

---

Departamento de Ingeniería Química

Facultad de Ingeniería

Universidad Nacional de La Plata

# Modelado y simulación de la deshidratación combinada osmótica-microondas de frutihortícolas



Tesis doctoral presentada por  
**Javier Ramiro Arballo**

ante el Departamento de Ingeniería  
Química, Facultad de Ingeniería de la  
Universidad Nacional de La Plata  
para acceder al grado académico de  
**DOCTOR EN INGENIERIA**

Dirección de tesis:

**Dr. Rodolfo Horacio Mascheroni** (Director)

**Dra. Laura Analía Campañone** (Co-directora)

La Plata, marzo 2013



**A mis amados Susi y Nabilito**

**Y a mis amados viejos**

¡OH SOMBRA FUGAZ!

Cruza más allá de las bajas etapas de la duda  
y elévate a las exaltadas alturas de la certeza.  
Abre el ojo de la verdad para que veas la Belleza  
y exclames: ¡Santificado sea el Señor,  
el más excelso de todos los creadores!

Bahá'u'lláh

## Agradecimientos

Agradezco a Dios y a mi amado Bahá'u'lláh por abrir continuamente las puertas y permitirme alcanzar mayores alturas de servicio a la humanidad.

Además agradezco a mis amados Susi y Nabilito por llenar mis días con felicidad y amor, un gran equipo con el cual caminar por los senderos de la vida es realmente un gran privilegio.

A mis adorados viejitos, que con tanto amor supieron edificar las bases para lograr una vida plena.

A mis queridos directores/compañeros Rody y Lau por haberme apoyado constantemente y permitir que la investigación sea un fluir de ideas y sueños.

A mis amados hermanos Bruno, Gastón y Paola por acompañarme en cada capítulo de mi vida con confianza, amor y curiosidad.

A mi amada familia extendida: Bahi, July, Kamalito, Amelita, Pau, Julianita, Zoe, Maca, Gigi, Willy, Riaz, Cheryl, Kazemcito, Natalita, Layli, Aaliya, Grampi, Crystal y Manoutcher, por hacer que la unidad de la humanidad ya no sea un sueño lejano.

A mi amada comunidad bahá'í de La Plata-Berisso-Ensenada por ser mi gran familia, que hizo de mis días en La Plata hermosos momentos de deleite del alma.

A mis queridos compañeros de CIDCA por compartir conmigo esta hermosa aventura de la investigación.

Por último quiero agradecer a Eva por su paciencia, disposición y apoyo y a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron para hacer que este escalón de la vida sea realizable.



## Resumen

El método de deshidratación osmótica (DO) es ampliamente utilizado para la remoción parcial del agua de frutas y hortalizas por inmersión en solución hipertónica (osmótica) de azúcares, polialcoholes y/o sales. A pesar de la reducción del contenido de humedad del alimento favorecida por el proceso, la actividad de agua alcanzada es todavía muy alta, siendo necesarios procesos adicionales. Por otro lado, el empleo de microondas durante la deshidratación de alimentos es un método eficiente, debido a su capacidad de generar energía dentro del producto por interacción de la radiación con las moléculas de agua. Las microondas se aplican en diversos procesos presentando como ventajas: reducción en el impacto ambiental, ahorro de energía con respecto a los métodos tradicionales, uso de energía limpia, ahorro de espacio y disminución de los tiempos de proceso.

En la presente Tesis la transferencia de energía y masa durante el proceso combinado de deshidratación osmótica-microondas de frutas y hortalizas fue estudiada teórica y experimentalmente mediante el modelado y la simulación numérica.

Con el fin de describir los fenómenos de transporte puestos en juego durante el proceso de deshidratación combinado, se plantearon los balances microscópicos de masa y energía.

Para la primera etapa de deshidratación (DO), dos modelos con diferentes niveles de complejidad fueron propuestos, un modelo osmótico-difusivo celular (MODC) altamente detallado que considera la transferencia de masa a través de las membranas celulares y la difusión multicomponente a través de los espacios intercelulares; y un modelo difusivo en flujo contracorriente (MDFC) que tiene en cuenta los flujos cruzados de eliminación de agua e incorporación de sólidos solubles considerando propiedades de transporte variables con la composición del alimento.

En el caso del proceso de deshidratación con microondas, se plantearon los balances de energía y masa, utilizando propiedades globales en función de la temperatura, de la humedad y del contenido de sólidos; la generación interna de calor debido a la interacción del alimento con la energía electromagnética fue considerada utilizando la ley de Lambert, la cual considera un decaimiento exponencial de la energía dentro del alimento. Dicha ley aproximada, cuando es formulada correctamente, permite describir la interacción radiación-producto. Además dos

periodos sucesivos fueron considerados en el modelado: calentamiento inicial del alimento seguido de vaporización intensa.

Los balances obtenidos constituyen ecuaciones diferenciales no lineales altamente acopladas que fueron resueltas aplicando métodos numéricos. Para el modelo osmótico-difusional celular (MODC) los balances de masa constituyen ecuaciones diferenciales ordinarias acopladas que fueron resueltas empleando el método de Runge-Kutta de 4to Orden; y para el caso de los modelos difusional en flujo contracorriente (MDFC) y de deshidratación con microondas (MDMO), por tratarse de ecuaciones diferenciales parciales, se utilizaron diferentes esquemas del método de las diferencias finitas. Los métodos numéricos fueron programados en MATLAB® 7.2. La solución numérica obtenida para la deshidratación osmótica fue incorporada como valores iniciales para las simulaciones del proceso de deshidratación con microondas.

La validación de los modelos se llevó a cabo con datos experimentales propios y obtenidos de literatura. En el caso del proceso de deshidratación osmótica las predicciones de los modelos (MODC y MDFC) fueron contrastados contra datos de pera, kiwi y calabacita deshidratados en soluciones de sacarosa de variadas concentraciones, tiempos de proceso, temperaturas, tamaños y formas. Los perfiles de humedad y temperatura obtenidos por el modelo MDMO fueron comparados contra datos de pera, papa, zanahoria y manzana procesados con diferentes niveles de potencia, tiempo de procesamiento, presiones de trabajo y modos de operación del horno de microondas. Por último la validación del modelo completo (DO-DMO) se llevó a cabo en pera y banana, con diferentes pretratamientos osmóticos (en uno de los casos sometidos a concentraciones de solución osmótica variable y en el otro caso con tiempos de procesamiento diferentes) y diferentes condiciones de operación durante la segunda etapa de deshidratación con microondas (diferentes tiempos de procesamiento, modos de operación y niveles de potencia).

El modelo desarrollado completo (DO-DMO) fue evaluado exitosamente, permitiendo la predicción de perfiles de temperatura y humedad durante los procesos combinados de deshidratación osmótica-microondas de frutas y hortalizas en un amplio rango de condiciones de operación.



# Indice

<b>Resumen</b> .....	<b>vi</b>
<b>Capítulo 1 Introducción y Objetivos</b> .....	<b>13</b>
<b>Capítulo 2 Modelado Matemático</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1 Teoría</b> .....	<b>20</b>
2.1.1. Deshidratación Osmótica .....	21
2.1.1.1. Mecanismo de Transferencia de Masa .....	22
2.1.1.1.1. Transferencia de Masa durante la deshidratación osmótica .....	22
2.1.1.1.2. Balances de Masa .....	24
2.1.1.2. Coeficiente Efectivo de Difusión.....	26
2.1.2. Deshidratación con Microondas.....	28
2.1.2.1. Mecanismos de Transferencia de Energía y Masa .....	28
2.1.2.1.1. Calentamiento con Microondas .....	28
2.1.2.1.2. Hornos de microondas .....	30
2.1.2.2. Propiedades Dieléctricas.....	31
2.1.2.2.1. Funcionalidad de las propiedades dieléctricas con la temperatura y la humedad.....	34
<b>2.2. Modelado del Proceso</b> .....	<b>38</b>
2.2.1. Modelado de la Deshidratación Osmótica (DO) .....	38
2.2.1.1. Modelado Empírico .....	38
2.2.1.1.1. Modelo de Azuara .....	38
2.2.1.2. Modelado Osmótico-Difusional Celular (MODC) .....	39
2.2.1.3. Modelado Difusional de Flujo Contracorriente (MDFC) .....	40
2.2.2. Modelado de la Deshidratación con Microondas con propiedades globales.....	43
2.2.2.1. Modelado de la Etapa de Calentamiento con Vaporización Leve.....	43
2.2.2.2. Modelado de la Etapa de Temperatura Constante con Vaporización Intensa .....	46
2.2.3. Modelado de la Deshidratación Combinada (DO-DMO).....	48
2.2.3.1. Primera etapa: modelado de la deshidratación osmótica con coeficiente de difusión variable con la temperatura y el contenido de agua y sólidos solubles del alimento.....	49
2.2.3.2. Segunda etapa: modelado de la deshidratación con microondas considerando propiedades globales variables con la temperatura, humedad y contenido de sólidos solubles del alimento. ....	49
<b>2.3. Resolución numérica</b> .....	<b>50</b>
2.3.1. Resolución del Modelo Osmótico-Difusional Celular (MODC) para la Deshidratación Osmótica .....	50
2.3.2. Resolución del Modelo Difusional en Flujo Contracorriente (MDFC) para la Deshidratación Osmótica ..	52
2.3.3. Resolución del Modelo Deshidratación por Microondas .....	54
<b>Capítulo 3 Técnicas Experimentales</b> .....	<b>58</b>

<b>3.1. Experimentos de Deshidratación Osmótica.....</b>	<b>58</b>
3.1.1 Deshidratación osmótica. ....	58
3.1.1.1. Deshidratación osmótica aplicada a medias rodajas de pera y kiwi, y rodajas de calabacita.....	58
3.1.1.2. Deshidratación osmótica aplicada a rodajas de pera.....	58
3.1.2. Determinación de humedad, pérdida de peso y contenido de sólidos solubles. ....	59
3.1.3. Determinación del tiempo óptimo para la primera etapa de deshidratación combinada. ....	61
3.1.3.1. Regresión polinomial.....	61
3.1.3.2. Metodología de la Función de Conveniencia.....	62
3.1.3.3. Algoritmo de optimización.....	63
<b>3.2. Experimentos de Deshidratación con Microondas .....</b>	<b>65</b>
3.2.1. Deshidratación con microondas. ....	65
3.2.2. Calibración de la potencia del horno de microondas.....	65
3.2.3. Determinación de humedad y pérdida de peso.....	67
3.2.4. Determinación de temperaturas durante el secado con microondas. ....	67
<b>Capítulo 4 Resultados y Discusión.....</b>	<b>69</b>
<b>4.1. Validación de los modelos propuestos .....</b>	<b>69</b>
4.1.1. Validación del modelo de deshidratación osmótica.....	69
4.1.1.1. Predicción de la pérdida de agua y ganancia de sólidos utilizando modelos empíricos.....	69
4.1.1.1.1 Aplicación del modelo de Azuara .....	69
4.1.1.1.2 Aplicación de modelos polimónicos y función de optimización.....	73
4.1.1.2. Predicción de Perfiles de Humedad y Sólidos Solubles aplicado a datos propios y de literatura utilizando el modelo MODC.....	84
4.1.1.2.1. Aplicación del modelo Osmótico-Difusional Celular (MODC) a medias rodajas de pera.....	84
4.1.1.2.2. Aplicación del modelo Osmótico-Difusional Celular (MODC) a rodajas de kiwi.....	86
4.1.1.2.3. Aplicación del modelo Osmótico-Difusional Celular (MODC) a rodajas de calabacita. ....	87
4.1.1.3. Predicción de Perfiles de Humedad y Sólidos Solubles aplicado a datos propios y de literatura utilizando modelo propuesto de MDFC.....	90
4.1.1.3.1. Aplicación del modelo Difusional en Flujo Contracorriente (MDFC) a medias rodajas de pera. ....	90
4.1.1.3.2. Aplicación del modelo Difusional en Flujo Contracorriente (MDFC) a rodajas de kiwi.....	91
4.1.1.3.3. Aplicación del modelo Difusional en Flujo Contracorriente (MDFC) a rodajas de calabacita. ...	93
4.1.2. Validación del modelo de deshidratación con microondas .....	95
4.1.2.1. Predicción de Perfiles de Temperatura y Humedad aplicado a datos propios.....	95
4.1.2.1.1. Aplicación del modelo de Deshidratación con Microondas (MDMO) a rodajas de pera.....	95
4.1.2.2. Predicción de Perfiles de Temperatura y Humedad aplicado a datos extraídos de literatura.....	98
4.1.2.2.1. Aplicación del modelo de Deshidratación con Microondas (MDMO) a rodajas de papa.....	98
4.1.2.2.2. Aplicación del modelo de Deshidratación con Microondas (MDMO) a rodajas de zanahoria (Temperatura aire 30°C – vacío – 2.95W/g).....	103

4.1.2.2.3. Aplicación del modelo de Deshidratación con Microondas (MDMO) a rodajas de manzana (temperatura aire 40°C - vacío – 10W/g).....	106
4.1.3. Validación del modelo combinado de deshidratación osmótica seguida de la deshidratación con microondas.....	109
4.1.3.1. Predicción de Perfiles de Temperatura y Humedad aplicado a datos propios y extraídos de literatura (modelo DO-DMO).....	109
4.1.3.1.1. Aplicación del modelo de Deshidratación Osmótica-Microondas a rodajas de pera.....	110
4.1.3.1.2. Aplicación del modelo de Deshidratación Osmótica-Microondas a rodajas de banana.....	117
<b>Capítulo 5 Conclusiones.....</b>	<b>124</b>
<b>Nomenclatura.....</b>	<b>126</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>132</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>144</b>
I) Código Propio para la Optimización múltiple de la deshidratación osmótica mediante regresión polinomial (RP) y la metodología de la función de conveniencia (MFC) usando Matlab. ....	145
II) Código Propio para la Deshidratación Osmótica usando Matlab. ....	150
III) Código Propio para la Deshidratación con Microondas usando Matlab. ....	156
<b>Publicaciones resultantes del proceso de elaboración de la presente Tesis Doctoral.....</b>	<b>169</b>

# Capítulo 1

## Introducción y Objetivos

## Capítulo 1 Introducción y Objetivos

El proceso de deshidratación es una de las principales técnicas para la conservación de los alimentos en el mundo. Su aplicación tiene sus orígenes en antiguas civilizaciones alrededor del planeta. La deshidratación consiste en la eliminación del agua contenida dentro del alimento, usualmente por medios térmicos. El proceso de secado tiene el propósito de preservar los alimentos en una condición estable y segura, reduciendo su actividad de agua y extendiendo su vida útil en relación a los productos frescos que le dan origen (Zhang y col., 2006). La remoción de agua promovida por el proceso de deshidratación genera la pérdida de peso del alimento y la disminución del volumen a ocupar por los mismos cuando son transportados y almacenados, disminuyendo de esta manera los costos de almacenamiento y distribución (Toledo, 2007).

Entre los métodos más aplicables para la deshidratación de alimentos pueden mencionarse: liofilización, secado al vacío, deshidratación osmótica, secado en gabinete o bandejas, secado por lecho fluidizado, secado por lecho fijo, secado óhmico, secado por microondas, y la combinación de ellos (George y col., 2004). En general, sin incluir la liofilización y la deshidratación osmótica, la aplicación de calor durante el secado a través de conducción, convección y radiación son las técnicas básicas usadas para la evaporación del agua contenida en los alimentos, mientras que el aire forzado es aplicado para estimular la remoción del vapor formado. La elección del método de secado depende de varios factores, tales como, el tipo de producto (y su valor comercial), la disponibilidad de equipos para secar, costo de deshidratación, calidad final del producto desecado (Sagar y Kumar, 2010).

Jangam y Mujundar (2010) clasificaron los métodos de deshidratación dependiendo del medio térmico interviniente (conducción, convección, radiación, microondas y radio frecuencia-RF):

- . **Métodos directos de secado (convección):** el medio de secado contacta directamente el material y transporta la humedad evaporada.
- . **Métodos indirectos de secado (conducción):** el medio de secado no contacta directamente el material a secar, el secado se realiza en intercambiadores de calor donde paredes metálicas separan el gas deshidratante del material a secar.
- . **Métodos radiantes de secado:** la humedad es removida por efecto del calor emitido por una fuente radiante en un medio de baja presión o de un flujo gas a baja velocidad.

. **Métodos dieléctricos de secado (microondas y RF):** la energía electromagnética es absorbida selectivamente por el agua dentro del material a secar generando un calentamiento volumétrico que promueve la eliminación del agua mediante evaporación.

. **Métodos Isotérmicos de secado (presión osmótica):** Adicionalmente podemos mencionar aquellos métodos que no utilizan medios térmicos para la eliminación de agua como la deshidratación osmótica que utiliza la diferencia de presión osmótica como fuerza impulsora para la deshidratación.

El método de secado más utilizado hasta el momento es el secado convectivo utilizando aire caliente para promover la deshidratación. Sin embargo hay una serie de problemas asociados a la utilización de aire caliente para el secado de alimentos. Los principales inconvenientes están vinculados a las pérdidas de calidad de los productos, produciendo pérdidas en el color, textura, y ciertos cambios químicos que afectan el sabor y promueven importantes pérdidas de nutrientes (Mayor y Sereno, 2004). Las altas temperaturas requeridas para la deshidratación es la mayor causa de las pérdidas de calidad. La reducción de la temperatura del proceso tiene un gran potencial para lograr el mejoramiento de la calidad de los productos desecados (Beaudry y col., 2004). Cuando la temperatura en el secado convectivo se reduce, los tiempos de operación deben aumentarse y los costos asociados se incrementan progresivamente haciendo que la reducción de la temperatura en este proceso sea inaceptable. Con el fin de aumentar la calidad de los productos y a su vez disminuir el tiempo de operación han sido desarrollados pre-tratamientos y nuevos métodos de secado a bajas temperaturas.

La deshidratación osmótica es un método isotérmico ampliamente utilizado para la remoción parcial de agua de los tejidos vegetales, que consiste en la inmersión de frutas y hortalizas, enteras o en trozos por un cierto periodo de tiempo en una solución de azúcares, sales y/o alcoholes de alta presión osmótica. Cuando el azúcar es usado en la solución para la deshidratación osmótica, presenta dos efectos beneficiosos principales ayudando a producir alimentos de alta calidad: (1) inhibición de la polifeniloxidasas y (2) previniendo la pérdida de componentes volátiles durante la deshidratación, incluso con vacío (Prothon y col., 2001). Los productos finales son de alta calidad sensorial y nutricional y más estables contra la contaminación microbiológica y el deterioro químico (Torregiani y Bertolo, 2001). Los principales factores que afectan la cinética del proceso osmótico son composición y concentración de la solución hipertónica, temperatura, tiempo de inmersión, grado de agitación y tiempo de vacío; así como de las características de la materia prima, tales como microestructura

del tejido, estado de madurez, forma y tamaño (Chiralt y Fito, 2003). Como el proceso osmótico es un método suave para la remoción de humedad, la actividad final de agua alcanzada es alta, siendo necesarios procesos adicionales, tales como congelación, secado por aire caliente o microondas (Erle y Schubert, 2001).

Por otro lado, las microondas se emplean en el procesamiento de alimentos debido a las ventajas con respecto a los procesos tradicionales de secado: menor impacto ambiental debido al uso de energía limpia y bajo consumo de energía y tiempo de proceso, y ahorro en espacio. En la industria de los alimentos sus usos incluyen descongelamiento, pasteurización, escaldado, calentamiento, horneado, deshidratación, etc. Un importante número de trabajos han sido publicados sobre la deshidratación con microondas de frutas y hortalizas (Bouraoui y col., 1994; Drouzas y Schubert 1996; Feng y Tang, 1998; Krokida y Maroulis, 1999; Maskan, 2001). Las microondas tienen la capacidad de interactuar con las moléculas de agua en el interior del alimento produciendo su calentamiento y promoviendo la evaporación volumétrica del agua contenida en el producto. De esta manera aumenta la presión de vapor y la fuerza impulsora para la deshidratación (Datta y Zhang, 1999). La deshidratación por microondas (DMO) es aplicada como único proceso o combinada con otros métodos de secado convencionales tales como secado convectivo por aire caliente o deshidratación osmótica. Cuando la deshidratación osmótica es utilizada como etapa previa al secado con microondas, el alimento es protegido de pérdidas de componentes volátiles por la formación de una barrera constituida por el azúcar absorbido por las paredes celulares del alimento, permitiendo de esta manera una mayor preservación del sabor y menores pérdidas de nutrientes durante el proceso térmico subsiguiente. En adición, los tiempos de secado disminuyen considerablemente como consecuencia de la remoción parcial de humedad que ocurre durante el proceso osmótico previo. Varios trabajos han sido publicados sobre el estudio experimental del proceso de deshidratación osmótica seguida del secado con microondas aplicado a frutas y hortalizas (Prothon y col., 2001; Beaudry y col., 2004; Fumagalli y Silveira, 2005; Pereira y col., 2007; Kowalski y col., 2009).

