' Pv', 'awp*Psp', ...
' DAB', '(0.0118e-7*(Tp+273.16)^1.75)/Pt', ...
' Tp', '0.5*(Ts+u2)', ...
' Ld', 'sqrt(6*(2*L)^2)', ...
' vva', '-1.758e-006+3.7e-008*(273+Tp)', ...
' vas', '-0.00000000041531*Tp^2+0.000000050378 * Tp + 0.000017148', ...
' fas', '((1+abs(vas/vva)^0.5*(PMva/PMas)^0.25)^2)/(8*(1+PMas/PMva))^0.5', ...
' fva', 'vva/vas*PMas/PMva*fas', ...
' vah', '(1-xa)*vas/(1-xa+xa*fas)+vva*xa/(xa+(1-xa)*fva)', ...
' kas', '0.024121-3.6525e-008*Tp^2+7.9811e-005*Tp', ...
' kva', '0.07028-0.000355*(273+Tp)+6.11e-007*(273+Tp)^2', ...
' kah', '(1-xa)*kas/(1-xa+xa*fas)+kva*xa/(xa+(1-xa)*fva)', ...
' Cpas', '1005.3-2.9275e-007*Tp^3+0.00047047*Tp^2+0.01782*Tp', ...
' Cpva', '10384.59-50.37*(273+Tp)+0.074*(273+Tp)^2', ...
' Cpah', '(Cpas+Xa*Cpva)/(1+Xa)', ...
' hc', '(kah*Nu/Ld)/1000', ...
' V', 'V0*(273.16+Ts)/(273.16+Tamb)', ...
' Re', 'Ld*V*dah/vah', ...
' Pr', 'Cpah*vah/kah', ...
' Sc', 'vah/(dah*DAB)', ...
' Sh', '2/sqrt(2.77*pi)*Re^0.5*Sc^(1/3)', ...
' Nu', '2/sqrt(2.77*pi)*Re^0.5*Pr^(1/3)', ...
' Pss', 'exp(18.3036-3816.44/(227.03+Ts))/760', ...
' Psp', 'exp(18.3036-3816.44/(227.03+Tp))/760', ...
' Psamb', 'exp(18.3036-3816.44/(227.03+Tamb))/760', ...
' Ps', 'exp(18.3036-3816.44/(227.03+u2))/760', ...
' KgXe', 'Kg0*exp((Lr*PMva-Hn)/(Rg*(Ts+273.16)))', ...
' CgXe', 'Cg0*exp((Hm-Hn)/(Rg*(Ts+273.16)))', ...
' Xe', 'Xm*CgXe*KgXe*awc/((1-KgXe*awc)*(1+(CgXe-1)*KgXe*awc))', ...
' awc', 'if(awamb*Psamb/Pss>1,1,awamb*Psamb/Pss)', ...
' km', 'PMva*Sh*DAB/(0.082*Ld)', ...
' awp', '(awc*Pss)/Psp', ...
' u2b', 'u2int/L^2', ...
' ulb', 'ulint/L^2', ...
' Ts', num2str(T), ...
' dHdt', '8*3*L^2*Hint', ...
' L', 'L0'};

fem=multiphysics(fem);
fem.xmesh=meshextend(fem);

% Resolver el problema
if Periodo==1,
    if Periodo~=Pfin, % --- Valido para secado intermitente
        fem.sol=femtime(fem, ...
            'solcomp',{'u2','u1'}, 'outcomp',{'u2','u1'}, ...
            'tlist',t, 'atol',{num2str(atol)}, 'rtol',rtol, ...
            'tout','tlist', 'consistent','on', ...
            'tout','tlist', 'initialstep',inistep, 'maxstep',maxstep
        else, % ----- Valido para secado continuo

```

```

        fem.sol=femtime(fem, ...
            'solcomp',{'u2','u1'}, 'outcomp',{'u2','u1'}, ...
            'tlist',t, 'atol',{num2str(atol)}, 'rtol',rtol, ...
            'tout','tlist', 'consistent','on', ...
            'tout','tlist', 'initialstep',inistep, 'maxstep',maxstep, ...
            'stopcond','ulm-Xf');
    end;
elseif Periodo==Pfin & crit==1, %Finalizacion por humedad final
    fem.sol=femtime(fem, ...
        'init',fem0, ...
        'solcomp',{'u2','u1'}, 'outcomp',{'u2','u1'}, ...
        'tlist',t, 'atol',{num2str(atol)}, 'rtol',rtol, ...
        'tout','tlist', 'consistent','on', ...
        'tout','tlist', 'initialstep',inistep, 'maxstep',maxstep, ...
        'stopcond','ulm-Xf');
elseif Periodo==Pfin & crit==2, %Finalizacion por tiempo transcurrido
    fem.sol=femtime(fem, ...
        'init',fem0, ...
        'solcomp',{'u2','u1'}, 'outcomp',{'u2','u1'}, ...
        'tlist',t, 'atol',{num2str(atol)}, 'rtol',rtol, ...
        'tout','tlist', 'consistent','on', ...
        'tout','tlist', 'initialstep',inistep, 'maxstep',maxstep);
end;

% Resultados
% Flujo de ganancia entálpica
dHdt=postint(fem,'dHdt','unit','', 'dl',[1], 'solnum','all')./L^3;
% Humedad media
Xm=postint(fem,'u1','unit','', 'dl',[1], 'solnum','all') ./L^3;
% Temperatura media
Tm=postint(fem,'u2','unit','', 'dl',[1], 'solnum','all') ./L^3;
% Temperatura media superficial
T1=postint(fem,'u2b', 'unit','', 'dl',[8], 'edim',0, 'solnum','all');
% Temperatura centro
T2=postint(fem,'u2', 'unit','', 'dl',[1], 'edim',0, 'solnum','all');
% Humedad media superficial
X1=postint(fem,'ulb', 'unit','', 'dl',[8], 'edim',0, 'solnum','all');
% Humedad centro
X2=postint(fem,'u1', 'unit','', 'dl',[1], 'edim',0, 'solnum','all');

res=[Xm' Tm' T1' T2' dHdt' X1' X2' t(1:length(Xm))];

% Save current fem structure for restart purposes
fem0=fem;
assignin('base', 'fem0', fem0);

```

Anexo 8.2. Módulo para la simulación de los periodos de Reposo

```

function res=REPOSO(VD, Periodo, X0, T0, T, TxR, t, tf, L, V, mss ,Tamb, ...
    awamb, atol, rtol, inistep, maxstep, crit)

fem0=evalin('base','fem0'); fem=fem0;