Hoy en día, existe una creciente demanda de frutas y hortalizas deshidratadas de alta calidad y estables (Crapiste, 2000). Los equipos de secado y las condiciones de operación para estos productos deben ser seleccionados y diseñados en base a las características de la materia prima, requerimientos de calidad del producto final y del análisis económico. A pesar de estas consideraciones, la aplicación del modelado matemático y la simulación computacional en el diseño y optimización de secadores es aún escasa debido a la naturaleza compleja de los

materiales vegetales y la dificultad en representar cuantitativamente los cambios en la calidad del alimento durante el proceso de secado.

La deshidratación de alimentos es un proceso complejo que involucra simultáneamente los fenómenos de transferencia de energía y masa. El entendimiento de los diferentes mecanismos involucrados dentro del alimento y entre éste y el ambiente circundante, así como el conocimiento de las propiedades termofísicas, de equilibrio y de transporte de ambos sistemas son requeridos para modelar y simular el proceso (Bruin y Luyben, 1980; Okos y col., 1992; Crapiste y Rotstein, 1997).

Los modelos existentes para modelar la transferencia de masa del proceso de deshidratación osmótica abarcan una amplia gama de enfoques y formas. Según Spiazzi y Mascheroni (2001) se los puede dividir en dos grandes grupos: los fenomenológicos y los microscópico-estructurales. Los primeros relacionan la pérdida de agua, ganancia de sólidos y/o reducción de volumen con las condiciones operativas a través de ecuaciones sencillas, generalmente de validez limitada, sólo al caso de estudio o situaciones similares (Azua y col., 1992; Palou y col., 1994; Panagiotou y col., 1998; Rahman y col., 2001). Los modelos microscópico-estructurales más simplificados consideran difusión en un sistema homogéneo, en los cuales se plantea el balance microscópico de masa para el sistema y obteniendo la solución analítica a partir de la segunda ley de Fick; la misma también se puede emplear para obtener los coeficientes de difusión aparentes para cada componente, ajustando a los datos experimentales (Khin y col., 2006; Rastogi y Raghavarao, 1997). En este mismo grupo se encuentran modelos altamente elaborados como los desarrollados por Marcotte y Le Maguer (1991) y Yao y Le Maguer (1996) que combinan la difusión multicomponente con la existencia de elementos estructurales (pared celular, membrana protoplasmática, espacios intercelulares), a través de los cuales deben difundir los componentes, y que implican resistencias adicionales y generan la aparición de numerosos coeficientes, difíciles de calcular o medir.

El transporte de agua durante la deshidratación con microondas es un fenómeno muy complejo que envuelve diferentes mecanismos (difusión de agua líquida y vapor, flujo capilar, difusión de Knudsen, flujo hidrodinámico, etc.). La composición del producto al final del proceso de deshidratación osmótica (contenido y perfiles de humedad y sólidos solubles) determina la capacidad de interacción radiación-alimento debido a la variación de las propiedades dieléctricas. Estas propiedades son responsables del calentamiento y deshidratación con microondas debido a la interacción del campo eléctrico con las moléculas polares. Varios trabajos han sido reportados

mostrando la dependencia de las propiedades dieléctricas de soluciones de azúcares con la concentración (Liao y col., 2001; Liao y col., 2003). Además, la interacción de la energía electromagnética con el alimento debe ser tomada en cuenta en el modelado cuando se utilizan microondas como medio de calentamiento. El comportamiento de los campos eléctrico y magnético dentro del horno de microondas es muy complejo. Las ecuaciones de Maxwell describen su distribución en el interior de los hornos de microondas, vacíos o cargados (Clemens y Saltiel, 1996; Verboven y col., 2003). En la actualidad, dos líneas de modelado han sido seguidas para predecir la distribución de la energía electromagnética dentro del alimento; resolver las ecuaciones de Maxwell (Dinčov y col., 2004) o el uso de una descripción aproximada: la ley de Lambert, que considera un decaimiento exponencial de la energía dentro del alimento (Tong y Lund, 1993; Ni y Datta, 2002). Con respecto al modelado de la transferencia de masa, debe tenerse en cuenta que la deshidratación ocurre en dos etapas principales, la etapa de eliminación leve de agua (1) hasta que se alcanza la temperatura de equilibrio donde comienza la etapa de vaporización intensa (2), las cuales deben ser modeladas independientemente.

Varios autores han modelado el proceso de deshidratación con microondas (Zhou y col., 1995; Jia y Afzal, 2008). En la presente Tesis, el estudio está enfocado en la transferencia de masa y energía debido a la interacción entre el alimento y las microondas. Esta interacción es afectada por el cambio en las propiedades del alimento debido a la incorporación del medio osmótico y la pérdida de agua que ocurre durante el pretratamiento osmótico (DO). La ley de Lambert fue usada para modelar esta interacción con el propósito de obtener la distribución del campo electromagnético dentro de las muestras. Esta ley es incorporada dentro del balance de energía como un término fuente para obtener los perfiles de temperatura bajo diferentes condiciones de calentamiento con microondas. Esta ley simplificada ha sido exitosamente utilizada en varios trabajos previos dedicados al calentamiento y deshidratación (Rattanadecho y col., 2001; Sanga y col., 2002; Sungsoontorn y col., 2011).

Aunque algunos modelos han sido desarrollados con el propósito de describir la transferencia de energía y masa durante la deshidratación combinada con microondas, aún existe una falta importante de análisis teóricos, modelado y simulación y validación experimental para la mayoría de los procesos que involucran la deshidratación combinada con microondas de hortalizas y frutas (Zhang y col., 2006), incluyendo la deshidratación osmótica seguida del secado con microondas.

En consecuencia el propósito de la presente Tesis es desarrollar un modelo numérico del proceso combinado de deshidratación osmótica-microondas de frutas y hortalizas para determinar con exactitud la pérdida de agua y la ganancia de sólidos como valores finales durante el pretratamiento osmótico y su influencia en el proceso posterior de deshidratación con microondas. Hasta el momento este tema aún no ha sido investigado. Adicionalmente, los tiempos de procesamiento pueden ser determinados, permitiendo disponer de información útil para el diseño de equipamiento que haga posible llevar el proceso combinado a nivel industrial.

En base a las consideraciones previas establecidas, la presente Tesis Doctoral tiene los objetivos siguientes:

- Plantear un modelo numérico adecuado y coherente en su complejidad para predecir las variables del proceso durante la deshidratación osmótica seguida por la aplicación de microondas (DO-DMO) con el fin de resolver los balances microscópicos de masa y energía.
- Resolver el balance microscópico de masa durante la deshidratación osmótica (DO) considerando propiedades de transporte variables con la humedad y la concentración de soluto.
- Resolver los balances microscópicos de masa y energía durante la deshidratación con microondas (DMO) considerando propiedades térmicas, electromagnéticas y de transporte variables con la temperatura y el estado de la muestra.
- Validar las predicciones de los modelos con datos experimentales obtenidos en nuestro laboratorio y utilizando datos obtenidos de literatura.
- Verificar la aplicabilidad del modelo a diferentes configuraciones de operación.

# Capítulo 2

## Modelado Matemático

## Capítulo 2 Modelado Matemático

### 2.1 Teoría

El marco teórico de la presente Tesis abordará la descripción de los procesos de deshidratación osmótica y la deshidratación utilizando microondas. En relación a la deshidratación osmótica se introducirán los mecanismos de transferencia de masa que ocurren y se describirá el planteo del balance de masa involucrado, considerando dos enfoques fundamentales. Además se presentará la principal propiedad de transporte que describe el proceso de transferencia durante la deshidratación osmótica, el coeficiente de difusión o difusividad. Posteriormente se abordarán los conceptos básicos referentes a la deshidratación con microondas. Se describirán los mecanismos de transferencia de masa y energía involucrados. Luego se presentará el funcionamiento de los hornos de microondas. Y finalmente se abordarán las características principales de la interacción entre el alimento y las microondas a través de las propiedades dieléctricas de los materiales y su funcionalidad con respecto a la temperatura y humedad.

### 2.1.1. Deshidratación Osmótica

Una alternativa para prevenir las pérdidas de calidad de frutihortícolas producidas por el secado convencional es la deshidratación mediante la inmersión de los productos (enteros, pelados o en trozos) en soluciones concentradas de azúcares, sales y/o polialcoholes (sacarosa, cloruro de sodio, glucosa, sorbitol, etc.), este proceso se conoce como deshidratación osmótica (Raoult-Wack y col., 1989).

Al tratarse de un proceso de deshidratación suave se obtienen productos con contenidos de agua relativamente altos (30-50%), clasificados como alimentos de humedad intermedia (Sharma y col., 2003). Por esta razón se ha propuesto la aplicación de la deshidratación osmótica como pretratamiento previo al secado o la congelación, para reducir la carga de agua del producto con una mejora simultánea de la calidad (Prothon y col., 2001).

Esta técnica de deshidratación genera la eliminación parcial del contenido de agua del alimento, con la simultánea incorporación de sólidos solubles provenientes de la solución osmótica. La pérdida de agua por parte del alimento puede dividirse en dos períodos: (1) un período inicial, de alrededor de 2 horas, con una alta velocidad de eliminación de agua y (2) un período, de 2 a 6 horas, con una velocidad decreciente de eliminación de agua, tendiendo cerca de las 6 horas al equilibrio con la solución osmótica (Farkas y Lazar, 1969).

Los principales factores que controlan el proceso de deshidratación osmótica se los puede clasificar en dos grandes grupos, los factores que dependen de la naturaleza del producto mismo y las variables tecnológicas del proceso (Barat y col., 1998).

Factores Intrínsecos:

- Humedad inicial del producto y composición,
- Estructura del material a deshidratar,
- Tamaño de la muestra,
- Forma,
- Madurez de la fruta u hortaliza.

Factores Tecnológicos:

- Composición, concentración y agitación de la solución osmótica,

- Temperatura del baño osmótico,
- Presión aplicada,
- Tiempo del proceso.

La evolución de la deshidratación osmótica usualmente se analiza en términos de pérdida de agua ( $WL$ ), ganancia de sólidos ( $SG$ ) y pérdida de peso ( $WR$ ). Estas son las principales variables cinéticas que se miden durante la deshidratación osmótica (Conway y col., 1983), y pueden calcularse mediante las siguientes expresiones:

$$WL = \frac{(M_{ini}C_{wini} - M_t C_{wt})}{M_{ini}} \quad (1)$$

$$SG = \frac{(M_t C_{st} - M_{ini} C_{sini})}{M_{ini}} \quad (2)$$

$$WR = \frac{M_{ini} - M_t}{M_{ini}} \quad (3)$$

donde  $M_{ini}$  es el peso de la muestra a tiempo cero,  $C_{w,ini}$  es el contenido de humedad a tiempo cero,  $M_t$  es el peso de la muestra a tiempo  $t$ ,  $C_{w,t}$  es el contenido de humedad a tiempo  $t$ ,  $C_{s,ini}$  y  $C_{s,t}$  son la concentración de sólidos solubles a tiempos cero y  $t$ , respectivamente.

Aunque las mediciones de las variables cinéticas permiten un adecuado seguimiento del proceso osmótico a nivel tecnológico es insuficiente para lograr un análisis más profundo sobre los mecanismos de transferencia de masa involucrados y las relaciones entre estos mecanismos internos y los factores tecnológicos que gobiernan el proceso osmótico.

### *2.1.1.1. Mecanismo de Transferencia de Masa*

#### *2.1.1.1.1. Transferencia de Masa durante la deshidratación osmótica*

La ósmosis consiste en el movimiento molecular de ciertos componentes de una solución a través de una membrana semipermeable hacia otra solución de menor concentración de un cierto tipo de moléculas (Raoult-Wack y col., 1989; Jayaraman y Das Gupta, 1992). La diferencia de potencial químico a través de las membranas semipermeables entre el producto y la solución osmótica, es la fuerza impulsora para la transferencia de masa durante la deshidratación

osmótica. El potencial químico  $\mu_i$  del componente  $i$  está relacionado con la actividad de agua según la expresión:

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln a_w \quad (4)$$

donde  $\mu_i^0$  es el potencial químico de referencia,  $R$  la constante de los gases,  $T$  la temperatura absoluta y  $a_w$  es la actividad de agua del componente  $i$  multiplicado por la fracción molar del mismo componente. La transferencia de masa tiene lugar hasta que los valores de actividad de agua de la solución osmótica y del alimento se igualan.

A un nivel macroscópico el proceso de deshidratación osmótica involucra tres flujos simultáneos y en contracorriente (Raoult-Wack y col., 1991), un flujo saliente de agua del alimento a la solución osmótica, una entrada de solutos desde la solución deshidratante al tejido vegetal y una salida de solutos de bajo peso molecular (azúcares, ácidos orgánicos, sales minerales, vitaminas, etc.) desde la alimento a la solución osmótica. Este último flujo de masa suele ser de tan bajas proporciones considerándose despreciable cuantitativamente en comparación con los otros dos flujos.

La existencia de estos dos flujos de masa opuestos y simultáneos es una de las principales dificultades cuando se modela la transferencia de masa en la deshidratación osmótica (Biswal y Le Maguer, 1989). Además, estos flujos ocurren en una condición fuerte de no equilibrio, acompañada por un importante proceso de encogimiento y deformación del tejido vegetal (Lenart y Flink, 1984) y posiblemente por interacciones entre los diferentes flujos (Raoult-Wack y col., 1991).



**Figura 1.** Mecanismos de transferencia de masa para la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas.

Otro enfoque de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica tiene en cuenta la fisiología celular y la estructura del tejido vegetal a través de las cuales se intercambian los diferentes componentes (Yao y Le Maguer, 1996). El mismo toma en cuenta la transferencia de agua y compuestos de bajo peso molecular a través de las membranas celulares y la difusión multicomponente (agua y sólidos solubles) a través de los espacios extracelulares (Spiazzi y Mascheroni, 1997). La Figura 1 presenta un esquema de los fenómenos de transporte involucrados en el proceso de deshidratación osmótica.

Por consiguiente varios mecanismos de transporte coexisten durante la deshidratación osmótica de frutas y hortalizas. El planteo de un modelo completo que involucre todos los mecanismos descritos anteriormente es muy complicado (Spiazzi y Mascheroni, 1997). Aunque han sido desarrollados modelos sencillos que pueden representar los datos experimentales, el uso de los mismos está limitado a ciertos casos y no consideran gran parte de los mecanismos involucrados en el proceso osmótico. Sin embargo, otros modelos mucho más elaborados, permiten describir el proceso con la complejidad mencionada pero su validación experimental se vuelve extremadamente difícil debido al número de parámetros que deben conocerse a fin de resolver las ecuaciones planteadas (Kaymak-Ertekin y Sultanoglu, 2000).

#### 2.1.1.1.2. Balances de Masa

La transferencia de agua es uno de los aspectos más importantes durante la deshidratación osmótica. El mecanismo mayoritario por el que se realiza la transferencia de masa es la difusión debida al gradiente de concentración existente entre el alimento y la solución osmótica (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado, 2000). En adición con la difusión de agua desde el alimento hacia la solución osmótica, se establece un flujo entrante de sólidos solubles hacia el tejido vegetal proveniente de la solución osmótica concentrada.

La velocidad de difusión del agua y sólidos solubles puede estimarse mediante la ley de Fick (Conway y col., 1983):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla(D\nabla C) \quad (5)$$

donde  $C$  es la concentración de agua o soluto,  $t$  es el tiempo y  $D$  es el coeficiente de difusión de agua o soluto.

La Ec. 5 puede resolverse tanto numérica como analíticamente dependiendo de las suposiciones que se establezcan y de las condiciones iniciales y de contorno que se presenten para cada caso.

Considerando el alimento como una placa plana (difusión unidimensional) y coeficiente de difusión de agua y soluto constante en todo el dominio espacial la ecuación de Fick (Ec. 5) puede expresarse como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (6)$$

donde  $x$  representa la distancia en la dirección del flujo.

Cuando se plantean los balances de masa considerando los mecanismos involucrados con las microestructuras de los tejidos vegetales se presentan ecuaciones para el volumen celular, como para los espacios extracelulares (Spiazzi y Mascheroni, 2001; Fluory y col, 2008).

Para el ámbito celular ( $int$ ), la siguiente ecuación puede ser planteada, la cual involucra la transferencia de masa transmembrana desde la célula hacia el espacio extracelular:

$$\frac{d(M_{j\ int})}{dt} = -(k_{w\ int} \Delta C_{j\ int}) A_{int} \quad (7)$$

donde  $M_{j\ int}$  es masa del componente  $j$  en el espacio celular;  $C_j$  es la concentración del componente  $j$ ,  $k_{w\ int}$  es el coeficiente de transferencia de masa transmembranario;  $A_{int}$  representa el área de transferencia del volumen celular y  $t$  es el tiempo.

Para los espacios extracelulares ( $ext$ ), el balance de masa involucra tanto la difusión del componente  $j$  (agua o sólidos solubles) entre espacios contiguos como el flujo de masa proveniente del citoplasma celular:

$$\frac{d(M_{j\ ext})}{dt} = \Delta[(D_{app\ j} \cdot \nabla(C_{j\ ext}) + C_{j\ ext} u) A_{ext}] + (k_{w\ int} \Delta C_{j\ int}) A_{int} \quad (8)$$

donde  $M_{j\ ext}$  es masa del componente  $j$  en el espacio extracelular;  $D_{app\ j}$  es el coeficiente aparente de difusión del componente  $j$ ;  $A_{ext}$  es el area de transferencia extracelular y  $u$  representa la velocidad de encogimiento, la cual está relacionada con el movimiento de contracción del área de transferencia.

### 2.1.1.2. Coeficiente Efectivo de Difusión

El coeficiente de difusión ( $D$ ) depende de las especies moleculares que difunden, del medio en el cual se encuentran y de la temperatura. Es una medida de la velocidad a la cual las sustancias difunden unas en otras. Las unidades a las cuales se expresa la difusividad son diversas, en el sistema internacional de medida (SI) se presenta como  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ .

La difusividad en gases puede ser predicha casi con exactitud, con la ayuda de la teoría cinética de los gases. La difusividad de los gases en una mezcla binaria, a una cierta temperatura y a presión atmosférica está en el orden de  $10^{-5}$  a  $10^{-4} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ .

Varios modelos han sido propuestos para la predicción de la difusividad en líquidos. Uno de los más conocidos es la ecuación de Einstein-Stokes para la difusión Browniana de un soluto (Saravacos, 2005). Según este modelo, la difusividad  $D$  de una molécula de soluto (que se asume esférica), con un radio molecular  $r$ , en un líquido de viscosidad  $\mu$  está dada por:

$$D = \frac{k_B T}{6 \pi r_B \mu_m} \quad (9)$$

donde  $k_B$  es la constante de Boltzmann,  $r_B$  es el radio de la partícula y  $T$  es la temperatura absoluta. Aunque la suposición de esfericidad presenta una seria desviación de la realidad (Berk, 2009), esta ecuación presenta la ventaja de establecer una relación teórica viable entre el coeficiente de difusión y la concentración de soluto en la mezcla (considerado dentro de la viscosidad de la mezcla) y la temperatura, evitando de esta manera establecer relaciones sólo a través de correlaciones de datos experimentales. Algunos trabajos han sido publicados aplicando esta formulación para el cálculo del coeficiente de difusión en función de la temperatura y la concentración molar del soluto en una solución binaria para el modelado de la deshidratación osmótica (Floury y col., 2008; Goula y Lazarides, 2011).

Los coeficientes de difusión para ciertas sustancias en el aire y en el agua son informadas en la Tabla 1. La difusividad de solutos en agua, a temperatura ambiente, se extiende de  $10^{-9}$  para pequeñas moléculas a  $10^{-11} \text{m}^2/\text{s}$  para grandes, por ejemplo proteínas.

**Tabla 1.** Difusividad de ciertas sustancias en agua o en aire\*

Sustancia	$D$ en aire ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$D$ en agua ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
Agua	$25 \cdot 10^{-6}$	---
$\text{CO}_2$	$16 \cdot 10^{-6}$	$1.98 \cdot 10^{-9}$
Etanol	$12 \cdot 10^{-6}$	$1.98 \cdot 10^{-9}$
Ácido Acético	$13 \cdot 10^{-6}$	$1.98 \cdot 10^{-9}$
Ácido Sulfúrico	---	$2.64 \cdot 10^{-9}$
Cloruro de Sodio	---	$1.55 \cdot 10^{-9}$
Glucosa	---	$0.67 \cdot 10^{-9}$
Sacarosa	---	$0.52 \cdot 10^{-9}$
Almidón de maíz	---	$0.1 \cdot 10^{-9}$

\*Datos extraídos de Berk (2009).

La temperatura es una de las variables que más afectan el proceso de deshidratación osmótica (Lenart y Flink, 1984). Un aumento de la temperatura intensifica la eliminación de agua y la penetración de la sustancia osmótica en el tejido. La dependencia del coeficiente de difusión  $D$  con la temperatura se puede describir a través de una relación tipo Arrhenius:

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (10)$$

donde  $E_a$  es la energía de activación,  $T$  es la temperatura absoluta,  $D_0$  es un coeficiente pre-exponencial y  $R$  es la constante universal de gases. La energía de activación se puede determinar al representar  $\ln D_{ef}$  frente a  $1/T$ .

## 2.1.2. Deshidratación con Microondas

### 2.1.2.1. Mecanismos de Transferencia de Energía y Masa

#### 2.1.2.1.1. Calentamiento con Microondas

Las microondas se clasifican dentro del espectro electromagnético como ondas de alta frecuencia y baja energía (Gunasekaran, 2002). Se encuentran en el rango de longitud de onda entre 0.1 y 1m en el aire, correspondiente a frecuencias entre 300 y 3000MHz. Como puede observarse a partir de la Figura 2 las microondas se encuentran ubicadas en el espectro entre la radiación infrarroja y las ondas de radio.

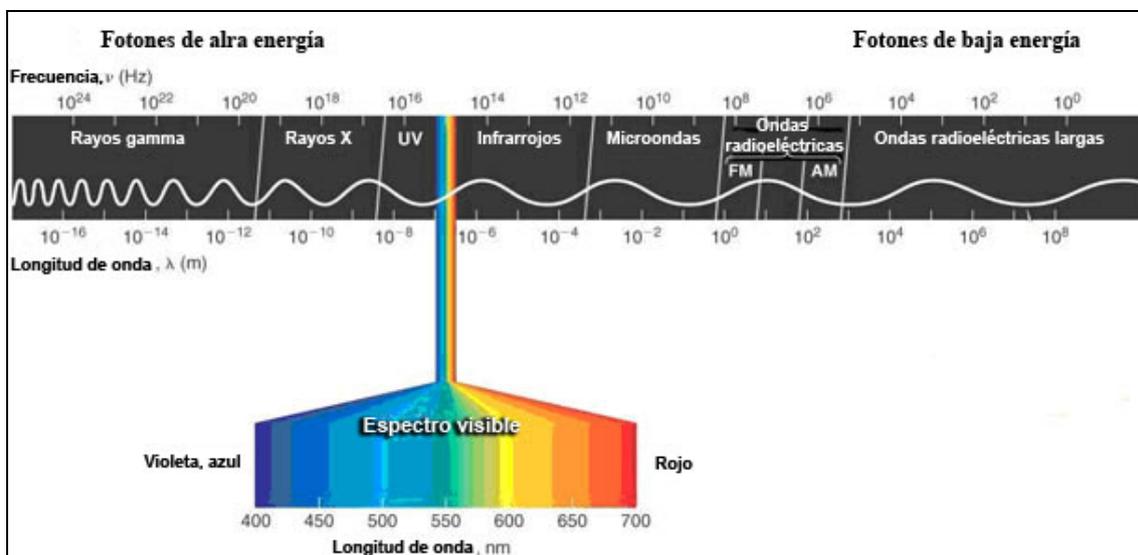


Figura 2. Espectro electromagnético.<sup>1</sup>

Las microondas, como cualquier otra radiación, son en parte reflejadas, en parte transmitidas y en parte absorbidas. La fracción absorbida genera calor, lo cual promueve el calentamiento a partir de la interacción de los alimentos con las microondas. A diferencia de la radiación infrarroja, sin embargo, las microondas penetran profundamente en los productos. En el calentamiento con microondas, el calor es generado volumétricamente dentro del material irradiado y la velocidad de la entrada de energía no depende de la conductividad térmica o de la

<sup>1</sup> Imagen extraída del sitio web: <http://ec.europa.eu/health/opinions/es/lamparas-bajo-consumo/figtableboxes/light-spectrum.htm>

resistencia de la superficie. La consecuencia más marcada del poder de penetración de las microondas es la rapidez excepcional del calentamiento (Berk, 2009).

A diferencia de la radiación térmica, la acción de calentamiento con microondas depende fuertemente de la composición química del material a ser irradiado. Las microondas interactúan principalmente con las moléculas polares y las partículas cargadas. El componente más importante en esta interacción son las moléculas de agua del alimento (Ryynänen, 1995; Fellows, 2000; Berk, 2009). La energía electromagnética es transformada en calor dentro del alimento como resultado de la interacción con las moléculas polares presentes en este último. Entre los mecanismos a escala molecular pueden mencionarse la conducción iónica y la rotación dipolar. Los materiales dieléctricos están compuestos por un núcleo atómico positivo envuelto en electrones negativos. Cuando un campo eléctrico es aplicado las cargas negativas son desplazadas con respecto al núcleo y son inducidos los momentos dipolares produciendo el fenómeno de polarización electrónica (Jones, 1986). Dicho fenómeno genera que las cargas locales se mueven en consonancia con el campo eléctrico aplicado. El efecto de polarización de las cargas genera un desfase entre la corriente resultante y el campo eléctrico aplicado generando la disipación de la potencia dentro del alimento. Esta disipación ocurre en forma de calor.

En consecuencia, el calor es generado dentro del material fruto de la penetración de las microondas a través de él. Este fenómeno involucra dos características del material dieléctrico. Una asociada a la concentración de las moléculas polares que implica la capacidad del producto de almacenar energía (constante dieléctrica) y la otra relacionada a la fracción de energía de las microondas que es convertida en calor (factor de pérdida dieléctrica).

De esta manera estas características llamadas también propiedades dieléctricas influyen sobre la manera que el material dieléctrico se calienta (Berk, 2009). En consecuencia la potencia volumétrica generada por las microondas dentro del alimento dependerá necesariamente de estas propiedades, que a su vez son función de la frecuencia y de la intensidad del campo eléctrico.

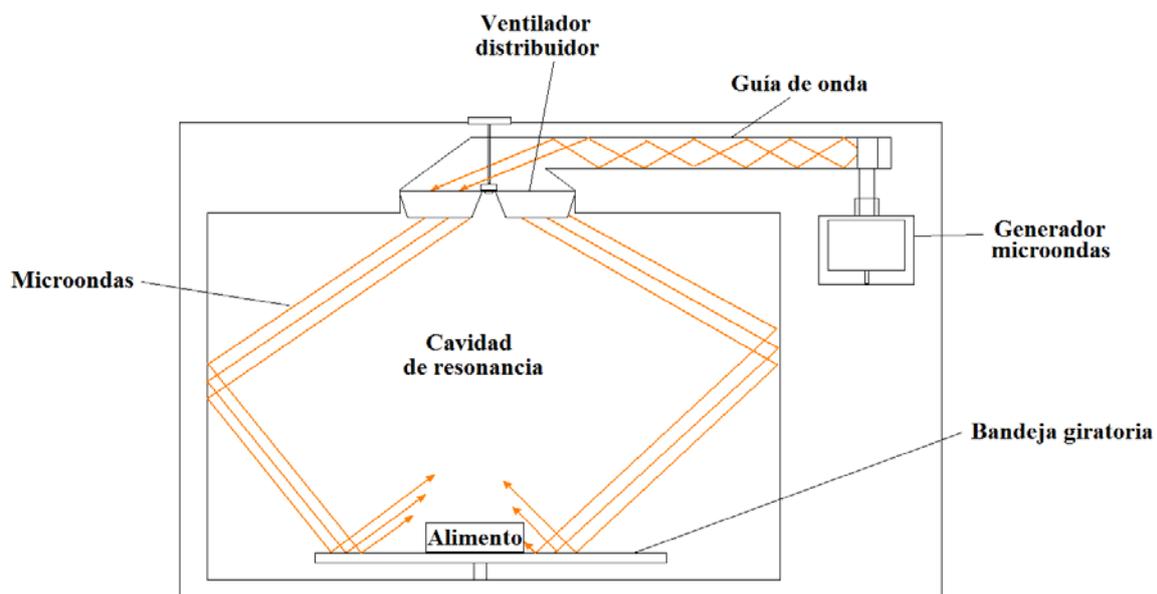
El calentamiento con microondas es usado principalmente en hornos hogareños y de servicios de catering y alimentación (restaurantes, aerolíneas, etc.), para descongelar productos congelados, para cocinar, para hornear y también para hervir agua. Primero introducido en los años 1950, el horno de microondas se ha convertido en el principal dispositivo para el calentamiento de

alimentos en hogares y en muchos establecimientos de servicio de alimentos (Datta y Anantheswaran, 2001).

Por consiguiente, la industria de procesamiento de alimentos dedica considerables esfuerzos para desarrollar productos y empaques compatibles con las capacidades y las limitaciones de los hornos de microondas. En cuanto a las aplicaciones industriales, el uso del calentamiento con microondas en industria de la alimentación es todavía limitado a un número pequeño de casos donde este método ofrece claras ventajas tecnológicas y económicas en relación a los sistemas de calentamiento convencional. Una de las aplicaciones industriales más exitosas del calentamiento con microondas es el templado (descongelación parcial) de carne congelada y pescado antes del corte (Schiffmann, 2001).

#### 2.1.2.1.2. Hornos de microondas

Los hornos de microondas (Figura 3) consisten principalmente de un generador de microondas (magnetron), tubos de aluminio llamados guías de onda, y una cavidad metálica (cavidad de resonancia) (Gunasekaran, 2002).



**Figura 3.** Croquis de un horno de microondas (basado en Vollmer, 2004).

El generador de microondas es un diodo cilíndrico, que está compuesto por un tubo de cobre sellado. El tubo contiene platos de cobre que señalan hacia el centro como rayos en una rueda. Este ensamblado es llamado ánodo y tiene un filamento de cable en forma de espiral (cátodo) en

el centro. Cuando un alto voltaje es aplicado (4000 V), el cátodo produce electrones libres, que dejan su energía para producir microondas que oscilan rápidamente, las que son dirigidas hacia una guía de ondas. La guía refleja el campo eléctrico internamente y así lo transfiere a la cavidad de resonancia (Fellows, 2000).

Para asegurar una buena distribución del campo electromagnético dentro de la cavidad, que permita un calentamiento uniforme, se incorporan ventiladores que sirven como distribuidores de las ondas y también platos giratorios, donde son colocados los productos, logrando mover el alimento mejorando aún más la distribución produciendo un calentamiento más uniforme. Es importante que la potencia de salida del magnetron sea impuesta en relación al tamaño de la cavidad de calentamiento para prevenir los arcos foto voltaicos. La potencia nominal de los equipos domésticos se extiende de 0.7 a 2 kW.

#### *2.1.2.2. Propiedades Dieléctricas*

Las propiedades dieléctricas son de importancia crítica en el entendimiento de la interacción entre la energía electromagnética de las microondas y los alimentos (Nelson y Datta, 2001). Estas propiedades determinan la capacidad de los materiales biológicos de absorber la energía de las microondas y transformarla en calor durante el calentamiento dieléctrico. Junto con estas propiedades las características del campo electromagnético generado por los hornos microondas son determinantes en los mecanismos de transferencia de energía involucrados.

De esta manera las propiedades dieléctricas afectan directamente el mecanismo de interacción entre el alimento y el campo eléctrico aplicado por las microondas.

Las propiedades dieléctricas usualmente de interés son la constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ), y el factor de pérdida dieléctrica ( $\epsilon''$ ) que corresponden a la parte real e imaginaria de la permitividad relativa compleja ( $\epsilon_r$ ).

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (11)$$

La constante dieléctrica representa la capacidad de un material de almacenar energía eléctrica y el factor de pérdida dieléctrica indica la capacidad del alimento de disipar la energía acumulada en forma de calor.

El factor de disipación o tangente de pérdida ( $\tan \delta$ ) es usado generalmente como un parámetro dieléctrico descriptivo, representa una medida de la capacidad del material para generar calor, y se define como:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (12)$$

Cuando un alimento es sometido a un campo de microondas para su calentamiento, las propiedades dieléctricas determinan el comportamiento de dichos materiales. En consecuencia se puede expresar la relación entre las propiedades dieléctricas y la potencia disipada, en forma de calor por unidad volumen:

$$P^* = 55.63 f \varepsilon'' E^2 \times 10^{-12} (W / m^3) \quad (13)$$

donde  $f$  es la frecuencia del campo electromagnético producido por las microondas ( $s^{-1}$ ) y  $E$  representa la intensidad del campo eléctrico (V/m). La forma en la que un material se calienta como resultado de la interacción con las microondas depende también de otras propiedades tales como el calor específico, conductividad térmica y densidad del material. El cambio en la temperatura y de la humedad del alimento afectan en forma determinante las condiciones del calentamiento dieléctrico.

La dependencia directa de la potencia disipada dentro del alimento con las propiedades dieléctricas puede visualizarse claramente para el caso de que  $E$  y  $f$  se mantienen constantes (Ec. 13), la velocidad de generación de calor por unidad de volumen ( $P$ ) es proporcional al factor de pérdida dieléctrica ( $\varepsilon''$ ). El efecto del campo de frecuencia es más complicado. Por una parte, la velocidad de la generación de calor es proporcional a la frecuencia  $f$ , de acuerdo con la Ec. 13. Por otra parte, el factor de pérdida en sí mismo es dependiente de la frecuencia, aumentando a un máximo a una cierta frecuencia, llamada crítica (Meredith, 1998). En adición, el factor de pérdida es dependiente de la temperatura y por lo tanto cambia durante el calentamiento con microondas (Berk, 2009).

En relación a la penetración de energía de las microondas, las propiedades dieléctricas son muy importantes para evaluar dicho efecto. Por ejemplo para una onda plana propagándose en la dirección  $x$  dentro de una placa plana, la magnitud de la intensidad del campo eléctrico se define como:

$$|E| = E_0 e^{-\alpha x} \quad (14)$$

donde  $E_0$  es la intensidad del campo eléctrico en la superficie de la placa,  $\alpha$  es el factor de atenuación y  $x$  es la distancia desde la superficie en la dirección de propagación de la onda dentro del material.

El factor de atenuación  $\alpha$  está relacionado a las propiedades dieléctricas del material mediante la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\varepsilon'}{2} (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)} \quad (15)$$

En la Ec. 14 puede observarse que la intensidad campo eléctrico  $E$  decrece a medida que la onda avanza dentro del material, y considerando que la potencia disipada  $P$  es proporcional al cuadrado de la intensidad del campo  $E$  (Ec. 13), en consecuencia el decaimiento de la disipación de potencia dentro del alimento puede definirse como sigue:

$$P = P_0 e^{-2\alpha x} \quad (16)$$

donde  $P_0$  es la potencia disipada en la superficie del material (W).

Otro parámetro importante que caracteriza la forma en la cual las microondas interactúan con el alimento es la profundidad de penetración ( $d_p$ ) que está definida como la distancia en la cual es 63% de la potencia de microondas aplicada es absorbida y está asociada con las propiedades dieléctricas del material ( $\varepsilon'$  y  $\varepsilon''$ ) y con la longitud de onda en el vacío del campo electromagnético aplicado ( $\lambda_0$ ).

$$d_p = \frac{\lambda_0}{2\pi\sqrt{2\varepsilon'}} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} - 1 \right]^{-1/2} \quad (17)$$

La profundidad de penetración de las microondas en los alimentos viene determinada por la constante dieléctrica y el factor de pérdida del alimento. La constante dieléctrica como el factor de pérdida dieléctrica dependen de la temperatura, de la composición y estructura del material y de la frecuencia del campo electromagnético aplicado (Nelson y Datta, 2001). En la Tabla 2 se resumen los valores de las propiedades dieléctricas para algunos alimentos. En general, mientras menor el factor de pérdida (es decir mayor transparencia a microondas) y menor la frecuencia,

mayor la profundidad de penetración (Fellows, 2000). Como la mayor parte de los alimentos tienen un alto contenido de humedad y por lo tanto un factor de pérdida alto, ellos fácilmente absorben las microondas. Sin embargo, en el caso de alimentos con bajo contenido de humedad debe tenerse cuidado con la formación de un arco fotovoltáico que produce una gran elevación de temperatura produciendo el quemado del producto.

**Tabla 2.** Propiedades Dieléctricas de algunos alimentos y materiales a 20-25°C y 2450Mhz\*

Componente	Constante Dieléctrica	Factor de Pérdida	Profundidad de Penetración (cm)
Banana	62	17	0.93
Carne	51	16	0.87
Pan	4	0.005	1170
Salmuera 5%	67	71	0.25
Manteca	3	0.1	30.5
Zanahoria	71	18	0.93
Aceite para cocinar	2.6	0.2	19.5
Agua destilada	77	9.2	1.7
Jamón	3.2	67	0.3
Pescado	46.5	12	1.1
Papa	62	16.7	0.93

\* Datos extraídos de Fellows (2000).

#### 2.1.2.2.1. Funcionalidad de las propiedades dieléctricas con la temperatura y la humedad

Cuando la energía electromagnética de las microondas interactúa con los alimentos, la respuesta de estos últimos depende principalmente de las propiedades dieléctricas. Estas propiedades dependen de varios factores, algunos propios del material vegetal irradiado y otros relacionados con las características del campo eléctrico incidente.

Entre estos factores pueden mencionarse la frecuencia del campo eléctrico aplicado, la temperatura del material, la densidad, composición y estructura de la fruta o vegetal. En el caso del calentamiento en hornos de microondas la frecuencia suele ser un valor constante tomando valores usuales de 915 y 2450MHz (en Sudamérica preferentemente esta última). La dependencia de las propiedades dieléctricas con la frecuencia se traduce principalmente en la profundidad de penetración que puede alcanzar la onda incidente, ambos factores varían

inversamente con el otro. Aunque a mayores niveles de frecuencia la absorción de energía aumenta, la elección de una frecuencia de 2.45GHz tiene como criterio principal que todo el alimento pueda ser alcanzado por las ondas electromagnéticas, y en consecuencia calentado en todo el volumen, debido a que la profundidad de penetración toma valores de unos cuantos centímetros, dimensiones similares a la mayoría de los alimentos procesados con microondas (Vollmer, 2004).

La dependencia de las propiedades dieléctricas de los alimentos con la temperatura, es función de la frecuencia a la cual se generan las microondas. Para el agua pura a valores de frecuencia constante de 2.45GHz, el incremento de temperatura produce una disminución tanto en la constante dieléctrica como en el factor de pérdida dieléctrico ( $\epsilon''$ ) dando lugar a una menor disipación del calor en el alimento. Este efecto es debido fundamentalmente al cambio o descenso en el tiempo de relajación, que es la medida del efecto de polarización, que promueve la disipación de la energía en forma de calor. La ecuación de Debye (Feng y col, 2002) da cuenta de la relación inversa entre la temperatura y el tiempo de relajación ( $\tau$ ).

$$\tau = V_M \frac{3\nu}{\kappa T} \quad (18)$$

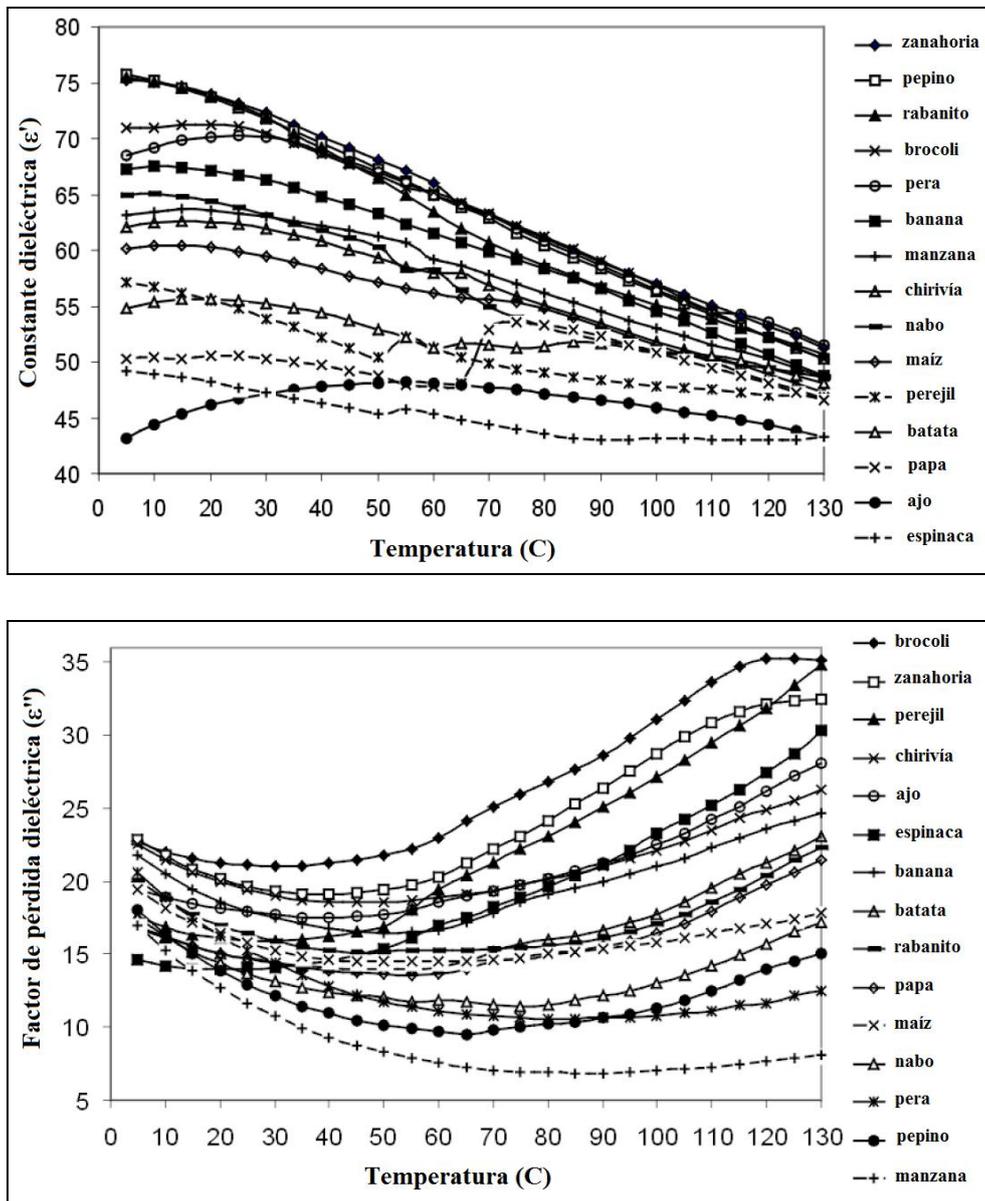
donde  $V_M$  es el volumen de la molécula,  $\nu$  es la viscosidad,  $\kappa$  la constante característica y  $T$  la temperatura.