% Expresiones globales
fem.globalexpr = {'D','D1*exp(D2/(u2+273.16)*(u1/(u1+1))^D3)', ...
    'Kc','1e-3*(8.4e-2+0.546*(u1/(u1+1))+5.9e-4*u2)', ...
    'kw','0.571+0.00176*u2-0.0000067*u2^2', ...
    'ks','0.201+0.00139*u2-0.00000433*u2^2', ...
    'dss','mss/(1e3*(2*L)^3)', ...
    'Cpss','0.363+0.052*u2-3.94e-4*u2^2', ...
    'Cpw','1e-3*(4176.2-0.0909*u2+0.0054731*u2^2)', ...
    'Kg','Kg0*exp((Lr*PMva-Hn)/(Rg*(u2+273.16)))', ...
    'Cg','Cg0*exp((Hm-Hn)/(Rg*(u2+273.16)))', ...
    'a','Kg^2*(Cg-1)', ...
    'b','Kg*(2-Cg*(1-Xm/if(u1<=Xe,Xe,u1)))', ...
    'aw0','(-b+sqrt(b^2+4*a))/(2*a)', ...
    'aw','if(aw0<awc,awc,if(aw0>1,1,aw0))', ...
    'Lr','2502.535259-2.38576424*u2',...
    'Qs','Lr+8.31*((u2+273.16)^2)*(1/aw)*diff(aw,u2)/PMva', ...
    'dah','(1+Xa)*Pt/(1/28.9+Xa/18)*0.082*(Tp+273)', ...
    'Xa','Pv/(Pt-Pv)*PMva/PMas', ...
    'xa','Xa/(0.622+Xa)', ...
    'Pv','awp*Psp', ...
    'DAB','(0.0118e-7*(Tp+273.16)^1.75)/Pt', ...
    'Tp','0.5*(Ts+u2)', ...
    'Ld','sqrt(6*(2*L)^2)', ...
    'vva','-1.758e-006+3.7e-008*(273+Tp)', ...
    'vas','-0.00000000041531*Tp^2+0.000000050378 * Tp + 0.000017148', ...
    'fas','((1+abs(vas/vva))^0.5*(PMva/PMas)^0.25)^2)/(8*(1+PMas/PMva))^0.5', ...
    'fva','vva/vas*PMas/PMva*fas', ...
    'vah','(1-xa)*vas/(1-xa+xa*fas)+vva*xa/(xa+(1-xa)*fva)', ...
    'kas','0.024121-3.6525e-008*Tp^2+7.9811e-005*Tp', ...
    'kva','0.07028-0.000355*(273+Tp)+6.11e-007*(273+Tp)^2', ...
    'kah','(1-xa)*kas/(1-xa+xa*fas)+kva*xa/(xa+(1-xa)*fva)', ...
    'Cpas','1005.3-2.9275e-007*Tp^3+0.00047047*Tp^2+0.01782*Tp', ...
    'Cpva','10384.59-50.37*(273+Tp)+0.074*(273+Tp)^2', ...
    'Cpah','(Cpas+Xa*Cpva)/(1+Xa)', ...
    'hc','(kah*Nu/Ld)/1000', ...
    'V','V0*(273.16+Ts)/(273.16+Tamb)', ...
    'Pr','Cpah*vah/kah', ...
    'Sc','vah/(dah*DAB)', ...
    'Sh','3.388+0.63717*(Gr*Sc)^0.25/(1+(0.492/Sc)^0.5625)^(4/9)', ...
    'Nu','3.388+0.63717*(Gr*Pr)^0.25/(1+(0.492/Pr)^0.5625)^(4/9)', ...
    'Gr','9.8*(Ld^3)*abs(dahs-dahamb)/(dah*vah^2)', ...
    'Pss','exp(18.3036-3816.44/(227.03+Ts))/760', ...
    'Psp','exp(18.3036-3816.44/(227.03+Tp))/760', ...
    'Psamb','exp(18.3036-3816.44/(227.03+Tamb))/760', ...
    'Ps','exp(18.3036-3816.44/(227.03+u2))/760', ...
    'KgXe','Kg0*exp((Lr*PMva-Hn)/(Rg*(Ts+273.16)))', ...
    'CgXe','Cg0*exp((Hm-Hn)/(Rg*(Ts+273.16)))', ...
    'Xe','Xm*CgXe*KgXe*awc/((1-KgXe*awc)*(1+(CgXe-1)*KgXe*awc))', ...
    'awc','if(awamb*Psamb/Pss>1,1,awamb*Psamb/Pss)', ...
    'km','PMva*Sh*DAB/(0.082*Ld)', ...
    'awp','(awc*Pss)/Psp',...
    'u2b','u2int/L^2', ...
    'ulb','ulint/L^2', ...
    'Ts',num2str(T), ...
    'dHdt','8*3*L^2*Hint', ...
    'L','L0'};

```

```
fem=multiphysics(fem);
fem.xmesh=meshextend(fem);

% Resolver el problema
fem.sol=fetime(fem, ...
    'init',fem0, ...
    'solcomp',{'u2','u1'}, 'outcomp',{'u2','u1'}, ...
    'tlist',t, 'atol',{num2str(atol)}, 'rtol',rtol, ...
    'tout','tlist', 'consistent','on', ...
    'tout','tlist', 'initialstep',inistep, 'maxstep',maxstep);

% Resultados
% Flujo de ganancia entálpica
dHdt=postint(fem,'dHdt','unit','mol','dl',[1],'solnum','all') ./L^3;
% Humedad media
Xm=postint(fem,'u1','unit','','dl',[1],'solnum','all') ./L^3;
% Temperatura media
Tm=postint(fem,'u2','unit','','dl',[1],'solnum','all') ./L^3;
% Temperatura media superficial
T1=postint(fem,'u2b','unit','','dl',[8], 'edim',0, 'solnum','all');
% Temperatura centro
T2=postint(fem,'u2', 'unit','','dl',[1], 'edim',0, 'solnum','all');
% Humedad media superficial
X1=postint(fem,'ulb', 'unit','','dl',[8], 'edim',0, 'solnum','all');
% Humedad centro
X2=postint(fem,'u1', 'unit','','dl',[1], 'edim',0, 'solnum','all');

res=[Xm' Tm' T1' T2' dHdt' X1' X2' t(1:length(Xm))'];

% Guardando estructura fem actual
fem0=fem;
assignin('base', 'fem0', fem0);
```

Anexo 8.3. Simulación del proceso de secado continuo

```
function [FO ttc H Qcmax]= MQ_Cnt_Sim(coef, Xf, X0, T0, TsP, L, V, ...
    mss, Tamb, awamb, dt, atol, rtol, inistep, maxstep)

global time1

tP = linspace(0,tf,floor(tf/dt));

% Ejecucion de modelo SECADO
MRES = CALENT(coef, 1, X0, T0, TsP, tP, L, V, mss, Tamb, awamb, ...
    atol, rtol, inistep, maxstep, 1, Xf, 1);

dHdt=MRES(:,5);
tP=MRES(:,8)';
tf=MRES(end,8);
t=tP';
Q=cumtrapz(t,dHdt);
H=trapz(t,Q)/t(end);

% Cálculo de la función objetivo
FO = H*max(Q); ttc=t(end); Qcmax=max(Q);
```

Anexo 8.4. Simulación del proceso de secado intermitente

```

function [t MRES FO tti H Qimax]= MQ_Int_Sim(coef, texp, X, Xf, ...
      X0, T0, TxR, TsP, tf, L, V, mss, Tamb, awamb, dt, atol, rtol, ...
      inistep, maxstep, crit)

global timel
tP = cell(size(tf)); ts = 0;