La dependencia de las propiedades dieléctricas con la temperatura se ve modificada (Figura 4). Especialmente en el caso del factor de pérdida dieléctrico, el cual disminuye con el cuadrado de la temperatura hasta cierto valor (temperatura de transición), a partir del cual  $\epsilon''$  aumenta con el incremento de temperatura (Sipahioglu y Barringer, 2003).

Ciertos productos frutihortícolas (papa y ajo) presentan variación en su dependencia de las propiedades dieléctricas con la temperatura. Este efecto se observa especialmente en la variación de la constante dieléctrica, en cierto rango de temperatura. Este comportamiento diferente puede ser debido a las modificaciones estructurales que sufren ciertos componentes del alimento como el almidón (Sipahioglu y Barringer, 2003), que probablemente gelatiniza en ese rango de temperaturas, produciendo una desviación del comportamiento esperable para frutas y hortalizas.

Como fue mencionado previamente, el principal componente de los alimentos que interactúa con las microondas es el agua. En consecuencia la variación de humedad de los alimentos tiene un

efecto directo en la capacidad de las microondas de calentar el producto. Muy pocos trabajos han sido publicados en relación a la dependencia de las propiedades dieléctricas con la humedad durante el proceso de deshidratación de frutihortícolas. En la Tabla 3 se compila la variación de las propiedades dieléctricas de manzanas en función de un amplio rango de contenido de agua.



**Figura 4.** Variación de la constante dieléctrica y del factor de pérdida dieléctrica de frutas y hortalizas en función de la temperatura. (Extraídos de Sipahioglu y Barringer, 2003).

**Tabla 3.** Variación de las Propiedades Dieléctricas de manzana con el contenido de humedad a 22°C y 2450Mhz\*

Humedad %	Constante Dieléctrica	Factor de Pérdida
87.5	54.5	11.2
80.7	41.0	9.3
79.6	36.3	8.6
78.0	37.1	8.5
69.7	30.3	8.5
55.1	23.1	8.5
46.6	18.4	7.8
36.4	12.3	6.2
30.3	10.7	5.5
23.8	4.5	1.6
19.0	3.3	0.7
14.0	2.6	0.3
9.2	2.2	0.1
3.8	1.7	0.07

\* Datos extraídos de Feng y col. (2002).

Feng y col. (2002) estudiaron la variación de las propiedades dieléctricas con la humedad de manzanas en un amplio rango de contenidos de agua. Ellos encontraron que en general las propiedades dieléctricas disminuyen con el descenso de la humedad de los alimentos. Cuando la disponibilidad de agua es alta en el alimento, a altos contenidos de humedad, las microondas interactúan primordialmente con el agua libre de fácil disponibilidad. A medida que la deshidratación avanza el contenido de humedad disminuye y por consiguiente la capacidad del alimento de interactuar con las microondas disminuye considerablemente. En el caso del factor de pérdida dieléctrica este descenso brusco ocurre cuando la humedad disminuye por debajo del 70%. Este importante descenso en el factor de pérdida dieléctrica continua hasta el 23% de humedad, a partir del cual la disminución de la humedad hace que el valor de  $\epsilon''$  decrezca lentamente.

## 2.2. Modelado del Proceso

En esta sección se abordará el modelo de los procesos de deshidratación osmótica y microondas. En el caso del modelado de la deshidratación osmótica se presentan 3 modelos con diferentes enfoques y niveles de complejidad. Para la segunda etapa del proceso combinado de deshidratación se presentará el modelo de deshidratación aplicando microondas, en la cual se plantearán los balances de energía y masa involucrados, incluyendo un término de generación interna de calor que da cuenta del calentamiento volumétrico proveniente de la interacción con las microondas.

### 2.2.1. Modelado de la Deshidratación Osmótica (DO)

#### 2.2.1.1. Modelado Empírico

Los modelos empíricos (Parjoko y col., 1996; Palou y col., 1994 y Azuara y col., 1992) establecen una relación directa entre las variables cinéticas de pérdida de agua, ganancia de sólidos y el tiempo de procesamiento con el objetivo de obtener coeficientes o parámetros que sirven para la interpretación del proceso físico.

##### 2.2.1.1.1. Modelo de Azuara

Azuara y col. (1992) modelaron la velocidad de pérdida de agua y ganancia de sólidos como función del tiempo usando un balance de masa basado en el movimiento de agua dentro de alimento, obteniendo ecuaciones con dos parámetros ajustables. En la formulación del modelo las siguientes relaciones para la pérdida de agua y ganancia de sólidos son establecidas:

$$WL_t = \frac{S_1 t WL_\infty}{1 + S_1 t} \quad (19)$$

donde  $WL_\infty$  es la cantidad correspondiente al tiempo infinito y  $S_1$  es la constante relativa a la velocidad de difusión de agua del alimento, reordenando:

$$\frac{t}{WL_t} = \frac{1}{WL_\infty} t + \frac{1}{S_1 WL_\infty} \quad (20)$$

La pérdida de agua en el equilibrio ( $WL_\infty$ ) y la constante  $S_1$  pueden ser estimadas a partir de la pendiente y la ordenada al origen de la recta ( $t/WL_t$ ) versus  $t$  utilizando la Ec. 20. De igual manera las ecuaciones para la ganancia de sólidos pueden ser escritas como:

$$SG_t = \frac{S_2 t SG_\infty}{1 + S_2 t} \quad (21)$$

$$\frac{t}{SG_t} = \frac{1}{SG_\infty} t + \frac{1}{S_2 SG_\infty} \quad (22)$$

donde  $SG_\infty$  es la correspondiente a la cantidad en el tiempo infinito y  $S_2$  es la constante relativa a la velocidad de difusión de soluto entrante al alimento ( $\text{min}^{-1}$ ). De la manera análoga a  $WL_\infty$  y  $S_1$  se pueden obtener los parámetros  $SG_\infty$  y  $S_2$  a partir de la recta  $(t/SG_t)$  versus  $t$ .

### 2.2.1.2. Modelado Osmótico-Difusional Celular (MODC)

Para modelar la deshidratación osmótica, primera etapa del proceso, se puede utilizar el modelo osmótico-difusional de Spiazzi y Mascheroni (1997). Para obtener los perfiles de concentración, el volumen que representa el producto se divide en  $N$  elementos concéntricos de igual volumen. En cada elemento pueden distinguirse dos fases: la fase del contenido plasmático celular y la correspondiente a los espacios intercelulares. Cada volumen del espacio intercelular está sujeto a un flujo difusivo-convectivo entre los volúmenes adyacentes y un flujo transmembrana difusivo desde el plasma celular.

Los balances de masa y los flujos para el elemento de volumen  $V_\xi$  ( $\xi=1,N$ ) se presentan a continuación.

Volumen Celular

$$\frac{d(M_{jc})}{dt} = -n_{jc} A_c \quad \text{Balance de masa celular} \quad (23)$$

$$n_{jc} = kw_c \Delta(c_j)_{c-o} \quad \text{Flujo Celular} \quad (24)$$

Volumen Intercelular

$$\frac{d(M_{jo})}{dt} = \nabla(n_{jo} A_o)_z + n_{jc} A_c \quad \text{Balance de masa intercelular} \quad (25)$$

$$n_{jo} = D_j \cdot \nabla(c_{jo})_z + c_{jo} u \quad \text{Flujo Intercelular} \quad (26)$$

donde  $M$ ,  $n$ ,  $c$  son la masa, flujo y concentración de la especie  $j$  respectivamente. Los subíndices  $c$  y  $o$  indican intra o extracelular;  $D$  y  $kw$  son el coeficiente de difusión aparente de la especie  $j$  y el coeficiente de transferencia de masa, respectivamente;  $A_c$  y  $A_o$  son las áreas de transferencia celular y extracelular (estas dependen de las constantes  $N_{cp}$  y  $Cg$  que son función de la forma y del número de células, de las fracciones de volumen celular y extracelular y de la forma del producto) y  $z$  representa la distancia entre cada elemento  $V_\xi$ . El término  $\Delta(c_j)_{c-o}$  indica la diferencia de concentración del componente  $j$  entre los espacios celulares y extracelulares y  $\nabla(c_{j,o})_z$  es el gradiente de concentración del componente  $j$  entre volúmenes adyacentes.

En este modelo se tiene en cuenta la velocidad de encogimiento  $u$  que se calcula a partir de la siguiente relación:

$$u = \frac{dx}{dt} \quad (27)$$

Los perfiles de concentración en la solución osmótica se deducen de los balances de masa totales:

$$\sum_{\xi=1}^N \frac{d(M_{j,o}^\xi)}{dt} = - \frac{d(M_{j,sol}^{osm})}{dt} \quad (28)$$

donde  $M_{j,sol}^{osm}$  corresponde a la masa del componente  $j$  dentro de la solución osmótica.

### 2.2.1.3. Modelado Difusional de Flujo Contracorriente (MDFC)

Otro modelo para obtener los perfiles de concentración de humedad y sólidos solubles es la aplicación de la segunda ley de Fick en estado transitorio; el alimento puede ser considerado como un sistema homogéneo consistente en una matriz sólida donde el agua y los sólidos difunden a través de ella. Durante la deshidratación osmótica se establecen dos flujos simultáneos y en contra corriente. Uno de agua desde el alimento hacia la solución osmótica y otro de sólidos solubles desde la solución osmótica hacia el interior del alimento. Además las siguientes consideraciones deben ser tenidas en cuenta con el fin de resolver el modelo:

- Transferencia de masa unidimensional (1D),
- Contenido de agua y sólidos solubles inicial uniforme en todo el alimento,

- Difusividad dependiente de la concentración de soluto,
- Proceso isotérmico ( $T_{OD}=cte.$ ),
- Concentración en la superficie de la fruta se considera en equilibrio con solución osmótica.
- Encogimiento despreciable.

Para describir la transferencia de masa, los balances microscópicos de masa para el agua y los sólidos solubles deben ser planteados, con este propósito se utiliza la segunda ley de Fick en estado transitorio:

$$\frac{\partial C_w}{\partial t} = \nabla(D_{w-s} \nabla C_w) \quad (29)$$

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = \nabla(D_{w-s} \nabla C_s) \quad (30)$$

donde  $C_w$ ,  $C_s$  son la concentración de agua y sólidos solubles, respectivamente,  $t$  representa el tiempo y  $D_{w-s}$  es el coeficiente de difusión binario ( $m^2 s^{-1}$ ) que depende del agua saliente y del azúcar entrante.

Condiciones iniciales y de contorno deben ser consideradas para completar la formulación del modelo:

$$t = 0 \quad C_w = C_{w,ini} \quad ; \quad C_s = C_{s,ini} \quad 0 \leq x \leq 2L \quad (31)$$

$$x = 0, 2L \quad C_w = C_{w,equi} \quad ; \quad C_s = C_{s,equi} \quad t > 0 \quad (32)$$

donde  $C_{w,equi}$ ,  $C_{s,equi}$  son la concentración de equilibrio de agua y sólidos solubles, respectivamente y  $0$  y  $2L$  corresponde a ambos lados de la placa que corresponde al alimento.

El coeficiente de difusión binario ( $D_{w-s}$ ) puede ser calculado como función de la concentración de agua y sólidos simultáneamente usando la ecuación de Stokes-Einstein (Floury y col., 2008):

$$D_{w-s} = \frac{k_B T_{DO}}{6 \pi r_B \mu_m} \quad (33)$$

donde  $\mu_m$  corresponde a la viscosidad de la solución binaria,  $k_B$  es la constante de Boltzmann,  $r_B$  es el radio hidrodinámico aparente del soluto y  $T_{DO}$  es la temperatura absoluta del producto ( $^{\circ}K$ ).

La viscosidad de la solución puede ser calculada a través de la siguiente expresión (Chenlo y col., 2002):

$$\mu_m = \frac{(995 + 0.1284 c'_s) * \mu_w}{\rho_w} \left( 1 + 0.73 \frac{c'_s}{995 + 0.1284 c'_s} \exp \left( \frac{\left( \frac{c'_s}{995 + 0.1284 c'_s} \right)^{1.1}}{8.345 (T_{DO} / 273.16) - 7.402} \right) \right) \quad (34)$$

donde  $\mu_w$  es la viscosidad del agua (Pa s),  $\rho_w$  es la densidad del agua ( $\text{kg m}^{-3}$ ) y  $c'_s$  corresponde a la concentración molar de los sólidos solubles ( $\text{mol m}^{-3}$ ).

## 2.2.2. Modelado de la Deshidratación con Microondas con propiedades globales

Un modelo matemático completo para el modelado de la deshidratación con microondas debe permitir resolver la transferencia de masa y calor simultáneamente. Las siguientes consideraciones han sido realizadas para el desarrollo del modelo:

- 1- Temperatura y contenido de agua inicial uniformes dentro del producto,
- 2- Propiedades térmicas, dieléctricas, y de transporte dependientes de la temperatura y del contenido de humedad,
- 3- Tamaño constante (sin cambios de volumen),
- 4- Condiciones de contorno convectivas,
- 5- Geometría regular unidimensional (placa plana),
- 6- Distribución uniforme del campo eléctrico alrededor de la muestra, y una polarización dominante del campo eléctrico normal hacia la superficie.

El proceso de deshidratación comienza con el alimento a temperaturas menores que la de vaporización; además el modelo debe considerar la pérdida de peso durante la etapa de calentamiento inicial. En consecuencia, el análisis está dividido en dos etapas: una primera etapa de calentamiento con vaporización leve y una segunda etapa de vaporización intensa. El mismo procedimiento fue aplicado por otros autores (Boldor y col., 2005).

### 2.2.2.1. Modelado de la Etapa de Calentamiento con Vaporización Leve

- **Transferencia de energía:** Incluye el calentamiento del alimento hasta que el producto alcanza la temperatura de equilibrio  $T_{equi}$ . En esta etapa se plantea el balance microscópico de energía considerando un término de generación interna debido a la energía suministrada por las microondas (Lin y col., 1995). El balance microscópico resultante es el siguiente:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + Q \quad (35)$$

donde  $\rho$  es la densidad,  $C_p$  capacidad calorífica específica,  $T$  temperatura,  $t$  tiempo,  $k$  conductividad térmica y  $Q$  ( $\text{W}/\text{m}^3$ ) representa la generación volumétrica de calor. En términos de potencia, la Ec. 35 puede ser escrita como (Campañone y Zaritzky, 2005):

$$V\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = V(\nabla k \nabla T) + P \quad (36)$$

donde  $V$  es el volumen del producto ( $\text{m}^3$ ) y  $P$  es la potencia generada por la absorción de microondas ( $\text{W}$ ).

En este balance, las propiedades físicas corresponden al alimento fresco. Para completar el modelo, se plantean las siguientes condiciones iniciales y de contorno:

$$t = 0 \quad T = T_{ini} \quad 0 \leq x \leq 2L \quad (37)$$

$$x = 0, 2L \quad \pm k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_a) + L_{vap} k_m (C_w - C_{equi}) \quad t > 0 \quad (38)$$

donde  $L$  es el semiespesor de la placa,  $T_{ini}$  la temperatura inicial,  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor,  $T_a$  la temperatura ambiente,  $L_{vap}$  es el calor de vaporización del agua,  $k_m$  es el coeficiente de transferencia de masa,  $C_w$  y  $C_{equi}$  son las concentraciones de agua y de equilibrio. La Ec. 38 incluye la vaporización en la superficie del alimento, esta suposición es válida sólo para la etapa de calentamiento porque el tiempo de exposición es corto y la temperatura del producto se encuentra por debajo de  $T_{equi}$ . En esta etapa, se asume que ocurre una vaporización leve y la Ec. 38 puede ser aplicada. Otros autores usaron estas condiciones de contorno en el proceso de calentamiento por microondas, en el modelado de la etapa inicial de calentamiento (Tong y Lund, 1993; Zhou y col., 1995; Pauli y col., 2007). Se consideró un valor de coeficiente de transferencia de energía de  $5 \text{ (W m}^{-2}\text{C}^{-1}\text{)}$  correspondiente a convección natural alrededor del producto (Bird y col., 1976). Se consideró analogía en los factores de Chilton y Colburn para la transferencia de calor y masa  $J_H = J_D$  permitiendo estimar  $k_m$  a partir de los valores de  $h$  (Bird y col., 1976).

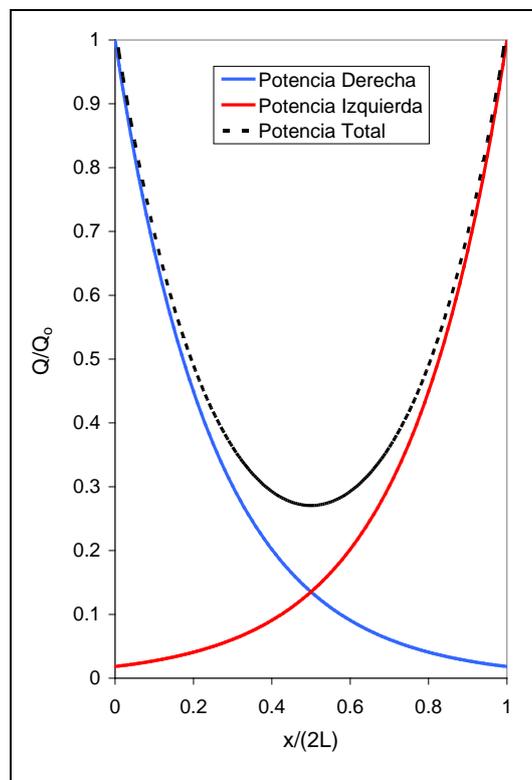
La potencia absorbida durante la irradiación con microondas por ambos lados (Figura 5) y convertida en energía térmica es representada por el término  $P$ . La generación de calor es una función de la temperatura en cada punto interno del material (a frecuencia fija). En este trabajo se considera válida la Ley de Lambert, por consiguiente la potencia absorbida se calcula como:

$$P = P_{De+Iz} = P'_o(e^{-2\alpha(L-x)} + e^{-2\alpha(x)}) \quad (39)$$

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\varepsilon' [(1 + \tan^2 \delta)^{1/2} - 1]}{2}} \quad (40)$$

$$\delta = \tan^{-1}(\varepsilon'' / \varepsilon') \quad (41)$$

donde  $P'_o$  es la potencia incidente en cada cara expuesta (W),  $De$  y  $Iz$  representan el sentido de la onda incidente, derecha e izquierda respectivamente,  $\lambda$  es la longitud de onda de la radiación y  $\alpha$  es el factor de atenuación, que es función de la constante dieléctrica  $\varepsilon'$  y del factor de pérdida  $\varepsilon''$ .



**Figura 5.** Potencia Absorbida Total (adimensional) en toda la profundidad del alimento proveniente de los aportes de las ondas de ambos lados del material.

- **Transferencia de masa:** Para predecir el perfil de humedad durante el calentamiento (primera etapa) se plantea el balance microscópico de masa, en el cual se considera una transferencia de humedad por difusión en el interior del alimento. El balance es el siguiente:

$$\frac{\partial C_w}{\partial t} = \nabla(D_w \nabla C_w) \quad (42)$$

Las siguientes condiciones iniciales y de contorno son consideradas:

$$t = 0 \quad C_w = C_{w,ini} \quad 0 \leq x \leq 2L \quad (43)$$

$$x = 0, 2L \quad \pm D_w \frac{\partial C_w}{\partial x} = k_m (C_w - C_{equi}) \quad t > 0 \quad (44)$$

donde  $C_{w,ini}$  es la concentración inicial de agua y  $D_w$  es el coeficiente de difusión para el agua.

### 2.2.2.2. Modelado de la Etapa de Temperatura Constante con Vaporización Intensa

Cuando la temperatura de todo el producto alcanza  $T_{equi}$ , comienza la vaporización intensa. Esta etapa finaliza cuando se termina el período de temperatura constante, a menos que haya algún requerimiento de seguir calentando el alimento luego de ser deshidratado.