%% Ejecución de módulos por periodo
for P=1:length(tf);
%% Vectores de tiempo por periodo
if P==1, %--> Periodo inicial
    tP{1} = linspace(0,tf(1),floor(tf(1)/dt));
else %--> Periodos restantes
    tP{P} = linspace(0,tf(P)-tf(P-1),floor((tf(P)-tf(P-1))/dt));
end;
PAR = (P/2)/double(int8(P/2)); % PAR=1 si es numero par

if PAR ~= 1, %--> MODULO DE CALENTAMIENTO (Periodo impar)
    fprintf('S')
    RES = CALENT(coef, P, X0, T0, TsP(P), tP{P}, tf, L, V, mss ,Tamb, ...
        awamb, atol, rtol, inistep, maxstep, crit, Xf, ...
        length(tf));
    dHdtP{P}=RES(:,5);
    if length(tP{P})~=length(RES(:,8)) & P~=length(tf),
        fprintf([';Solucion incompleta!n']); RES=100; AHi=0; Qimax=0;
    return;
    elseif P==length(tf);
        tP{P}=RES(:,8)';tf(P)=tf(P-1)+RES(end,8);
    end,
    ts=ts+max(tP{P}); % Tiempo total de secado

else %--> MODULO DE REPOSO (Periodo par)
    fprintf('R')
    RES = REPOSO(coef, P, X0, T0, TsP(P),TxR, tP{P}, tf, L, V, mss ,Tamb, ...
        awamb, atol, rtol, inistep, maxstep, crit);
    dHdtP{P}=RES(:,5);
    if length(tP{P})~=length(RES(:,8)) & P~=length(tf),
        fprintf([';Solucion incompleta!n']); RES=100; AHi=0; Qimax=0;
    return;
    end,
end;
if P==1,
    t=tP{1}'; dHdt=dHdtP{P}; MRES=RES;
else,
    t=[t(1:end-1)' (tP{P}+tf(P-1))'];
    dHdt=[dHdt(1:end-1)' dHdtP{P}']';
    MRES=[MRES(1:end-1,:) ' RES']';
end;
Q=cumtrapz(t,dHdt); H=trapz(t,Q)/t(end);
end;

% Cálculo de la función objetivo
FO = H*max(Q); tti=t(end); Qimax=max(Q);
assignin('base','MRES',MRES);

```

Anexo 8.5. Cálculo de la función objetivo para la identificación de los parámetros y la validación del modelo

```
function fD = MQ_Int_FD(coef, Archivos, ubica, dt, atol, rtol, inistep, ...
    maxstep, crit)

    global time1 ensayo
    Errori=zeros(length(Archivos),1);

% Bucle de solución respecto a la información experimental de cada fichero
for ax=1:length(Archivos);
    Rst=zeros(1,length(coef));

    %Cargar la información experimental del fichero
    Archivo=Archivos{ax};
    eval(['load ' fullfile(ubica,Archivo) '']);
    fprintf([' ' Archivo '']);

    %Simulación del proceso a las condiciones experimentales cargadas del fichero
    [tc MRES FO tti H Qimax]= MQ_Int_Sim(coef, t, X, Xf, X0, T0, ...
        TxR, TsP, tFP, L, V, mss, Tamb, awamb, dt, atol, rtol, inistep, ...
        maxstep, crit);

    Xc = interp1(tc,MRES(:,1),t,'pchip');
    T2c = interp1(tc,MRES(:,3),t,'pchip');
    T3c = interp1(tc,MRES(:,4),t,'pchip');

    %Cálculo de los criterios de ajuste
    fX = sum((abs(Xc-X)).)/sum(X); % Humedad promedio
    fT = sum((abs(T3c-T3)).)/sum(T3); % Temperatura en el centro
    Errori(ax)= fX+fT; % Suma de criterios para la experiencia ax

%VAR
    N = length(t);
    s2yX = sum((X-mean(X)).^2)/(N-1);
    s2yxX= sum((X-Xc).^2)/(N-length(coef));
    VARX = (1-s2yxX/s2yX);
    s2yT = sum((T3-mean(T3)).^2)/(N-1);
    s2yxT= sum((T3-T3c).^2)/(N-length(coef));
    VART = (1-s2yxT/s2yT);

%RMSE
    RMSEX=sqrt(sum((X-Xc).^2)/N);
    RMSET=sqrt(sum((T3-T3c).^2)/N);

    transc = datestr(now-time1,'HH:MM:SS'); % tiempo transcurrido desde ejecución

%Gráficas
    hold on; subplot(2,2,1); plot(t,X,'-k');
    hold on; subplot(2,2,2); plot(t,T2,'-.k',t,T3,'--k',[t(1) t(end)]', ...
        [TsP(1) TsP(1)]',':k',[t(1) t(end)]',[TsP(2) TsP(2)]',':k');
    drawnow
end;

fD=sum(Errori); % Suma de criterios para todas las experiencias
```

Anexo 8.6. Cálculo de la función objetivo para la optimización del proceso de secado intermitente

```
function RES= MQ_Int_FO(VD, Nc, Ts, criterio, dt, atol, rtol, inistep, ...
    maxstep, res, Rsg, Fig, Fgs, gen)

global time1 ttc RESc Hc Qcmax

% Especificaciones Modelo
coef = [0.002933 -4684 -0.01885]; % Parámetros difusividad
Tamb = 25; % Temperatura Ambiente/Reposo
Xf = 0.3; % Humedad final deseada
X0 = 9; % Humedad inicial
T0 = 12; % Temperatura inicial
tf = 3600*cumsum([abs(VD) 48]); % Vector tf/Periodo
L = 0.0125; % Mitad del lado del cubo
V = 3; % Velocidad de secado
mss = 1.59; % Masa solido seco
awamb = 0.6; % aw ambiente

for n=1:Nc,
    if n==1, TsP = [Ts Tamb]; else TsP = [TsP Ts Tamb]; end;
end;
TsP = [TsP Ts]; % Vector T/Periodo

% Solución secado continuo
fprintf(['nSecado Continuo: ' num2str(Ts) 'oCn']);
[RESc ttc H Qcmax] = MQ_Cnt_Sim(coef, Xf, X0, T0, Ts, L, V, mss, ...
    Tamb, awamb, dt, atol, rtol, maxorder, inistep, maxstep, Fig);
fprintf([' Hc = ' num2str(Hc) ' kJ, Qcmax = ' num2str(Qcmax) ' kJ/sn']);
fprintf([' Hc*max(Qc) = ' num2str(RESc) 'n']);

% Solución secado intermitente
fprintf(['nSecado Intermitente: ' num2str(Ts) 'oCn']);
assignin('base','ttc',ttc);
assignin('base','Hc',Hc);
fprintf(['Int' num2str(Nc) '-' num2str(Ts) '(' res ') tP(h): [' ...
    num2str(VD) ' ] tt<=' num2str(1.3*ttc,5) 'sn']);