- **Transferencia de energía:** En esta etapa la temperatura se supone igual al valor de equilibrio dentro del alimento  $T_{equi}$  (temperatura alcanzada cuando la potencia absorbida se equilibra con la energía consumida en la vaporización):

$$0 \leq x \leq 2L \quad T = T_{equi} \quad (45)$$

La Ley de Lambert fue aplicada para evaluar la distribución de la energía electromagnética dentro del alimento. La siguiente ecuación fue considerada:

$$P = P_{De+Iz} = P_o' (e^{-2\alpha_d(L-x)} + e^{-2\alpha_d(x)}) \quad (46)$$

donde  $\alpha_d$  es el factor de atenuación calculado a partir de las propiedades dieléctricas del producto parcialmente deshidratado.

El modelo tiene en cuenta la aplicación continua e intermitente de la potencia de microondas considerando nula la potencia de las microondas incidentes cuando el magnetrón se encuentra apagado en un modo cíclico de operación.

- **Transferencia de masa:** la vaporización ocurre volumétricamente dentro del producto. La velocidad de vaporización es calculada considerando que toda la potencia generada por las microondas es utilizada para la remoción del agua:

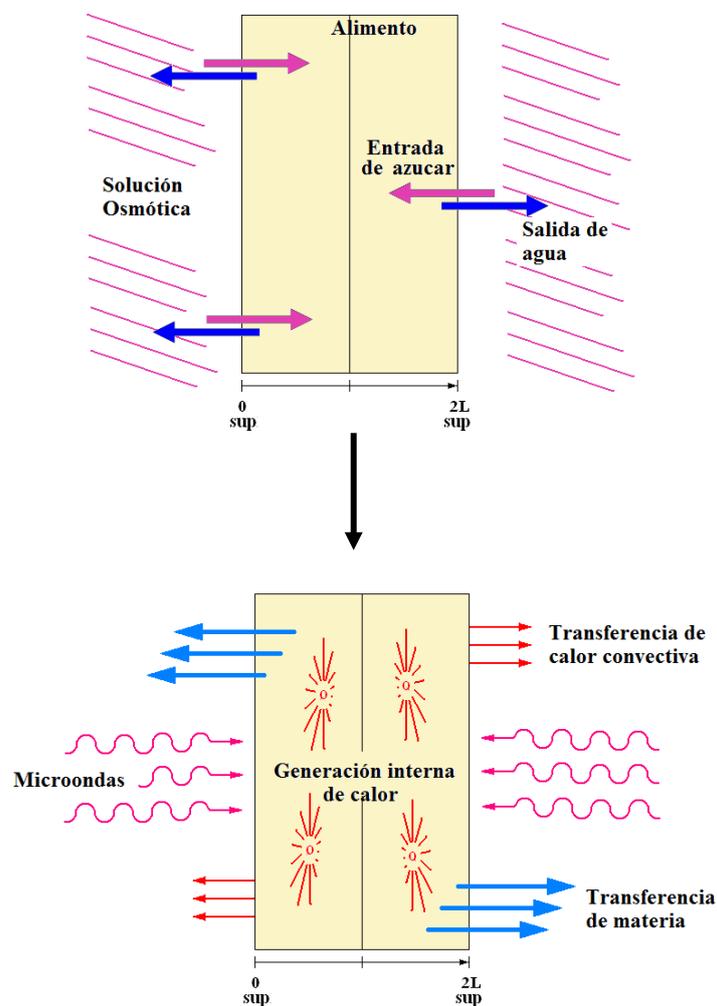
$$m_v L_{vap} = \int_0^V Q dV \quad (47)$$

donde  $m_v$  es la tasa de vaporización de agua ( $\text{kg s}^{-1}$ ).

### 2.2.3. Modelado de la Deshidratación Combinada (DO-DMO)

Con el propósito de modelar el proceso combinado de deshidratación osmótica (DO) seguida de la deshidratación con microondas (DMO) fue desarrollado un modelo completo y equilibrado para la predicción de evolución de la pérdida de humedad durante el proceso. En consecuencia, el alimento es considerado como un sistema homogéneo compuesto por una matriz sólida y un cierto número de componentes que difunden en su interior.

En la Figura 6 se muestran los mecanismos de transferencia de masa y energía considerados en la formulación del modelo matemático.



**Figura 6.** Esquema del producto (1D) y los mecanismos de transferencia de masa y energía durante la deshidratación combinada osmótica-microondas de frutas y hortalizas.

En el desarrollo del modelo matemático, dos etapas fundamentales han sido consideradas: el proceso de deshidratación osmótica y la aplicación de microondas como etapa final del secado.

### *2.2.3.1. Primera etapa: modelado de la deshidratación osmótica con coeficiente de difusión variable con la temperatura y el contenido de agua y sólidos solubles del alimento.*

Para obtener los perfiles de concentración de humedad a partir de la segunda ley de Fick en estado transitorio, el alimento puede ser considerado como un sistema homogéneo consistente en una matriz sólida donde el agua y los sólidos difunden a través de ella. Durante la deshidratación osmótica se establecen dos flujos simultáneos y en contra corriente. Uno de agua desde el alimento hacia la solución osmótica y otro de sólidos solubles desde la solución osmótica hacia el interior del alimento. En esta etapa será utilizado el modelo difusional en flujo contracorriente (MDFC) desarrollado previamente en la sección 2.2.1.3.

### *2.2.3.2. Segunda etapa: modelado de la deshidratación con microondas considerando propiedades globales variables con la temperatura, humedad y contenido de sólidos solubles del alimento.*

Los valores finales obtenidos en las simulaciones utilizando el modelo difusión para la deshidratación osmótica serán utilizados como valores iniciales para el modelado de la segunda etapa de deshidratación. Esta segunda etapa de la deshidratación combinada (deshidratación con microondas), se modelará utilizando la formulación desarrollada en la sección 2.2.2. Dicha sección presenta el enfoque del modelo de la deshidratación con microondas considerando dos subetapas, una etapa de calentamiento con vaporización leve y una etapa final de intensa vaporización que fueron modeladas separadamente.

## 2.3. Resolución numérica

En esta sección se presentan las resoluciones numéricas de 3 de los modelos desarrollados. Se utilizarán 2 técnicas numéricas. En la aplicación del modelo osmótico-difusional celular (MODC), se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias acopladas, que se resuelve empleando el Método de Runge-Kutta de cuarto orden. En el caso de los modelos difusional en frujo contracorriente (MDFC) y el modelo para la deshidratación con microondas (MDMO), se utilizarán dos alternativas del método de las diferencias finitas, por tratarse de sistemas de ecuaciones diferenciales parciales acopladas, altamente no lineales.

### 2.3.1. Resolución del Modelo Osmótico-Difusional Celular (MODC) para la Deshidratación Osmótica

Planteando las ecuaciones para el agua ( $j = w$ ) y para el soluto ( $j = s$ ) se llega a un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias ( $2N$  ecuaciones para el agua y  $N$  ecuaciones para la sacarosa) que se resuelve a través del método de Runge Kutta de 4° orden programado en MATLAB® 7.2. (Mathworks). El dominio fue dividido en 10 elementos de volumen y fueron planteadas las Ecs. 48-66 para la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias para cada volumen. Para cada incremento de tiempo ( $\Delta t$ ) se obtienen:

Volumen Celular

---

$$\frac{d(M_{jc}^{\xi})}{dt} = \frac{d(c_j V_c^{\xi})}{dt} = f(t, c_j) \quad (48)$$

$$f(t, c_{jc}) = -(kw_c (\Delta c_j^{\xi})_{c,o}) \cdot A_c^{\xi} \quad (49)$$

$$(\Delta c_j^{\xi})_{c,o} = (c_{jc}^{\xi} - c_{jo}^{\xi}) \quad (50)$$

$$k_{RK1}^{\xi} = f(t, c_j^{\xi}) \quad (51)$$

$$k_{RK2}^{\xi} = f(t + \Delta t / 2, c_j^{\xi} + k_{RK1}^{\xi} \Delta t / 2) \quad (52)$$

$$k_{RK3}^{\xi} = f(t + \Delta t / 2, c_j^{\xi} + k_{RK2}^{\xi} \Delta t / 2) \quad (53)$$

$$k_{RK4}^{\xi} = f(t + \Delta t, c_j^{\xi} + k_{RK3}^{\xi} \Delta t) \quad (54)$$

$$k_{RKT}^{\xi} = 1/6(k_{RK1}^{\xi} + 2k_{RK2}^{\xi} + 2k_{RK3}^{\xi} + k_{RK4}^{\xi}) \quad (55)$$

$$M_{j_c, t+\Delta t}^{\xi} = M_{j_c, t}^{\xi} + k_{RKT}^{\xi} \cdot \Delta t \quad (56)$$

### Volumen Intercelular

---

$$\frac{d(M_{j_o}^{\xi})}{dt} = \frac{d(c_{j_o} V_o^{\xi})}{dt} = g(t, c_{j_o}) \quad (57)$$

$$g(t, c_{j_o}) = \Delta \left[ (D_j \cdot \nabla (c_{j_o}^{\xi})_{c,o} + c_{j_o}^{\xi} u^{\xi}) A_o^{\xi} \right]^{\xi, \xi+1} + (k w_c (\Delta c_j^{\xi})_{c,o}) A_c^{\xi} \quad (58)$$

$$\nabla (c_{j_o}^{\xi})_{c,o} = \frac{(c_{j_o}^{\xi+1} - c_{j_o}^{\xi})}{\Delta x^{\xi}} \quad (59)$$

$$u^{\xi} = \frac{x^{\xi+1} - x^{\xi}}{dt} \quad (60)$$

$$m_{RK1}^{\xi} = g(t, c_{j_o}^{\xi}) \quad (61)$$

$$m_{RK2}^{\xi} = g(t + \Delta t / 2, c_{j_o}^{\xi} + m_{RK1}^{\xi} \Delta t / 2) \quad (62)$$

$$m_{RK3}^{\xi} = g(t + \Delta t / 2, c_{j_o}^{\xi} + m_{RK2}^{\xi} \Delta t / 2) \quad (63)$$

$$m_{RK4}^{\xi} = g(t + \Delta t, c_{j_o}^{\xi} + m_{RK3}^{\xi} \Delta t) \quad (64)$$

$$m_{RKT}^{\xi} = 1/6(m_{RK1}^{\xi} + 2m_{RK2}^{\xi} + 2m_{RK3}^{\xi} + m_{RK4}^{\xi}) \quad (65)$$

$$M_{j_o, t+\Delta t}^{\xi} = M_{j_o, t}^{\xi} + m_{RKT}^{\xi} \cdot \Delta t \quad (66)$$

donde  $\Delta t$  es el incremento de tiempo (0.1s para todas las corridas),  $f(t, c_{j_c})$  y  $g(t, c_{j_o})$  corresponden a la variación de la masa con respecto al tiempo del componente  $j$ , dentro de la célula ( $c$ ) y entre espacios intercelulares adyacentes ( $o$ );  $M_{j_c, t+\Delta t}^{\xi}$  y  $M_{j_o, t+\Delta t}^{\xi}$  son los valores de la masa de agua o sólidos al tiempo  $t+\Delta t$ , en el volumen celular y extracelular, respectivamente;  $k_{RK}$  y  $m_{RK}$  son los coeficientes del método de Runge Kutta (Constantinides y Mostoufi, 1999; Chapra y Canale, 2007).

### 2.3.2. Resolución del Modelo Difusional en Flujo Contracorriente (MDFC) para la Deshidratación Osmótica

Para la solución del modelo difusional en flujo contracorriente, los balances de masa para el agua y la sacarosa con sus respectivas condiciones iniciales y de contorno forman un sistema de ecuaciones diferenciales parciales no-lineales las cuales fueron resueltas a través de un esquema implícito del método de diferencias finitas. En las simulaciones, se empleó un incremento temporal de 200s y el dominio fue dividido en 15 incrementos espaciales.

A continuación se muestran las ecuaciones correspondientes a la discretización de los puntos interiores para el cálculo de las concentraciones de agua y sólidos solubles ( $C_w$  y  $C_s$ ):

$$C_{wi-1}^{n+1} \left( -\frac{\Delta t(D_{i+1}^n - D_{i-1}^n)}{\Delta x^2} + \frac{\Delta t(D_{i+1}^n - D_{i-1}^n)}{4\Delta x^2} \right) + C_{wi}^{n+1} \left( 1 + \frac{2\Delta t(D_{i+1}^n - D_{i-1}^n)}{\Delta x^2} \right) + C_{wi+1}^{n+1} \left( -\frac{\Delta t(D_{i+1}^n - D_{i-1}^n)}{\Delta x^2} - \frac{\Delta t(D_{i+1}^n - D_{i-1}^n)}{4\Delta x^2} \right) = C_{wi}^n \quad (67)$$

$$C_{si-1}^{n+1} \left( -\frac{\Delta t(D_{i+1}^n - D_{i-1}^n)}{\Delta x^2} + \frac{\Delta t(D_{i+1}^n - D_{i-1}^n)}{4\Delta x^2} \right) + C_{si}^{n+1} \left( 1 + \frac{2\Delta t(D_{i+1}^n - D_{i-1}^n)}{\Delta x^2} \right) + C_{si+1}^{n+1} \left( -\frac{\Delta t(D_{i+1}^n - D_{i-1}^n)}{\Delta x^2} - \frac{\Delta t(D_{i+1}^n - D_{i-1}^n)}{4\Delta x^2} \right) = C_{si}^n \quad (68)$$

El cálculo del coeficiente de difusión se incorporó como una función de las concentraciones de agua y sólidos solubles evaluados al tiempo  $n$  y las diferentes posiciones dentro del alimento:

$$D_i^n = \frac{k_B T_{DO}}{6\pi r_B \mu_{mi}^n (Cw_i^n, Cs_i^n)} \quad (69)$$

En la superficie de la placa la concentración de agua y sólidos solubles se considera prescripta, asumiendo que la concentración de agua y sólidos solubles se encuentra en equilibrio ( $C_{equi}$ ) con la solución osmótica circundante:

$$C_{wI}^n = C_{wequi} \quad (70)$$

$$C_{sI}^n = C_{sequi} \quad (71)$$

De esta manera se construye la matriz de coeficientes y un vector de términos independientes, los cuales a su vez forman junto con el vector de las incógnitas un sistema de ecuaciones lineales que fue resuelto por el método de eliminación de Gauss.

### 2.3.3. Resolución del Modelo Deshidratación por Microondas

Los balances de energía y de masa en la primera etapa de deshidratación con microondas (DMO) se encuentran acoplados y dichos balances con sus respectivas condiciones de contorno conforman un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales. Por las características del sistema se empleó para la resolución el método de Diferencias Finitas Implícito Crank-Nicolson que se caracteriza por ser incondicionalmente estable y convergente. En la segunda etapa de DMO, el contenido de humedad fue calculado para cada paso de tiempo usando la Ec. 42.

Un método de diferencias finitas desarrollado previamente por Campañone y col. (2001) fue utilizado para resolver la transferencia de energía unidireccional. Se empleó un incremento temporal de 0.1 s y se dividió el dominio en 15 incrementos espaciales. A continuación se muestran las ecuaciones correspondientes a la discretización de los puntos interiores y la superficie para obtener los perfiles de temperatura.

$$\begin{aligned}
 & T_{i+1}^{n+1} \left( -\frac{V_i k_i^n}{2\Delta x^2} - \frac{V_i (k_{i+1}^n - k_{i-1}^n)}{8\Delta x^2} \right) + T_i^{n+1} \left( \frac{V_i \rho_i^n C p_i^n}{\Delta t} + \frac{V_i k_i^n}{\Delta x^2} \right) + \\
 & + T_{i-1}^{n+1} \left( \frac{-V_i k_i^n}{2\Delta x^2} + \frac{V_i (k_{i+1}^n - k_{i-1}^n)}{8\Delta x^2} \right) = T_{i+1}^n \left( \frac{V_i k_i^n}{2\Delta x^2} + \frac{V_i (k_{i+1}^n - k_{i-1}^n)}{8\Delta x^2} \right) + \\
 & + T_i^n \left( \frac{V_i \rho_i^n C p_i^n}{\Delta t} - \frac{V_i k_i^n}{\Delta x^2} \right) + T_{i-1}^n \left( \frac{V_i k_i^n}{2\Delta x^2} - \frac{V_i (k_{i+1}^n - k_{i-1}^n)}{8\Delta x^2} \right) + P_i
 \end{aligned} \tag{72}$$

Esta ecuación es válida para  $1 < i < b$  siendo  $b$  el número de nodos en que fue dividido el dominio.  $V_i$  es el volumen de un elemento ubicado entre los nodos  $(i+1/2)$  y  $(i-1/2)$ , mientras  $P_i$  es la potencia calculada en los mismos nodos:

$$P_i = P_o \frac{A_{inc}}{A_t} \left[ e^{-2\alpha(L-(i+1/2)\Delta x)} - e^{-2\alpha(L-(i-1/2)\Delta x)} \right] \tag{73}$$

En la superficie del alimento ( $i=b$ ), la Ec. 72 presenta dos puntos ficticios  $(i+1, n)$  e  $(i+1, n+1)$ .

Para obtenerlos, las condiciones de borde fueron utilizadas discretizándolas; por consiguiente las siguientes ecuaciones son válidas para el borde:

$$T_{i+1}^{n,f} = T_{i-1}^n - \frac{2\Delta x}{k_i^n} h T_i^n + \frac{2\Delta x}{k_i^n} h T_a - \frac{2\Delta x}{k_i^n} L_{vap} k_m (C_{wi}^n - C_{equi}) \tag{74}$$

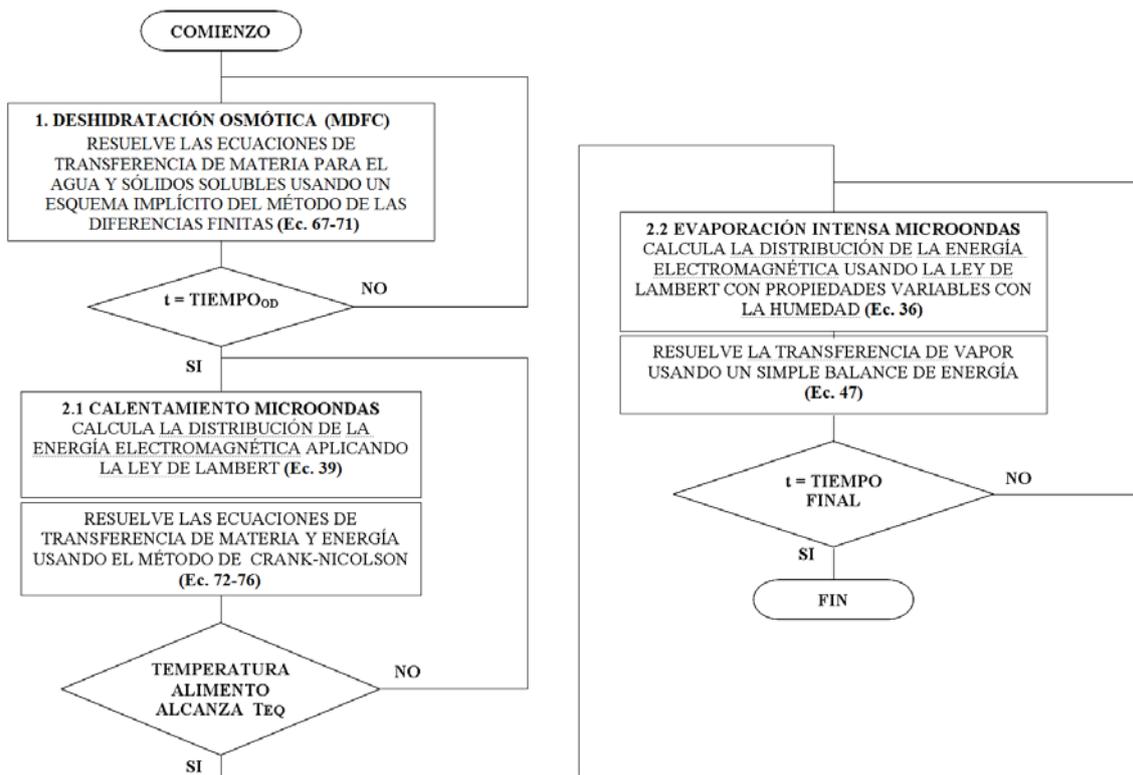
$$T_{i+1}^{n+1,f} = T_{i-1}^{n+1} - \frac{2\Delta x}{k_i^n} h T_i^{n+1} + \frac{2\Delta x}{k_i^n} h T_a - \frac{2\Delta x}{k_i^n} L_{vap} k_m (C_{wi}^n - C_{equi}) \quad (75)$$

A través de reemplazar las Ecs. 74 y 75 en la expresión general Ec. 72, la ecuación de la predicción de temperatura para la superficie del alimento fue obtenida:

$$\begin{aligned} & T_b^{n+1} \left( \frac{V_b \rho_b^n C p_b^n}{\Delta t} + \frac{V_b k_b^n}{\Delta x^2} + \frac{2V_b h \Delta x}{k_b^n} \left( \frac{k_b^n}{2\Delta x^2} + \frac{k_{b+1}^n - k_{b-1}^n}{8\Delta x^2} \right) \right) + \\ & + T_{b-1}^{n+1} \left( \frac{-V_b k_b^n}{\Delta x^2} \right) = T_b^n \left( \frac{V_b \rho_b^n C p_b^n}{\Delta t} - \frac{V_b k_b^n}{\Delta x^2} + \frac{2V_b h \Delta x}{k_b^n} \left( -\frac{k_b^n}{2\Delta x^2} - \frac{k_{b+1}^n - k_{b-1}^n}{8\Delta x^2} \right) \right) + \\ & + T_{b-1}^n \left( \frac{V_b k_b^n}{\Delta x^2} \right) + \frac{4V_b h \Delta x T_a}{k_b^n} \left( \frac{k_b^n}{2\Delta x^2} + \frac{k_{b+1}^n - k_{b-1}^n}{8\Delta x^2} \right) + P_b \\ & + \frac{4V_b \Delta x}{k_b^n} L_{vap} k_m (C_{wi}^n - C_{equi}) \left( \frac{k_b^n}{2\Delta x^2} + \frac{k_{b+1}^n - k_{b-1}^n}{8\Delta x^2} \right) \end{aligned} \quad (76)$$

Las Ecs. 72, 76 y la Ec. 76 modificada para el otro borde forman un sistema de ecuaciones lineales a partir de las cuales las temperaturas interiores y superficiales fueron determinadas. El mismo procedimiento matemático se utilizó para resolver el balance microscópico de masa.