[RES tti Hi Qimax tsi]= MQ_Int_Sim(coef, Xf, X0, T0, TsP, tf, L, V, ...
    mss, Tamb, awamb, dt, atol, rtol, inistep, maxstep, ttc, RES0, ...
    criterio, Fig);

fprintf([' H = ' num2str(Hi) ' kJ, Qmax = ' num2str(Qimax) ' kJ/sn']);
assignin('base','tti',tti);
assignin('base','tsi',tsi);
assignin('base','Hi',Hi);
fprintf([' FO: ' num2str(RES,4) ' , H*max(Q) = ' ...
    num2str(Hi*Qimax,4) ' , (Hi-Hc)/Hc=' num2str((100*(Hi-Hc)/Hc),3) ...
    '%%, (ti-tc)/tc=' num2str((100*(tsi-ttc)/ttc),3) '%%, tt-(1.3)tc=' ...
    num2str(round(tti-1.3*ttc)) 'sn']);
if tti>=1.3*ttc,
    Penalizado=1;
    fprintf([' FO: ' num2str(RES,4) '*10^2 - Penalizado n']);
    RES=round(tti-1.3*ttc).*abs(RES);
else
    Penalizado=0;
end;
end;
```

Anexo 8.7. Identificación de los parámetros y validación del modelo

```
function MQ_Int_Val

global time1 RES0 inicio ensayo
time1 = now; ensayo = 'AJUSTE';
res='opt'; %Ejecutar para validar ('sol') o para identificar parámetros ('opt')

%Valores iniciales de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva
coef=[0.005967 -4970 -0.008376];

%Ubicación ficheros de información experimental
ubica='C:Datos';
files=dir([ubica '*.mat']);
nfil=max(size(files));
txtfil='';
for n=1:nfil
    if n==nfil
        txtfil=[txtfil '[' char(39) files(n).name char(39) ' ']];
    else
        txtfil=[txtfil '[' char(39) files(n).name char(39) ' ']];
    end
end
eval(['Archivos={' txtfil '}']);

%Configuración de la malla
nElem=4; % Número de elementos de tamaño regular
nElog=4; % Número de elementos cuyo tamaño decrece exponencialmente
fclear fem
g2=rect2('0.0125','0.0125','base','corner','pos',{0,0},'rot',0);
clear s; s.objs={g2}; s.name={'R1'}; s.tags={'g2'};
fem.draw=struct('s',s); fem.geom=geomcsg(fem);
LE=(nElem-1)/nElem;
vlog = (LE-1)/9*logspace(1,0,nElog+1)-10*(LE-1)/9+LE;
vlog = [0:1/nElem:(nElem-2)/nElem] vlog;
fem.mesh=meshmap(fem,'edgegroups',{[2],[4],[3],[1]},'edgelem', ...
    {1,vlog,2,vlog,3,vlog,4,vlog},'hauto',5);
fem=meshextrude(fem,'elextlayers',{vlog},'distance',[0.0125],'scale', ...
    [1;1],'displ',[0;0],'twist',[0],'face','none','wrkpln', ...
    [0 1 0;0 0 1;0 0 0]);
assignin('base','fem',fem);

% Especificaciones Solución
dt = 120; % Intervalo de tiempo
atol = 1e-3; % Tolerancia Absoluta
rtol = 1e-3; % Tolerancia relativa
inistep = 1e-2; % Incremento inicial de tiempo
maxstep = 120; % Incremento de tiempo máximo
crit = 2; % Criterio de finalización (1:Humedad final; 2:tiempo)

% Validación
if res=='sol',
    RES = MQ_Int_FD(coef, Archivos, ubica, dt, atol, rtol, inistep, ...
maxstep, crit);

%Identificación de parámetros
elseif res=='opt',
    [coef, RES] = fmincon(@(coef)MQ_Int_F0(coef, Archivos, ubica, dt, ...
atol, rtol, inistep, maxstep, crit),coef,[],[],[],[],[],[], ...
optimset('LargeScale','off','Display','off','MaxIter',100));
end;
transc = datestr(now-time1,'HH:MM:SS');
fprintf(['TIEMPO TOTAL: ' transc ' (hh:mm:ss)n']);
```

Anexo 8.8. Optimización del proceso de secado intermitente

```
function [VD, RES]=MQ_Int_OPT(Nc,Ts,VD,res,L_Log,gen,Rsg,Fig,Fgs,FOx)

global time1
time1 = now;

%Configuración de la malla
nElem=4;      % Número de elementos de tamaño regular
nElog=4;      % Número de elementos cuyo tamaño decrece exponencialmente
flclear fem
g2=rect2('0.0125','0.0125','base','corner','pos',{'0','0'},'rot','0');
clear s; s.objs={g2}; s.name={'R1'}; s.tags={'g2'};
fem.draw=struct('s',s); fem.geom=geomcsg(fem);
LE=(nElem-1)/nElem;
vlog = (LE-1)/9*logspace(1,0,nElog+1)-10*(LE-1)/9+LE;
vlog = [[0:1/nElem:(nElem-2)/nElem] vlog];
fem.mesh=meshmap(fem,'edgegroups',{[2],[4],[3],[1]}),'edgelem', ...
    {1,vlog,2,vlog,3,vlog,4,vlog},'hauto',5);
fem=meshextrude(fem,'elextlayers',{vlog},'distance',[0.0125],'scale', ...
    [1;1],'displ',[0;0],'twist',[0],'face','none','wrkpln', ...
    [0 1 0;0 0 1;0 0 0]);
assignin('base','fem',fem);

% Especificaciones Solución
dt = 60;      % Intervalo de tiempo
atol = 1e-3;  % Tolerancia Absoluta
rtol = 1e-3;  % Tolerancia relativa
inistep = 1e-2; % Incremento inicial de tiempo
maxstep = 120; % Incremento de tiempo maximo

% Solución
[VD, RES]=fmincon(@(VD)MQ_Int_FO(VD,Nc,Ts,l,dt,atol,rtol, ...
    inistep,maxstep,res,Rsg,Fig,Fgs,gen),VD,[],[],[],[],[],[], ...
    optimset('TolFun',1e-3,'TolX',1e-3,'Display','off', ...
    'MaxIter',150,'LargeScale','off'));

transc = datestr(now-time1,'HH:MM:SS');
fprintf(['TIEMPO TOTAL: ' transc ' (hh:mm:ss)n']);
```

Anexo 9. Información experimental para la validación de los parámetros del modelo de la difusividad efectiva

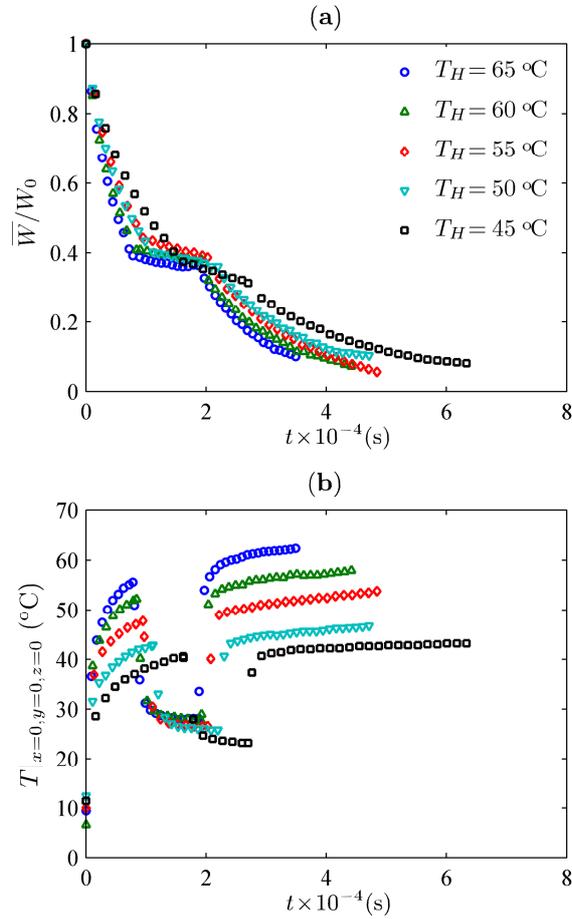


Figura A9.1. Experiencias de secado intermitente empleadas en la validación del modelo (Tabla 4.2, grupo 3). Evolución del contenido de humedad adimensional promedio (a) y de la temperatura en el centro del cubo (b) a temperaturas de calentamiento (T_H) de 45 a 65 °C y una velocidad de aire (v_∞) de 4 m s⁻¹.

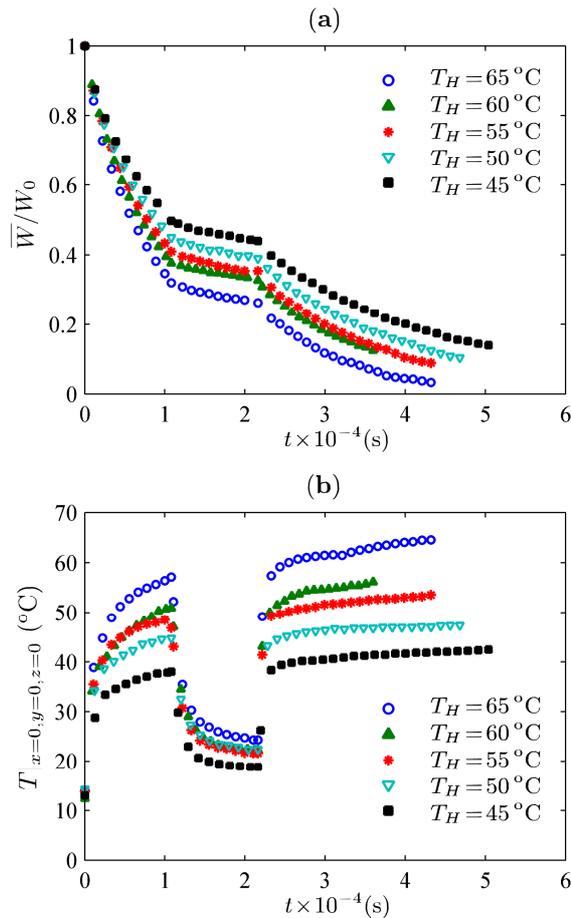


Figura A9.2. Experiencias de secado intermitente empleadas en la validación del modelo (Tabla 4.2, grupo 4). Evolución del contenido de humedad adimensional promedio (a) y de la temperatura en el centro del cubo (b) a temperaturas de calentamiento (T_H) de 45 a 65 $^\circ\text{C}$ y una velocidad de aire (v_∞) de 4 m s^{-1} .

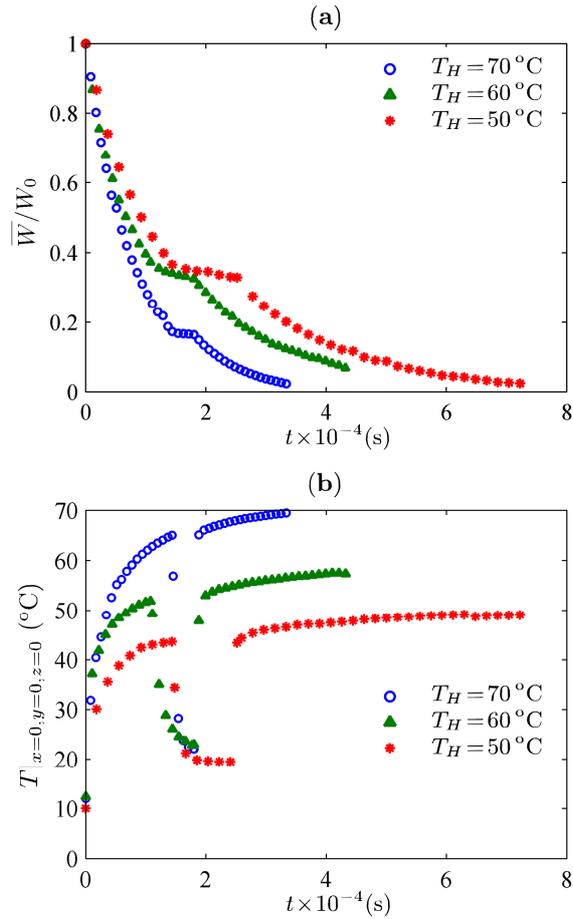


Figura A9.3. Experiencias de secado intermitente empleadas en la validación del modelo (Tabla 4.2, grupo 5). Evolución del contenido de humedad adimensional promedio (a) y de la temperatura en el centro del cubo (b) a temperaturas de calentamiento (T_H) de 50, 60 y 70 $^\circ\text{C}$ y una velocidad de aire (v_∞) de 3 m s^{-1} .

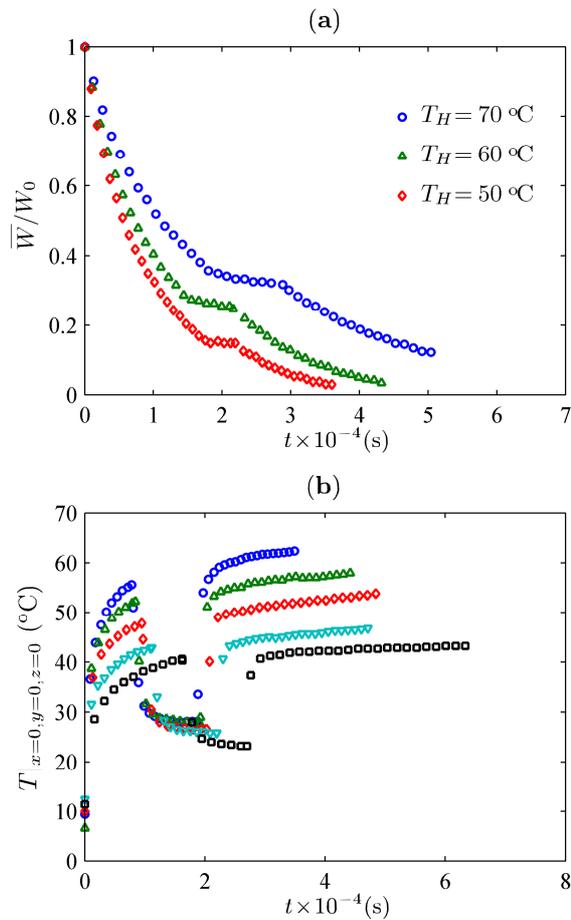


Figura A9.4. Experiencias de secado intermitente empleadas en la validación del modelo (Tabla 4.2, grupo 6). Evolución del contenido de humedad adimensional promedio (a) y de la temperatura en el centro del cubo (b) a temperaturas de calentamiento (T_H) de 50, 60 y 70 °C y velocidad (v_∞) de 2 m s⁻¹.

Anexo 10. Resultados de la validación del modelo de la difusividad efectiva en experiencias de secado intermitente

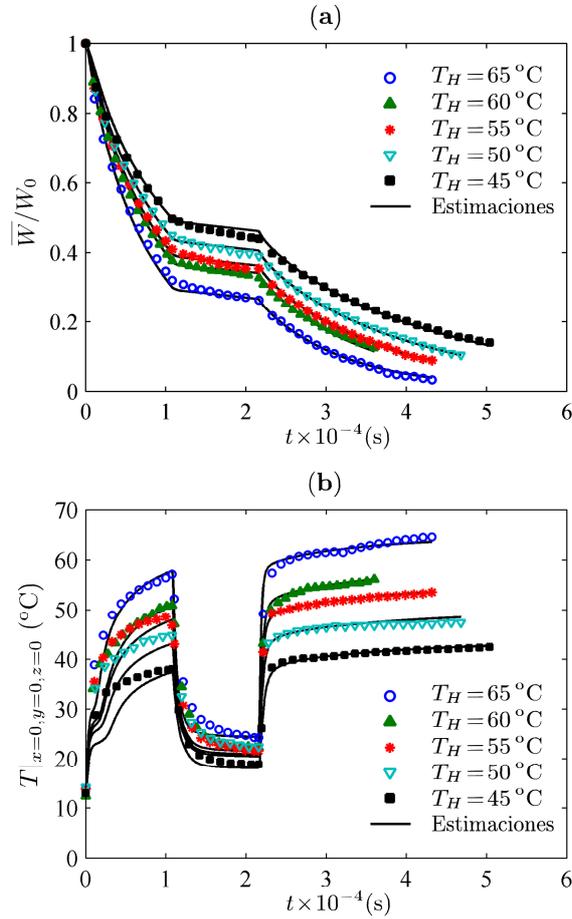


Figura A10.1. Resultados de la validación del modelo de la difusividad efectiva en experiencias de secado intermitente (Tabla 4.2, grupo 4) a temperaturas de calentamiento (T_H) de 50, 60 y 70 °C, y una velocidad de aire (v_∞) de 4 m s⁻¹. Valores experimentales y estimados del contenido de humedad adimensional promedio (a) y de la temperatura en el centro del cubo (b).