Un esquema del algoritmo de resolución del proceso combinado se muestra en la Figura 7. La resolución del sistema de ecuaciones para el cálculo de las temperaturas y humedad se programó en Matlab® 7.2 (Mathworks).



**Figura 7.** Diagrama de bloques del algoritmo para la solución del modelo combinado completo de deshidratación osmótica-microondas.

# Capítulo 3

## Técnicas

## Experimentales

## Capítulo 3 Técnicas Experimentales

### 3.1. Experimentos de Deshidratación Osmótica

#### 3.1.1 Deshidratación osmótica.

##### *3.1.1.1. Deshidratación osmótica aplicada a medias rodajas de pera y kiwi, y rodajas de calabacita.<sup>1</sup>*

Con el propósito de evaluar las cinéticas de deshidratación osmótica considerando productos con diferentes estructuras, ciertas frutas y hortalizas fueron seleccionadas para la deshidratación (pera, calabacita y kiwi) y procesadas separadamente. Las frutas fueron lavadas con agua destilada para remover la suciedad superficial. Luego fueron peladas manualmente y cortadas en discos de 10mm de espesor, con diámetros de 35mm para calabacita y 50 y 60mm para kiwi y pera, respectivamente; en el caso de kiwi y pera se trabajó con medias rodajas. Las muestras obtenidas fueron pesadas e introducidas en vasos de precipitado de 2L conteniendo solución osmótica. Los vasos a su vez fueron colocados en un agitador que opera a temperatura constante (modelo TT400, marca FERCA), (Imagen 1) y a constante agitación de 100rpm. La relación solución/alimento fue igual o mayor que 10, con valores de 13/1 para pera y 10/1 para calabacita y kiwi, asegurando de esa manera concentración constante de la solución osmótica durante todo el proceso. La deshidratación osmótica se llevó a cabo a temperatura constante de 30°C durante un cierto número de intervalos de tiempo hasta las 24h. Después de que cada tiempo de deshidratación hubo transcurrido (0.5, 1, 2, 4, 8, 16 y 24 h para calabacita y kiwi, y 0.5, 1, 2, 4, 12 y 24 h para pera) las muestras fueron secadas, colocadas en papel absorbente, para remover el exceso de solución y ubicadas en recipientes especiales para la determinación de peso total, sólidos totales y sólidos solubles.

##### *3.1.1.2. Deshidratación osmótica aplicada a rodajas de pera*

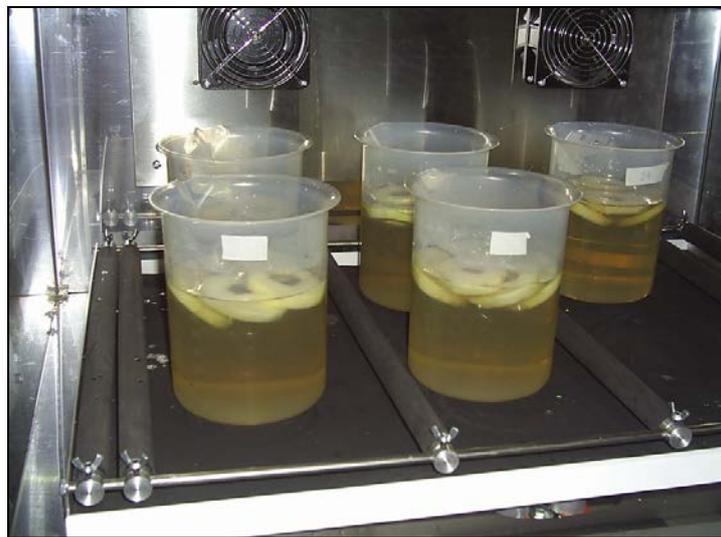
Con el fin de validar los modelos de deshidratación osmótica (MODC y MDFC) con productos que incorporen distintos contenido de azúcar, se emplearon rodajas de pera (var. *Packham's Triumph*) deshidratadas osmóticamente con soluciones de diferentes concentraciones. Las frutas

---

<sup>1</sup> Estos experimentos fueron realizados en forma conjunta con la Lic. Ruth Bambicha.

fueron cortadas manualmente en rodajas de 15mm de espesor, con cuchillo de acero inoxidable. Las concentraciones de sacarosa empleadas en las pruebas fueron 20, 40 y 60 °Brix ( $\text{g}_{\text{sacarosa}}/\text{100g}_{\text{solución}}$ ). La relación muestra:solución utilizada fue 1:13 (p/p), con el mismo propósito que se explicó en la sección anterior. Los ensayos de deshidratación osmótica fueron realizados en un agitador de la Imagen 1 durante 2 horas.

A las muestras deshidratadas se les determinó el contenido de azúcar y la humedad, valores iniciales para el proceso de deshidratación con microondas.



**Imagen 1.** Equipo para la deshidratación osmótica con agitación y temperatura configurables.

### 3.1.2. Determinación de humedad, pérdida de peso y contenido de sólidos solubles.

Las muestras fueron pesadas al inicio y al final de cada corrida y luego para la determinación de sólidos totales fueron secadas en estufa de vacío a 70°C (A.O.A.C, 2000) hasta obtener peso constante. Con la información del peso inicial y final y las medidas de sólidos totales se calcula la humedad inicial y a diferentes tiempos de procesamiento. Todas las mediciones se realizaron por triplicado. Estas determinaciones se realizaron en las muestras frescas, deshidratadas osmóticamente y en las muestras deshidratadas empleando microondas. Las Ecs. 77 y 78 son utilizadas para obtener los valores de humedad inicial y al tiempo  $t$ :

$$H_{ini} = \frac{M_{ini} \cdot (1 - ST_{ini})}{M_{ini}} \cdot 100 \quad (77)$$

$$H_t = \frac{M_t \cdot (1 - ST_t)}{M_t} \cdot 100 \quad (78)$$

donde  $H_{ini}$  y  $H_t$  corresponden a la humedad inicial y al tiempo  $t$  (%), respectivamente;  $M_{ini}$  y  $M_t$  son la masa inicial y al tiempo  $t$  de la muestra (kg) y  $ST_{ini}$  y  $ST_t$  corresponden a los sólidos totales iniciales y al tiempo  $t$  ( $\text{kg}_{\text{ST}} \text{kg}^{-1} \text{ b.h.}$ ), respectivamente.

El contenido de sólidos solubles ( $^{\circ}\text{Brix}$ ) fue medido en un refractómetro manual (Bellinham + Stanley Ltd.). Previo a la medición de los sólidos solubles la muestra fue acondicionada, moliendo y mezclando porciones 1/6 de tres rodajas de producto.

### 3.1.3. Determinación del tiempo óptimo para la primera etapa de deshidratación combinada.

Con el propósito de encontrar el tiempo óptimo de pretratamiento osmótico se realizó un estudio de optimización a partir de los ensayos descriptos en la sección 3.1.1.1.

La regresión polinomial (RP) tiene la habilidad de encontrar una única ecuación que puede predecir la evolución de las variables de procesos en un rango de trabajo específico. Esta habilidad puede ser usada combinada con otras técnicas para encontrar las condiciones operativas óptimas. La metodología de la función de conveniencia (MFC) (Derringer y Suich, 1980) tiene la capacidad de representar todas las variables en una sola medida y hacer posible trabajar con un amplio número de factores y respuestas al mismo tiempo. De esta manera, RP y MFC resultan en una herramienta útil para optimizar un amplio rango de procesos industriales y permitir una rápida y consistente identificación de zonas de operación óptima sin necesidad de un diseño experimental estricto.

#### 3.1.3.1. Regresión polinomial

Con el propósito de predecir la evolución de la deshidratación osmótica y evaluar la relativa influencia de cada factor operativo (concentración y tiempo de proceso) en las cinéticas de transferencia de masa fueron desarrollados modelos polinomiales de segundo orden para la pérdida de agua (*WL*), la ganancia de sólidos (*SG*) y la pérdida de peso (*WR*) utilizando regresión lineal múltiple. El modelo general propuesto para cada respuesta cinética se describe a continuación:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad (79)$$

donde  $y$  es la respuesta predicha (*WL*, *SG* o *WR*),  $\beta_0$  es el término independiente de la ecuación,  $\beta_i$  es el coeficiente lineal,  $\beta_{ii}$  es el término de los efectos cuadráticos,  $\beta_{ij}$  representa el término de los efectos de interacción entre las variables y  $x_i$  representa a la variables operativas. Los coeficientes fueron obtenidos por medio del ajuste de los datos experimentales aplicando regresión múltiple utilizando un código desarrollado en Matlab® 7.2 (Mathworks, Natick, MA).

El análisis de la varianza (ANAVA) de los modelos polinómicos fue realizado con el propósito de evaluar la exactitud de los modelos predictivos y el efecto de cada factor sobre las respuestas cinéticas usando Statgraphics® 5.1 (StatPoint Technologies Inc., Warrenton, Virginia).

### 3.1.3.2. Metodología de la Función de Conveniencia

El método de la función de conveniencia (Derringer y Suich, 1980) ha sido utilizado para optimizar las tres respuestas (Pérdida de agua -*WL*-, Ganancia de sólidos -*SG*- y Pérdida de peso -*WR*) y para identificar las condiciones de procesamiento óptimas. Esta metodología consiste en la obtención de una función que convierte un problema de respuesta múltiple en un caso de respuesta única, esta herramienta es conocida como función de conveniencia simultánea (Martinez-Delfa y col., 2009). En este método cada valor de la respuesta (*WR*, *WL* y *SG*), obtenido a partir de la utilización de las ecuaciones polinomiales, es convertido en un valor adimensional de la función de conveniencia  $d_i$ . Estos valores varían entre 0 y 1, 0 correspondiendo a una respuesta inaceptable y 1 como óptimo, respectivamente.

Si la respuesta debe ser maximizada,  $d_i$  se define como:

$$d_i = 0 \quad y_i < L_i \quad ; \quad d_i = 1 \quad y_i > T_i \quad (80)$$

$$d_i = \left[ \frac{y_i - L_i}{T_i - L_i} \right]^{\theta_1} \quad L_i \leq y_i \leq T_i$$

Y si la respuesta debe ser minimizada, la función de conveniencia individual ( $d_i$ ) se calcula de la siguiente manera:

$$d_i = 1 \quad y_i < T_i \quad ; \quad d_i = 0 \quad y_i > U_i \quad (81)$$

$$d_i = \left[ \frac{U_i - y_i}{U_i - T_i} \right]^{\theta_2} \quad T_i \leq y_i \leq U_i$$

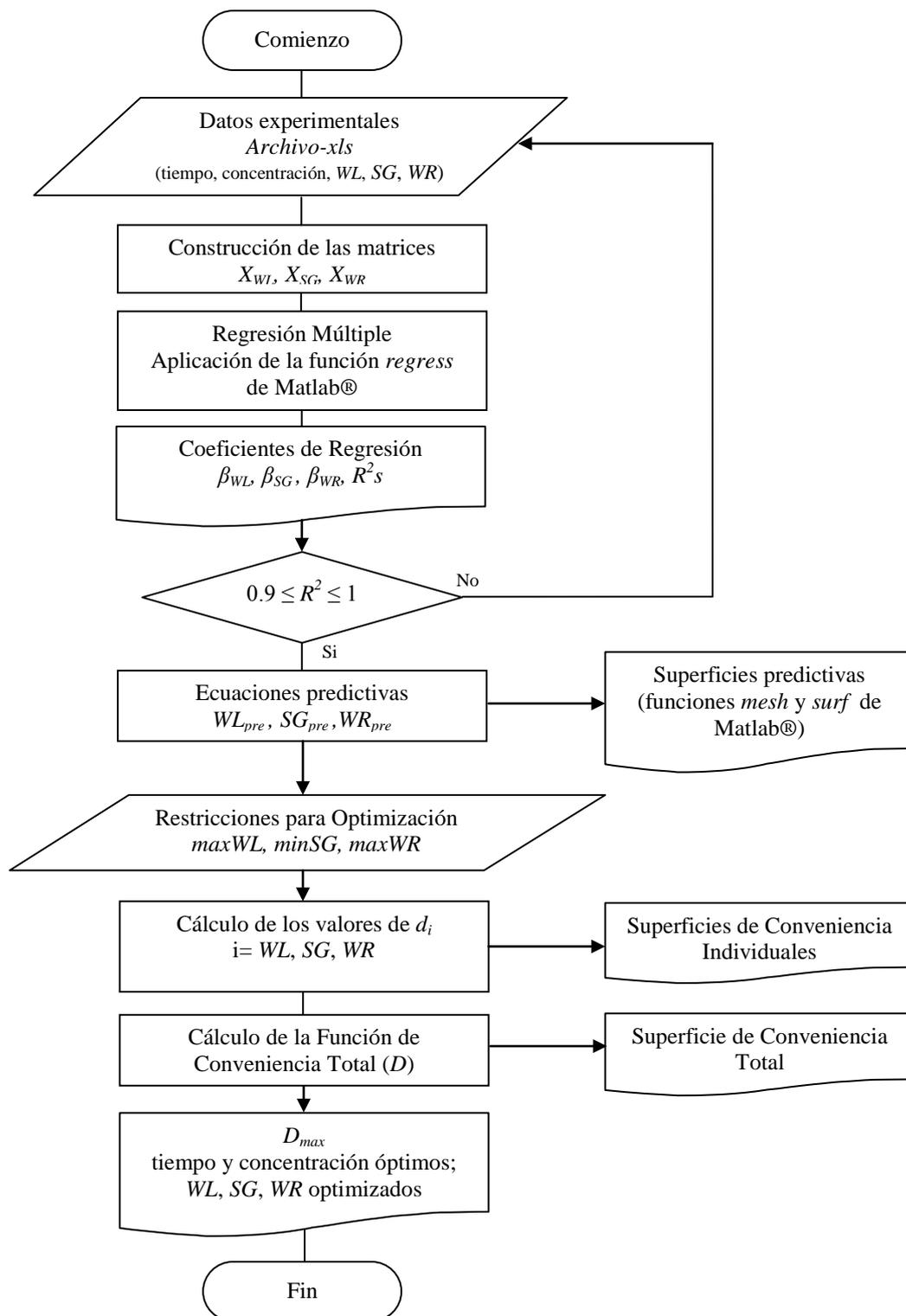
donde  $y_i$  es la respuesta predicha por el modelo polinomial,  $L_i$  y  $U_i$  representan los valores de  $y_i$  mínimos y máximos aceptables, respectivamente; y  $T_i$  es el valor objetivo correspondiente al valor máximo, mínimo o fijado dependiendo de las restricciones especificadas para cada respuesta. Los valores  $d_i$  son afectados por factores definidos por el usuario ( $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ) que ponderan la influencia del valor objetivo y de los límites mínimos y máximos. Con el fin de alcanzar los valores que representen las condiciones óptimas de procesamiento solo una función de conveniencia global (*DT*) es obtenida, la cual es calculada utilizando la media geométrica de las respuestas convertidas o adimensionales ( $d_i$ ):

$$DT = \left( d_1^{v_1} \cdot d_2^{v_2} \cdot \dots \cdot d_n^{v_n} \right)^{1/\sum_{i=1}^n v_i} = \left( \prod_{i=1}^n d_i^{v_i} \right)^{1/\sum_{i=1}^n v_i} \quad (82)$$

donde  $v_i$  es la importancia relativa asignada a cada  $d_i$ . Además, puede ser observado que si alguna de las respuestas es inaceptable ( $d_i=0$ ), la función total se hace cero, lo cual da una mayor coherencia a la función de conveniencia obtenida. Un valor alto de  $DT$  indica las mejores combinaciones de factores, que es considerado como la solución óptima del sistema. Los valores óptimos para cada factor son determinados a partir de los valores de las funciones de conveniencia individual que maximizan la función global  $DT$  (Corzo y col, 2008).

### 3.1.3.3. Algoritmo de optimización

Con el propósito de obtener las ecuaciones polinómicas predictivas para cada producto, calcular la función de conveniencia y graficar las superficies cinéticas y de conveniencia, un algoritmo de solución completo fue codificado en Matlab® 7.2 (Mathworks, Natick, MA). El código empleó funciones matemáticas y gráficas de Matlab para obtener los coeficientes polinomiales, coeficientes de determinación ( $R^2$ ), *valor-p* y las superficies predictivas 3D. La Figura 8 muestra el diagrama de bloques completo del algoritmo de optimización desarrollado.



**Figura 8.** Diagrama de bloques del algoritmo completo de optimización desarrollado.

## 3.2. Experimentos de Deshidratación con Microondas

### 3.2.1. Deshidratación con microondas.

Con el fin de validar el modelo numérico para la deshidratación con microondas se realizaron experimentos de deshidratación de rodajas de pera fresca y osmodeshidratada empleando un horno microondas marca BGH (Imagen 2) cuya potencia máxima es 1000 W, con una frecuencia de operación de 2450 MHz. Las muestras se compraron en un mercado local y de ellas se obtuvieron placas de 15mm de espesor. Las mismas se colocaron dentro del horno en un soporte enrejado plástico, material transparente a la radiación y que permite la transferencia de energía y masa por ambas caras.



**Imagen 2.** Equipo de microondas utilizado para las pruebas de deshidratación.

### 3.2.2. Calibración de la potencia del horno de microondas

La potencia de las microondas ( $P_0$ ) fue medida por un método calorimétrico (Lin y col., 1995; Khraisheh y col., 1997). La técnica consiste en el cálculo de la potencia absorbida por distintos volúmenes de agua destilada sometidos al calentamiento, en las mismas condiciones operativas (posición, potencia y tamaño de envase) en las que se realizaron las experiencias con peras, cubriendo el rango de potencias nominales del horno microondas a ser utilizadas. La calibración de la potencia fue realizada con volúmenes de agua de 25 mL a 100 mL. La potencia absorbida fue calculada calorimétricamente a través de la siguiente expresión basada en el incremento en la temperatura del agua (Zhou y col., 1995):

$$P_o = m_w C p_w \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (83)$$

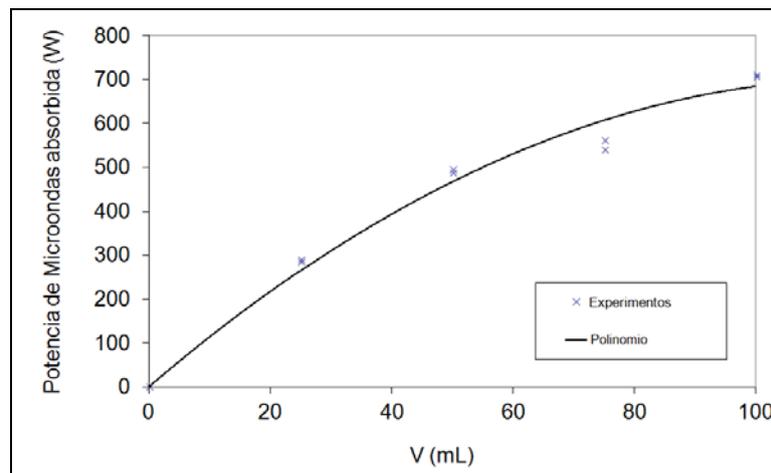
donde  $m_w$  es la masa de agua líquida (kg),  $C p_w$  es el calor específico del agua,  $\Delta T$  es el incremento de temperatura, y  $\Delta t$  es el tiempo de calentamiento.

Un modelo polinomial fue propuesto para relacionar  $P_o$  con el contenido de agua de la muestra; el software Excel (Microsoft®) fue usado para estimar los parámetros del modelo y calcular su desviación. La Figura 9 muestra los datos experimentales y calculados de la potencia absorbida por el agua en función del volumen. De esta manera la siguiente relación empírica fue obtenida:

$$P_o = -0.0436 V^2 + 11.855 V \quad V < 100mL \quad R^2=0.976 \quad (84)$$

$$P_o = 700 \quad V \geq 100mL \quad (85)$$

Los valores obtenidos de  $P_o$  a partir de las Ecs. 84 y 85 fueron usados como valores de entrada para la resolución del modelo matemático.