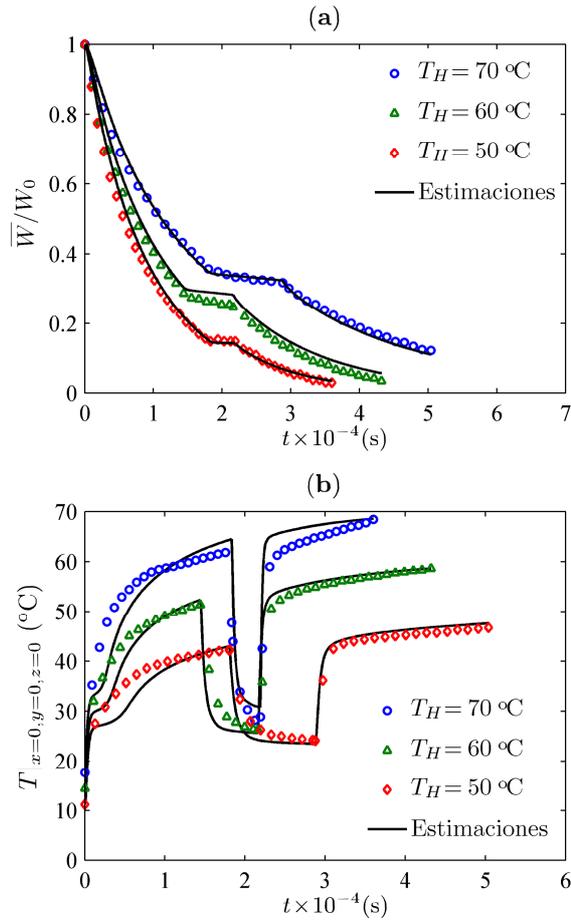


Figura A10.2. Resultados de la validación del modelo de la difusividad efectiva en experiencias de secado intermitente (Tabla 4.2, grupo 6) a temperaturas de calentamiento (T_H) de 50, 60 y 70 °C, y velocidad de aire (v_∞) de 2 m s⁻¹. Valores experimentales y estimados del contenido de humedad adimensional promedio (a) y de la temperatura en el centro del cubo (b).

Anexo 11. Evolución de la ganancia entálpica en procesos de secado continuo e intermitente

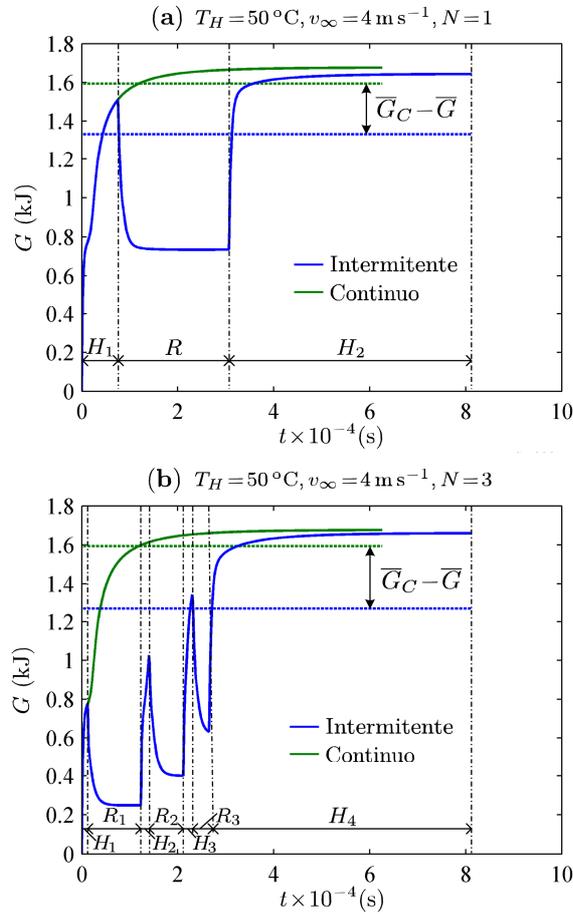


Figura A11.1. Evolución de la ganancia entálpica en procesos de secado continuo e intermitente a diferentes ciclos de intermitencia: (a) $T_H = 50\text{ }^\circ\text{C}$, $v_\infty = 4\text{ m s}^{-1}$, $N = 1$; (b) $T_H = 50\text{ }^\circ\text{C}$, $v_\infty = 4\text{ m s}^{-1}$, $N = 3$. $\bar{G}_C - \bar{G}$ es la diferencia en la ganancia entálpica media entre el secado continuo e intermitente. H y R representan los periodos de calentamiento y reposo, respectivamente.

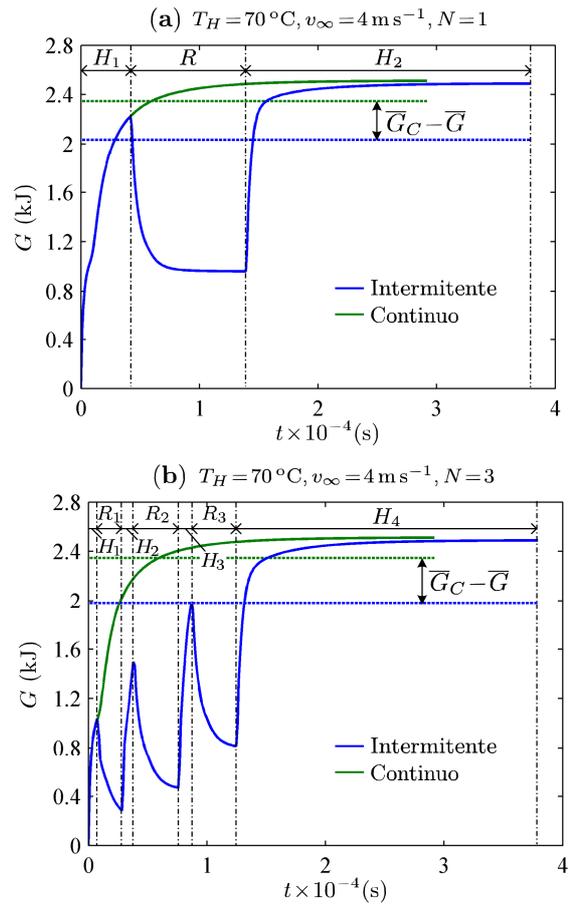


Figura A11.2. Evolución de la ganancia entálpica en procesos de secado continuo e intermitente a diferentes ciclos de intermitencia: (a) $T_H = 70\text{ }^\circ\text{C}, v_\infty = 4\text{ m s}^{-1}, N = 1$; (b) $T_H = 70\text{ }^\circ\text{C}, v_\infty = 4\text{ m s}^{-1}, N = 3$. $\overline{G}_C - \overline{G}$ es la diferencia en la ganancia entálpica media entre el secado continuo e intermitente. H y R representan los periodos de calentamiento y reposo, respectivamente.

Anexo 12. Evolución del contenido de humedad y la temperatura local en procesos de secado intermitente

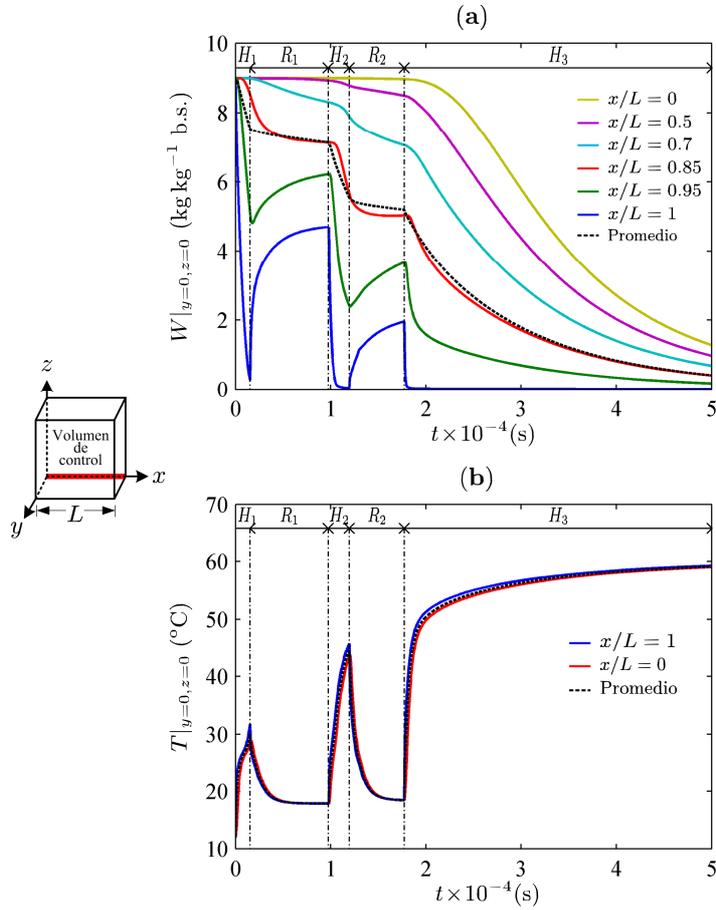


Figura A12.1. Evolución del contenido de humedad (a) y la temperatura (b) a través del eje central del cubo sobre la coordenada x . Resultados para un proceso de secado intermitente optimizado a una temperatura de calentamiento de 60°C , velocidad de aire de 4 m s^{-1} , y dos ciclos de intermitencia ($N = 2$). x/L es la posición adimensional con respecto a la coordenada x .

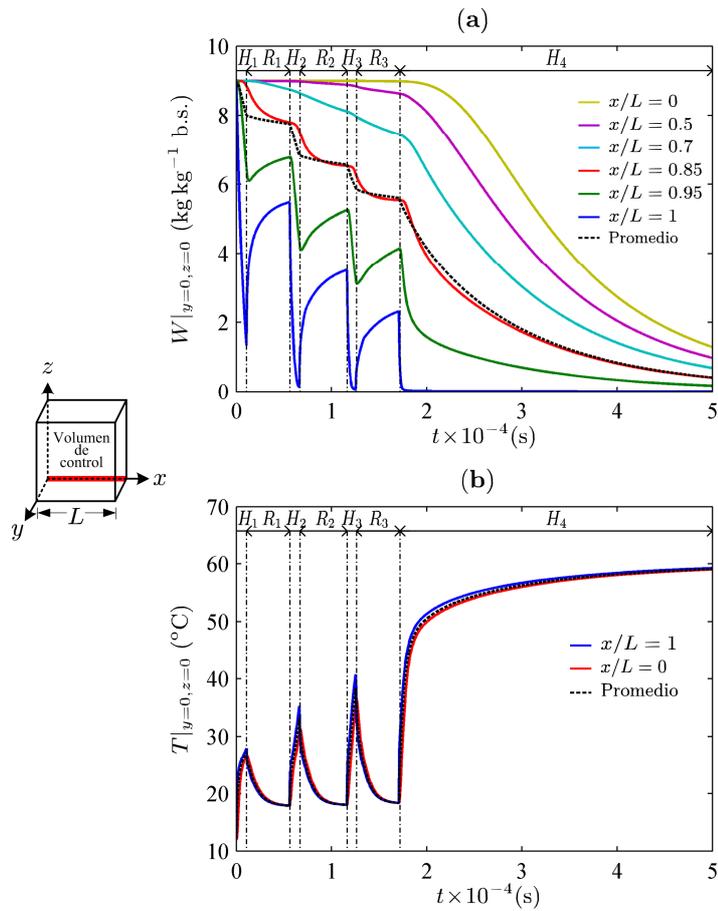


Figura A12.2. Evolución del contenido de humedad (a) y la temperatura (b) a través del eje central del cubo sobre la coordenada x . Resultados para un proceso de secado intermitente optimizado a una temperatura de calentamiento de 60°C , velocidad de aire de 4 m s^{-1} , y tres ciclos de intermitencia ($N=3$). x/L es la posición adimensional con respecto a la coordenada x .

Anexo 13. Evolución de la velocidad de secado en procesos de secado continuo e intermitente

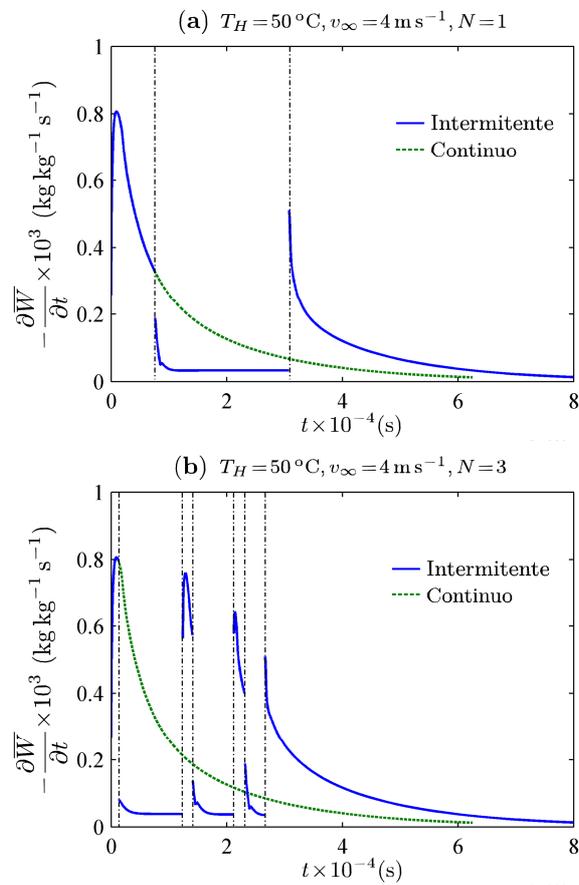


Figura A13.1. Evolución de la velocidad de secado en procesos de secado continuo e intermitente a diferentes ciclos de intermitencia. (a) $T_H = 50\text{ }^\circ\text{C}$, $v_\infty = 4\text{ m s}^{-1}$, $N = 1$; (b) $T_H = 50\text{ }^\circ\text{C}$, $v_\infty = 4\text{ m s}^{-1}$, $N = 3$.

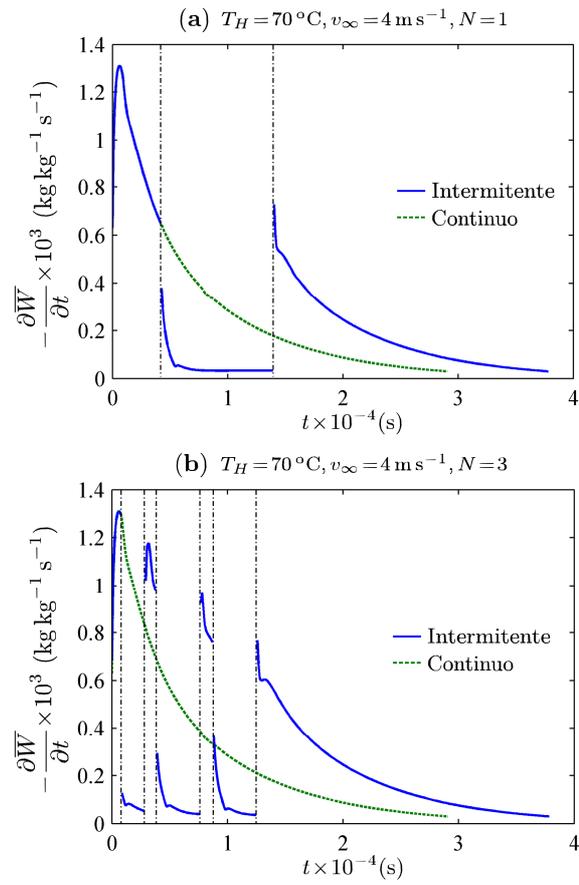


Figura A13.2. Evolución de la velocidad de secado en procesos de secado continuo e intermitente a diferentes ciclos de intermitencia: (a) $T_H = 70\text{ }^\circ\text{C}$, $v_\infty = 4\text{ m s}^{-1}$, $N = 1$; (b) $T_H = 70\text{ }^\circ\text{C}$, $v_\infty = 4\text{ m s}^{-1}$, $N = 3$.

Anexo 14. Contribución científica asociada al desarrollo de la tesis

Artículos en revistas indexadas en el Journal Citation Reports

- Váquiro, H.A., Mulet, A., García-Pérez, J.V., Clemente, G., Bon, J. (2008). Optimization of intermittent hot air drying of mango (*Mangifera indica* L.). *Defect and Diffusion Forum* 273-276: 250-255.
- Váquiro, H.A.; Clemente, G.; García-Pérez, J.V.; Mulet, A.; Bon, J. (2009) Enthalpy-driven optimization of intermittent drying for *Mangifera indica* L. *Chemical Engineering Research and Design* 87: 885-898.

Participación en eventos científicos

- Váquiro, H.A., Clemente, G., Mulet, A., Bon, J. Aplicación de la lógica borrosa al modelado de cinéticas de secado en mango (*Mangifera indica* L.)