**Figura 9.** Potencia absorbida en relación al volumen de agua de la muestra.

Para evitar la degradación térmica, las muestras fueron irradiadas con ciclos de potencia de 50% (10s/10s, on/off con el horno funcionando a 1000W de potencia nominal). Además este modo de operación hace posible el control de la sobrepresión generada dentro del alimento y previene el efecto “puffing” y los cambios de volumen. Para obtener la cinética de secado, cinco experimentos de DMO independientes durante 1, 2, 3, 4 y 5 minutos fueron realizados bajo las mismas condiciones de operación.

### **3.2.3. Determinación de humedad y pérdida de peso.**

La humedad y la pérdida de peso fueron medidas durante la deshidratación con microondas utilizando la misma metodología descrita en la sección 3.1.2.

### **3.2.4. Determinación de temperaturas durante el secado con microondas.**

Las temperaturas en distintas posiciones dentro de las muestras, se midieron durante la deshidratación con sensores de fibra óptica (Model FOT-L-SD, Fiso Technologies Inc., Quebec, Canadá). Los mismos están conectados a un equipo de adquisición de datos, el cual a su vez está conectado a una PC. El software instalado en la PC (*FISOCommander 2 Standard Edition*) permite registrar y almacenar los valores con un intervalo de 0.1s con una exactitud de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

# Capítulo 4

## Resultados y Discusión

## Capítulo 4 Resultados y Discusión

### 4.1. Validación de los modelos propuestos

La validación de los modelos se realizará con datos experimentales propios y obtenidos de literatura. En el caso del proceso de deshidratación osmótica las predicciones de los modelos serán contrastados contra datos de pera, kiwi y calabacita deshidratados en soluciones de sacarosa con distintas concentraciones, tiempos de proceso, temperaturas, tamaños y formas. Los perfiles de humedad y temperatura obtenidos por el modelo de deshidratación con microondas serán comparados contra datos de pera, papa, zanahoria y manzana procesados con diferentes niveles de potencia, tiempo de procesamiento, presiones de trabajo y modos de operación del horno de microondas. Por último la validación del modelo completo del proceso combinado se llevará a cabo en pera y banana, con diferentes pretratamientos osmóticos (en uno de los casos sometidos a concentraciones de solución osmótica variable y en el otro caso con tiempos de procesamiento diferentes) y diferentes condiciones de operación durante la segunda etapa de deshidratación con microondas (diferentes tiempos de procesamiento, modos de operación y niveles de potencia).

#### 4.1.1. Validación del modelo de deshidratación osmótica

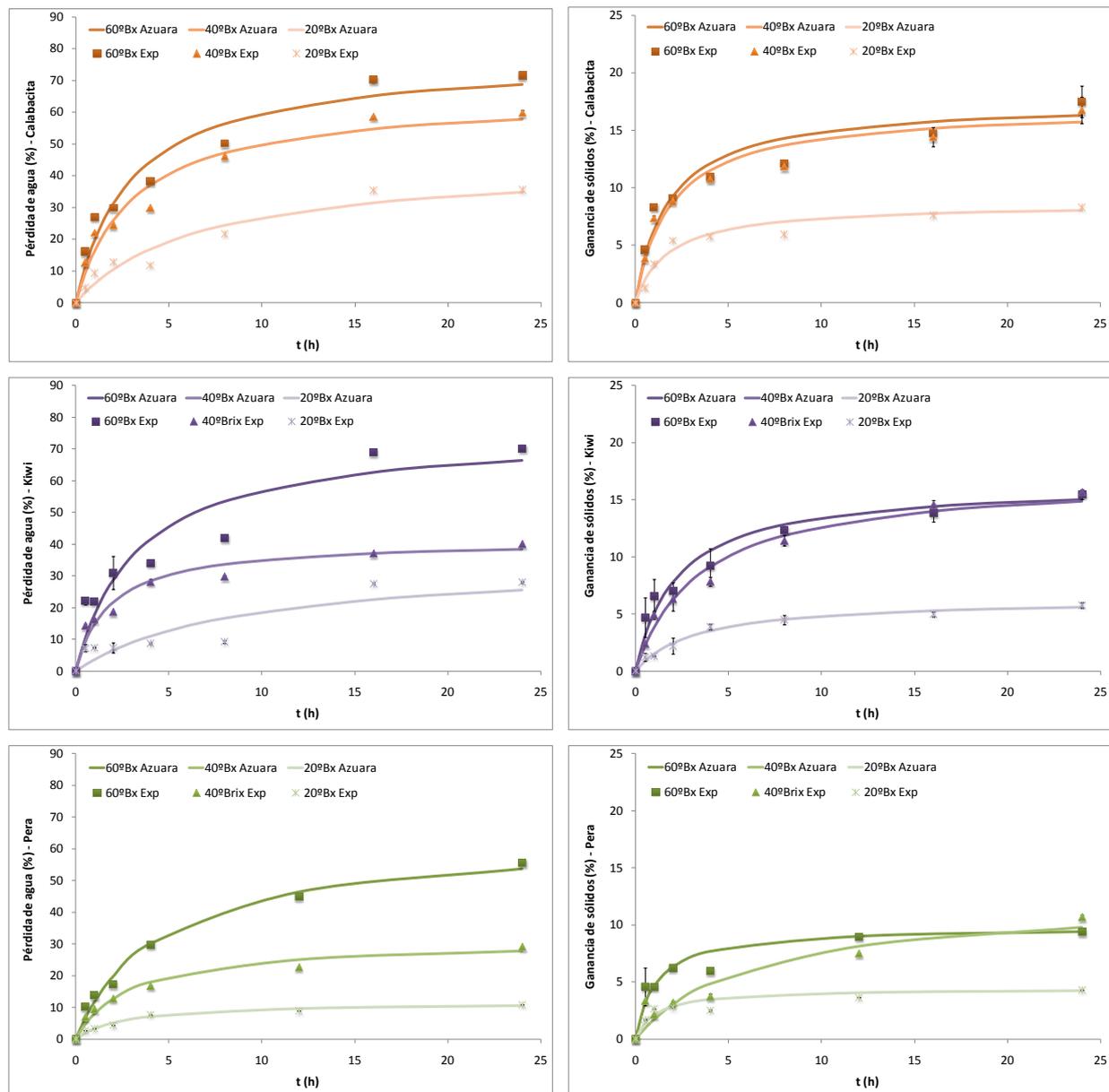
En esta sección se analizarán 3 modelos del proceso de deshidratación osmótica. Un modelo empírico, un modelo de alta complejidad y un modelo difusional. El propósito de este apartado es encontrar un modelo que sea compatible junto con el modelo de deshidratación con microondas, tanto en su nivel de complejidad como en la información necesaria para un análisis adecuado de los mecanismos de transferencia de masa que intervienen en el proceso.

##### *4.1.1.1. Predicción de la pérdida de agua y ganancia de sólidos utilizando modelos empíricos*

###### *4.1.1.1.1 Aplicación del modelo de Azuara*

Con el propósito de obtener una primera aproximación a la funcionalidad de las variables cinéticas ( $WL$  y  $SG$ ) del proceso de deshidratación osmótica con el tiempo, determinar la adecuación del modelado empírico a tiempos cortos de procesamiento, se aplicó el modelo empírico de Azuara (Azuara y col, 1992) para obtener valores predictivos útiles para ser utilizados en tratamientos posteriores de deshidratación.

La Figura 10 muestra la evolución de la pérdida de agua ( $WL$ ) y ganancia de sólidos ( $SG$ ) experimental y calculada con respecto al tiempo de procesamiento para diferentes concentraciones de solución hipertónica para las dos frutas y una hortaliza estudiadas (kiwi, pera y calabacita). Se puede observar que en todas las experiencias la pérdida de agua aumentó con el incremento en la concentración de la solución osmótica, lo cual coincide con lo esperable teóricamente al haber mayor fuerza impulsora para la deshidratación (Conway y col., 1983; Marcotte y Le Maguer, 1991; Torregiani, 1993; Rastogi y Raghavarao, 1994; Panagiotou y col., 1998).



**Figura 10.** Pérdida de agua y ganancia de sólidos experimental y modelada en función del tiempo para diferentes tratamientos osmóticos con soluciones de sacarosa (20, 40 y 60°Brix) de calabacita, kiwi y pera.

La ganancia de sólidos mostró un comportamiento similar a  $WL$  hasta las 15 horas de procesamiento; los experimentos con soluciones de 40 y 60°Brix no presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), para calabacita y kiwi, pero si entre éstas y las corridas con solución hipertónica de 20°Brix. Probablemente, como ya fue señalado por otros autores (Giraldo y col., 2003; Mújica-Paz y col., 2003; Ferrari y col., 2011), altas concentraciones de soluto generan una barrera superficial limitando la difusión hacia el interior del producto.

**Tabla 4.** Parámetros ajustados del modelo de Azuara para predicción de la pérdida de agua durante la deshidratación osmótica de frutihortícolas.

Producto	°Brix	$WL_{\infty}$	$R^2$	$\beta_1$	$R^2$
Calabacita	20	0.4440	0.9763	0.1520	0.9798
	40	0.6504	0.9891	0.3283	0.9893
	60	0.7719	0.9885	0.3365	0.9881
Kiwi	20	0.3491	0.8862	0.1146	0.9273
	40	0.4134	0.9939	0.5459	0.9894
	60	0.7535	0.9767	0.3027	0.9712
Pera	20	0.1170	0.9916	0.3847	0.9760
	40	0.3127	0.9864	0.3389	0.9702
	60	0.6377	0.9871	0.2227	0.9870

**Tabla 5.** Parámetros ajustados del modelo de Azuara para predicción de la ganancia de sólidos durante la deshidratación osmótica de frutihortícolas.

Alimento	°Brix	$SG_{\infty}$	$R^2$	$\beta_2$	$R^2$
Calabacita	20	0.0860	0.9921	0.5563	0.9889
	40	0.1695	0.9914	0.5207	0.9910
	60	0.1751	0.9896	0.5524	0.9861
Kiwi	20	0.0636	0.9966	0.3112	0.9952
	40	0.1703	0.9895	0.2876	0.9944
	60	0.1640	0.9968	0.4466	0.9896
Pera	20	0.0444	0.9873	0.9003	0.8689
	40	0.1231	0.9164	0.1617	0.8893
	60	0.0985	0.9944	0.8862	0.9069

El tiempo de procesamiento, por otro lado, produjo un aumento significativo sobre las variables cinéticas principalmente durante las primeras 4 horas de deshidratación.

Los parámetros de ajuste del modelo de Azuara y los coeficientes de correlación ( $R^2$ ) para todas las pruebas realizadas se muestran en las Tablas 4 y 5.

La constante  $\beta_2$  del modelo de Azuara, representa la velocidad de ganancia de sólidos (Parjoko y col., 1996); la misma no fue afectada significativamente por la concentración de la solución osmótica. Sin embargo, el modelo de Azuara fue efectivo para identificar las condiciones de equilibrio tanto de pérdida de agua como de ganancia de sólidos a través de la obtención de los parámetros  $WL_\infty$  y  $SG_\infty$ , respectivamente, mostrando valores de equilibrio para la pérdida de agua obtenida en soluciones de sacarosa (20, 40 y 60 °Brix) de 44.4, 65 y 77.1% para calabacita; 34.9, 41.3 y 75.3% para kiwi y 11.7, 31.2 y 63.7% para pera. Con respecto a la ganancia de sólidos los valores de equilibrio obtenidos fueron 8.6, 16.9 y 17.5%; 6.3, 17 y 16.4% y de 4.4, 12.3 y 9.8% para calabacita, kiwi y pera, respectivamente.

Considerando las predicciones obtenidas por el modelado empírico, puede mencionarse que las curvas asintóticas obtenidas por el modelo de Azuara siguen en forma fidedigna la evolución del proceso completo de deshidratación tendiendo al equilibrio, lo cual ocurre a tiempos largos (no verificándose experimentalmente durante las 24 horas estudiadas).

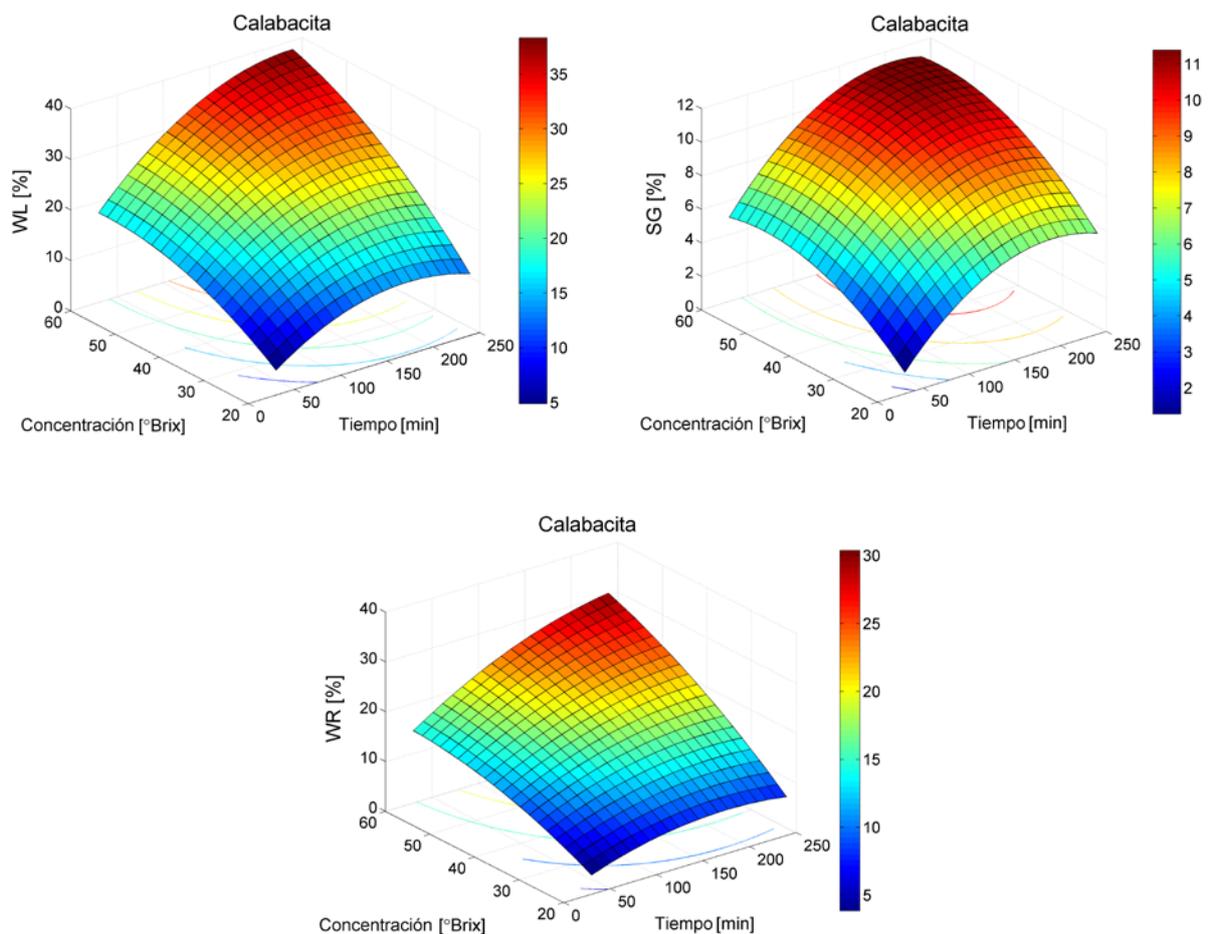
Si bien con la aplicación del modelo de Azuara se obtiene la evolución de los valores medios de pérdida de agua y ganancia de sólidos y las tendencias del proceso de deshidratación hasta el equilibrio, no es posible identificar en forma exacta las condiciones óptimas de operación ni obtener los perfiles de concentraciones de agua y sólidos solubles en el interior de los productos sino solo valores globales, perdiendo de vista importante información para explicar los mecanismos de transferencia de masa puestos en juego durante la deshidratación e impregnación de frutihortícolas.

En consecuencia, será necesario ampliar el análisis empírico con el fin de identificar las condiciones óptimas de procesamiento durante la primera etapa de deshidratación combinada. Y posteriormente se abordará el estudio de la deshidratación osmótica utilizando modelos de mayor complejidad matemática que incorporen los mecanismos involucrados en la transferencia de masa, y que puedan acoplarse adecuadamente al modelo desarrollado en segunda etapa de deshidratación con microondas.

#### 4.1.1.1.2 Aplicación de modelos polimónicos y función de optimización

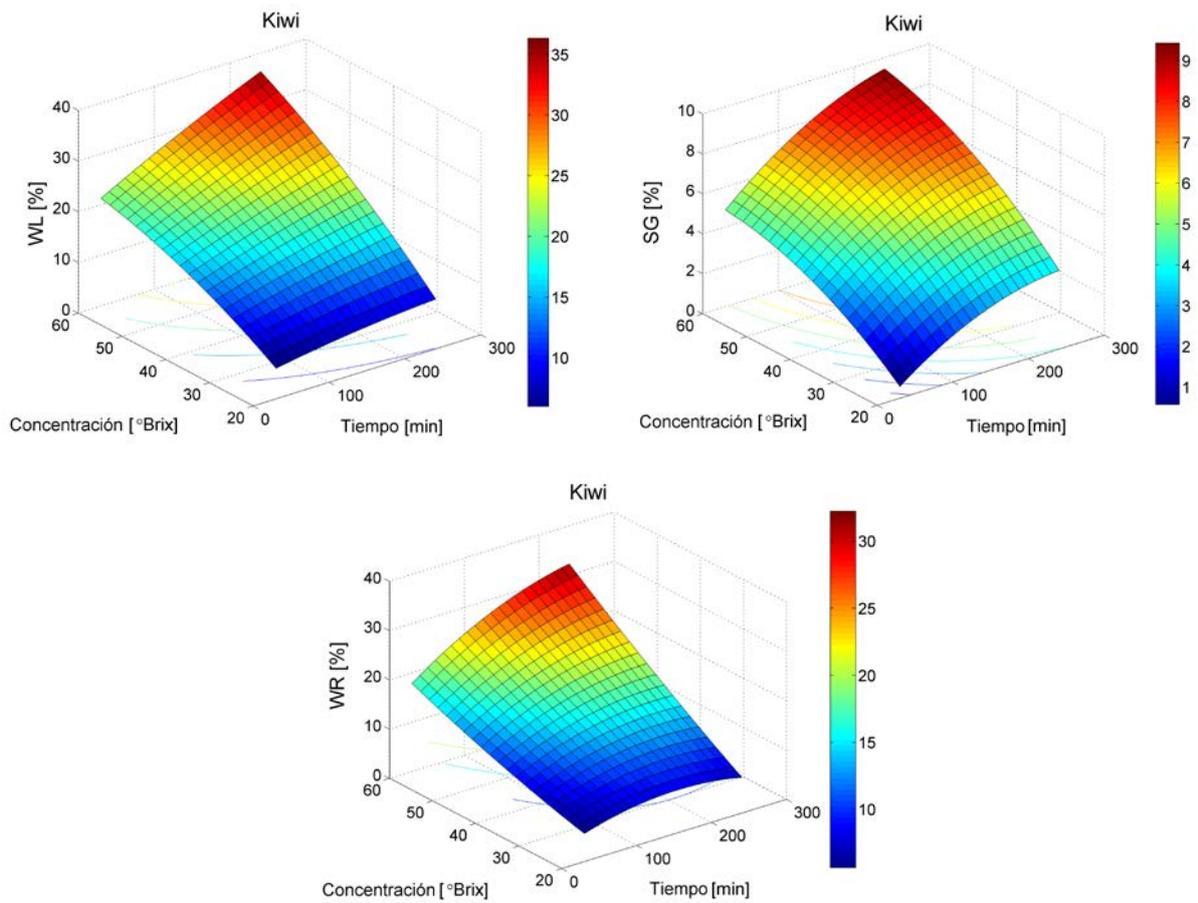
##### *Ajuste de modelos polinomiales*

Tres modelos predictivos fueron obtenidos (para  $WL$ ,  $SG$  y  $WR$ ) para cada frutihortícola estudiado, usando el enfoque polinomial codificado en Matlab® 7.2 (Mathworks, Natick, MA). Además las superficies predictivas 3D para la pérdida de agua, sólidos solubles y pérdida de peso en función del tiempo y de la concentración de la solución de sacarosa para calabacita, kiwi y pera (Figuras 11-13) fueron graficadas usando funciones gráficas de Matlab. Las ecuaciones predictivas obtenidas fueron evaluadas estadísticamente a través del análisis de la varianza (ANAVA).