Tipo de contribución: Póster
Publicación: Libro de resúmenes IV Congreso de Ingeniería y Tecnología de Alimentos CESIA 2006. Dpto. de bromatología y tecnología de los alimentos, Universidad de Córdoba. Córdoba, España, 2006, p. 114-115. (ISBN: 84-611-3263-7).
- Váquiro, H.A., Mulet, A., García-Pérez, J.V., Clemente, G., Bon, J. Optimization of intermittent hot air drying of mango (*Mangifera indica* L.). 3rd International Conference on Diffusion in Solids and Liquids DSL-2007. Algarve, Portugal. Julio 4-6 de 2007.
Tipo de contribución: Póster.
- Váquiro, H.A., Clemente, G., Mulet, A., Bon, J. Enthalpy-driven optimization of intermittent drying for *Mangifera indica* L. European Drying Conference AFSIA 2007. AFSIA & EFCE WP Drying. Biarritz, Francia. Mayo 24-25 de 2007.
Tipo de contribución: Presentación oral.
- Váquiro, H.A., Bon, J., Diez, J.L. (2008) Fuzzy logic application to drying kinetics modelling. Triennial Event of International Federation of Automatic Control IFAC 2008. Seúl, Corea. Julio 6-11 de 2008.
Tipo de contribución: Póster.
Publicación: Proceedings of the 17th IFAC World Congress, Vol. 17, Part 1. International Federation of Automatic Control. (ISBN 978-3-902661-00-5).
- Váquiro, H.A., Simal, S., Clemente, G., Mulet, A., Bon, J. (2008) Water sorption isotherms for mango at different temperatures and isosteric heats. 16th International Drying Symposium IDS 2008. Ramoji Film City, Hyderabad, India. Noviembre 9-12 de 2008.
Tipo de contribución: Póster.
Publicación: Drying 2008, vol. A. Thorat, B.N., Mujumdar, A.S. (eds). Mumbai University Institute of Chemical Technology. (ISBN 978-81-907371-8-0).
- Váquiro, H.A., De Bonis, M.V., Ruocco, G., Rosselló, C., Bon, J. (2008) Modelling Intermittent Drying Processes. 16th International Drying Symposium IDS 2008. Ramoji Film City, Hyderabad, India. Noviembre 9-12 de 2008.
Tipo de contribución: Póster.
Publicación: Drying 2008, vol. A. Thorat, B.N., Mujumdar, A.S. (eds). Mumbai University Institute of Chemical Technology. (ISBN 978-81-907371-8-0)