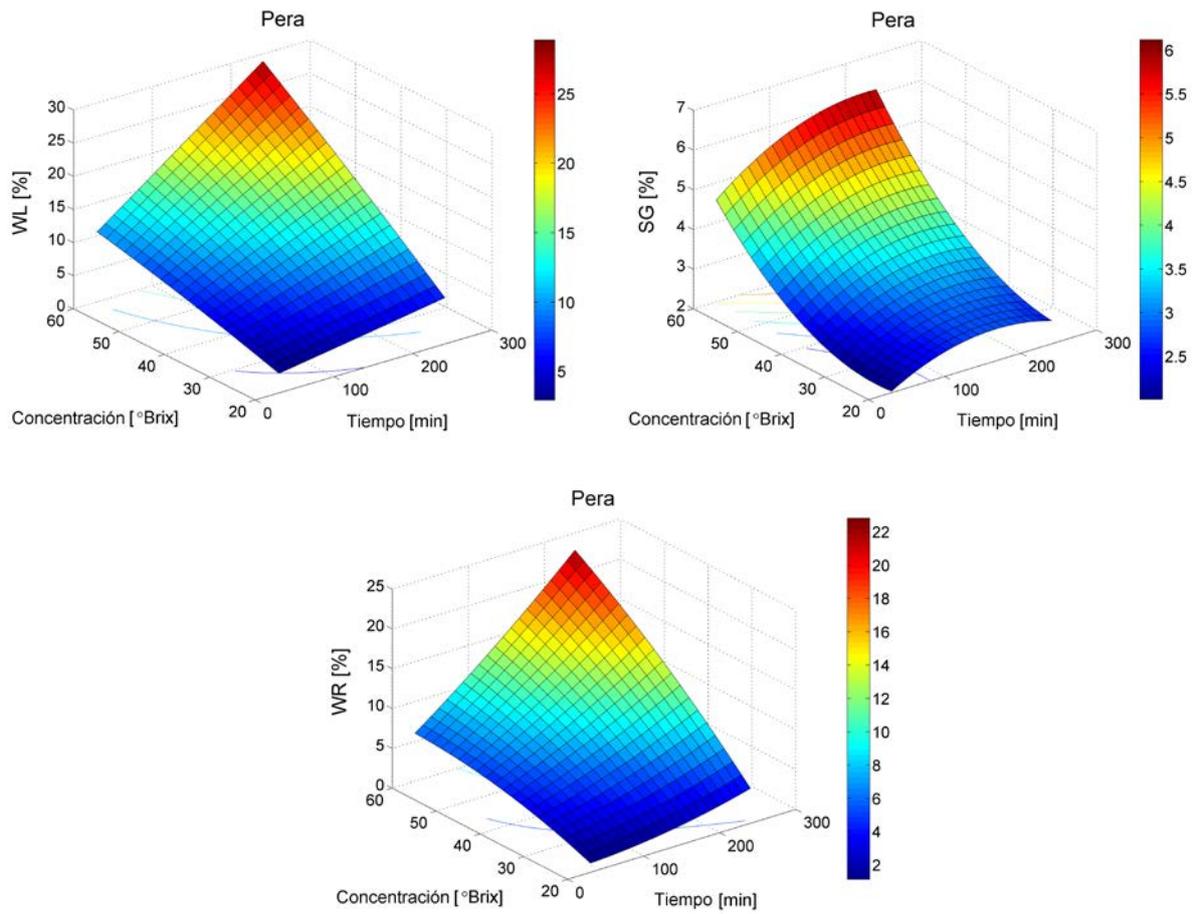


**Figura 11.** Superficies predictivas para la pérdida de agua, ganancia de sólidos y pérdida de peso durante la deshidratación osmótica de calabacita.

Los resultados del ANAVA para los 9 modelos polinómicos desarrollados se muestran en la Tabla 6. A partir de los resultados se pueden observar diferentes comportamientos en las muestras analizadas, estas diferencias pueden ser atribuidas a las diferencias en la estructura y composición de los productos seleccionados. La Tabla 7 muestra los valores de contenido de agua, sólidos solubles y porosidad para calabacita, kiwi y pera. Como puede observarse, la pera tiene un mayor contenido de sólidos solubles que da como resultado una menor fuerza impulsora para la deshidratación y la ganancia de sólidos; mientras que la calabacita tiene una porosidad mucho más alta, lo cual facilita la difusión de las diferentes sustancias. En adición, la calabacita posee una pared celular más rígida, debido al alto contenido de lignina y celulosa (Kurz y col, 2008), que produce una mayor velocidad de plasmólisis en comparación con lo ocurre en kiwi y pera con una pared celular más elástica. Como consecuencia la calabacita pierde más agua e incorpora más sólidos solubles que las otras frutas, considerando condiciones de procesamiento similares. Este hecho puede explicar las diferencias encontradas, especialmente en la significancia de los términos cuadráticos en el ANAVA de calabacita (Tabla 6), de esta manera el tiempo y la concentración afectan más fuertemente la pérdida de agua y la ganancia de sólidos de calabacita en comparación con lo que ocurre en kiwi y pera.



**Figura 12.** Superficies predictivas para la pérdida de agua, ganancia de sólidos y pérdida de peso durante la deshidratación osmótica de kiwi.



**Figura 13.** Superficies predictivas para la pérdida de agua, ganancia de sólidos y pérdida de peso durante la deshidratación osmótica de pera.

**Tabla 6.** Análisis de la varianza de los modelos predictivos polinómicos para las respuestas durante la deshidratación osmótica de frutihortícolas.

Factores	WL		SG		WR		
	Coefficientes	valor-p	Coefficientes	valor-p	Coefficientes	valor-p	
<b>Ca-Modelo</b>	$\beta_0$	-15.5507	0.0002	-7.4239	0.0005	-9.3347	0.0002
$x_1$ (tiempo)	$\beta_1$	0.1300	0.0004	0.0743	0.0002	0.0537	0.0006
$x_2$ (concentración)	$\beta_2$	0.9770	<0.0001	0.4075	0.0004	0.6538	<0.0001
$x_1^2$	$\beta_{11}$	-4.7059e-4	0.0256	-2.0277e-4	0.0116	-2.3476e-4	0.1095
$x_2^2$	$\beta_{22}$	-0.0087	0.0575	-0.0039	0.0244	-0.0053	0.1179
$x_1 x_2$	$\beta_{12}$	0.0015	0.0259	1.5232e-4	0.4557	0.0014	0.0152
$R^2$		<b>0.9681</b>		<b>0.9559</b>		<b>0.9693</b>	
<b>Ki-Modelo</b>	$\beta_0$	-7.0373	0.0003	-4.9031	0.0005	1.1330	<0.0001
$x_1$ (tiempo)	$\beta_1$	0.0026	0.0020	0.0298	0.0004	0.0300	0.0003
$x_2$ (concentración)	$\beta_2$	0.6999	<0.0001	0.2702	0.0001	0.1068	<0.0001
$x_1^2$	$\beta_{11}$	-4.2978e-5	0.7928	-6.2301e-5	0.2432	-1.9581e-4	0.0729
$x_2^2$	$\beta_{22}$	-4.5093e-3	0.2661	-0.0021	0.1120	0.0019	0.4063
$x_1 x_2$	$\beta_{12}$	0.0014	0.0430	1.4911e-4	0.3942	0.0015	0.0024
$R^2$		<b>0.9656</b>		<b>0.9578</b>		<b>0.9849</b>	
<b>Pe-Modelo</b>	$\beta_0$	-1.3219	<0.0001	2.7786	0.0049	-3.4647	0.0002
$x_1$ (tiempo)	$\beta_1$	-0.0156	<0.0001	0.0112	0.0745	-0.0311	0.0001
$x_2$ (concentración)	$\beta_2$	0.2012	<0.0001	-0.0940	0.0005	0.2778	0.0001
$x_1^2$	$\beta_{11}$	2.7075e-6	0.9705	-4.0848e-5	0.3388	5.2169e-5	0.6162
$x_2^2$	$\beta_{22}$	-7.8065e-4	0.6530	0.0019	0.0831	-0.0026	0.3115
$x_1 x_2$	$\beta_{12}$	0.0017	0.0004	1.1924e-4	0.4035	0.0016	0.0028
$R^2$		<b>0.9890</b>		<b>0.9056</b>		<b>0.9699</b>	

**Tabla 7:** Características estructurales y composición de calabacita, kiwi y pera

Producto	Contenido de agua (%)	Contenido de sólidos solubles (%)	Porosidad (%)
Calabacita	93	6-8	10-18 <sup>a</sup>
Kiwi	81	9-12	2,3 <sup>b</sup>
Pera	86	12-14	4,7 <sup>c</sup>

a Mayor y col. (2011);

b Salvatori y col. (1998);

c Madiouli y col. (2011).

Con respecto a los coeficientes de regresión obtenidos (Tabla 4), puede mencionarse que otros autores obtuvieron coeficientes de regresión de diferentes productos sometidos a deshidratación osmótica por ejemplo en pimientos verdes (Ozdemir y col., 2008), cubos de zanahoria (Singh y col., 2010), melón cantalupo (Corzo y Gomez, 2004) y remolacha (Manivannan and Rajasimman, 2011) utilizando el mismo enfoque de ecuaciones predictivas polinómicas (Ec. 79). En concordancia con nuestros resultados, ellos presentaron valores positivos y negativos en los términos lineales, cuadráticos y de interacción dependiendo del mejor ajuste de los datos experimentales.

Los resultados del análisis de la varianza muestran que todos los modelos predictivos polinómicos fueron estadísticamente significativos (nivel de confianza 99%). Además, todos los modelos ajustados presentaron coeficientes de determinación cercanos a la unidad ( $R^2 \geq 0.9$ ) lo cual indica que los modelos explican satisfactoriamente la variabilidad de las respuestas; en consecuencia, las ecuaciones polinómicas de segundo orden obtenidas pueden ser usadas para la predicción de las variables cinéticas ( $WL$ ,  $SG$  y  $WR$ ) en el rango de las condiciones de operación estudiadas.

### *Optimización múltiple*

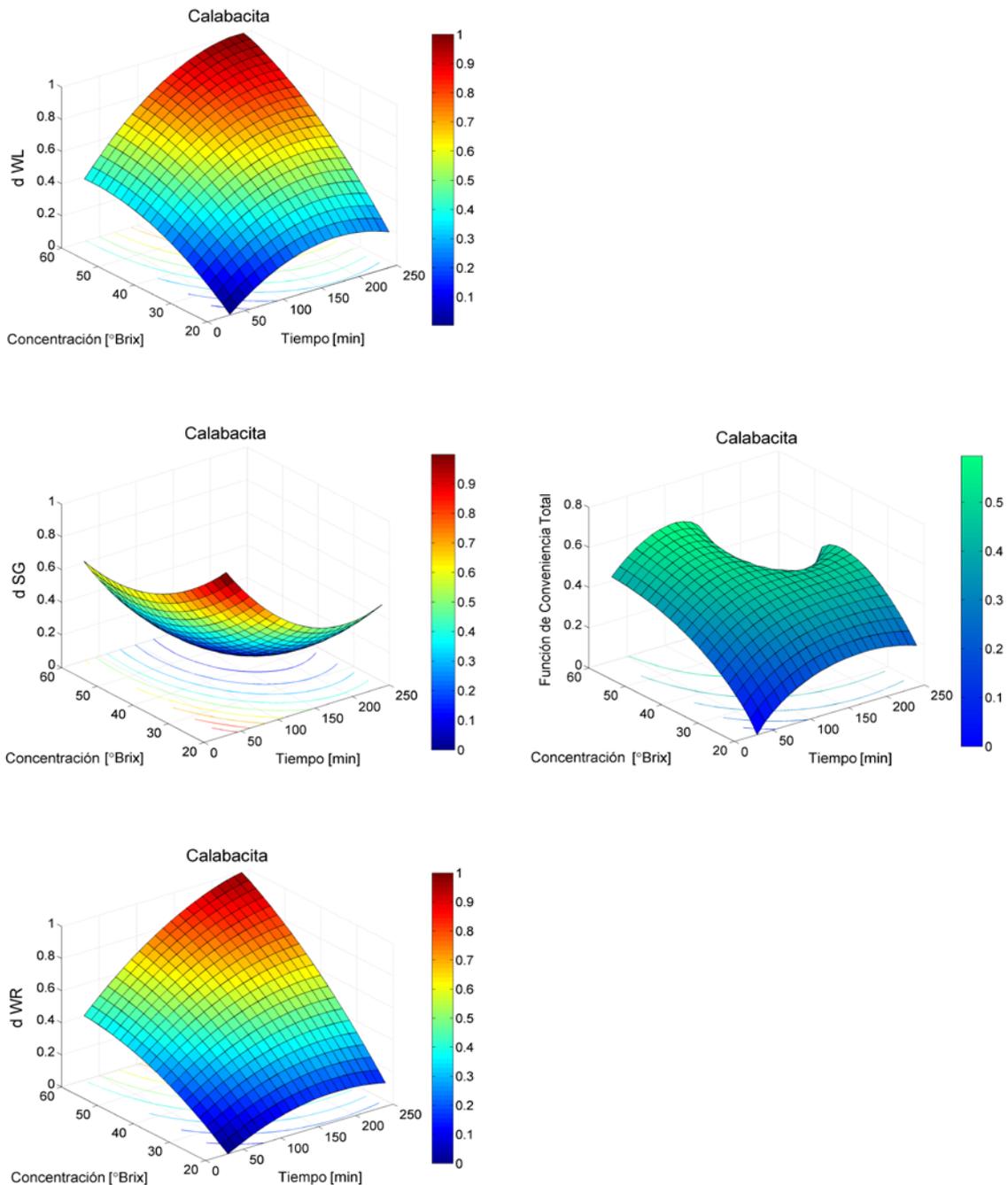
El método de la función de conveniencia puede ser aplicado a los alimentos y al sistema de procesamiento con el propósito de optimizar los diferentes factores. En el caso de la deshidratación osmótica pueden ser usados,  $WL$ ,  $WR$ ,  $SG$ , textura, color, tiempo de proceso, costo, etc., solos o combinados. En la presente Tesis, las condiciones óptimas para la deshidratación osmótica de calabacita, kiwi y pera fueron encontradas usando el método de la función de conveniencia programada en Matlab® 7.2 (Mathworks, Natick, MA) de acuerdo con el siguiente criterio: maximizar la pérdida de agua ( $WL$ ), minimizar la ganancia de sólidos ( $SG$ ), maximizar la pérdida de peso ( $WR$ ); este mismo criterio fue utilizado por Eren y Kaymak-

Ertekin (2007), Manivannan y Rajasimman (2011) y Noshad y col. (2011). Los modelos polinomiales de segundo orden, obtenidos mediante regresión polinomial (*RP*), fueron usados para cada respuesta cinética del sistema (*WL*, *SG* y *WR*) con el fin de determinar zonas óptimas de procesamiento y las condiciones óptimas exactas para calabacita, kiwi y pera durante la deshidratación osmótica. Los valores de la función conveniencia fueron calculados de acuerdo con las Ecs. 80-82.

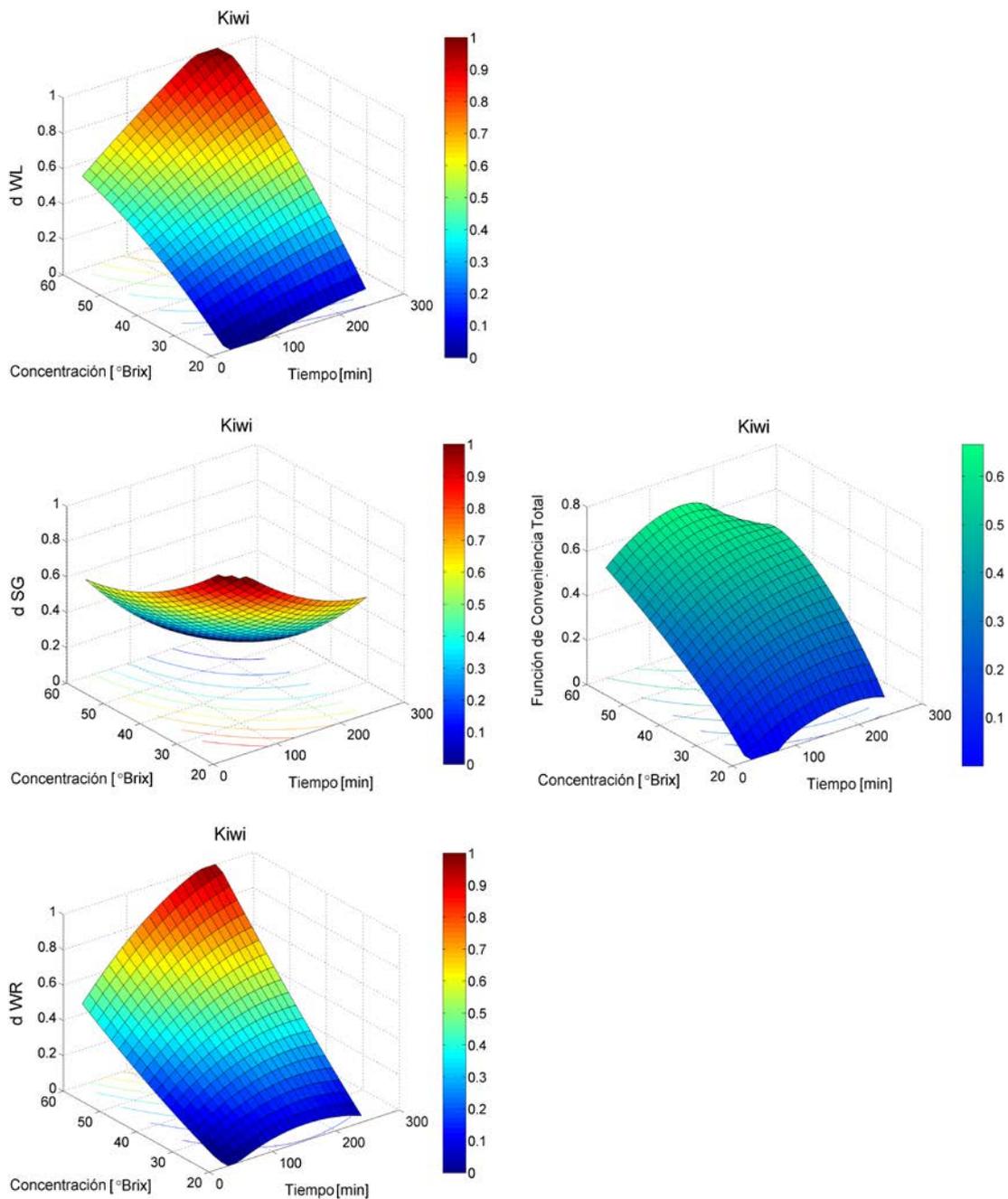
Las superficies de los valores de conveniencia individuales y totales para las tres frutas (Figuras 14-16) fueron obtenidas usando funciones gráficas de Matlab de acuerdo con los valores de la función de conveniencia calculados a partir de diferentes niveles de concentración de solución de sacarosa (20, 40 y 60°Brix) y tiempos de proceso (30, 60, 120 y 240min). Las regiones de los valores óptimos de la funciones conveniencia (*DT*) fueron identificados con círculos grises. A partir de los gráficos de conveniencia total, puede ser observado que los tres gráficos tienen formas diferentes. En el caso de calabacita, la zona óptima puede observarse como una cuesta estrecha en el nivel máximo de concentración (60°Brix), entre los 50 y 150 minutos. Adicionalmente es posible determinar una zona de baja conveniencia que se manifiesta como una caída abrupta en el valor de *DT* cercano a los valores máximos de concentración y tiempo, esto es debido a los valores de conveniencia individual para la ganancia de sólidos ( $d_{SG}$ ) que hacen máximos los valores de *SG*, cercanos al máximo de concentración y tiempo, tienden a cero, teniendo en cuenta la restricción de minimización de la ganancia de sólidos. Analizando la función de conveniencia para kiwi, puede apreciarse un zona óptima en forma de una cuesta extendida que corresponde a valores máximos de concentración y tiempos de 100 a 200 minutos, la caída abrupta de los valores de conveniencia que ocurrieron en calabacita a niveles máximos de los factores no fue observada en este producto (kiwi). Por otro lado, la pera mostró una forma diferente en la superficie de función de conveniencia, en la cual la zona óptima se localizó en el máximo nivel del tiempo (240min), entre 50 y 60°Brix; estas diferencias pueden ser atribuidas a las diferencias en las formas de las superficies de conveniencia individuales para la ganancia de sólidos ( $d_{SG}$ ).

Las condiciones de procesamiento óptimas para la deshidratación de calabacita, kiwi y pera fueron obtenidas de acuerdo con las soluciones matemáticas de la función de conveniencia total considerando el criterio de optimización seleccionado (Tabla 8). Una solución para cada frutihortícola fue obtenida correspondiente a las condiciones óptimas que maximizan el valor de la función de conveniencia total (0.595, 0.665 y 0.709, para calabacita, kiwi y pera,

respectivamente). En el caso de calabacita y kiwi, las condiciones óptimas de procesamiento fueron similares correspondiendo a los niveles máximos de concentración de solución de sacarosa (60°Brix) y tiempos de proceso entre 114 y 145 minutos. En el caso de pera, diferentes condiciones óptimas fueron identificadas mostrando un desplazamiento hacia el máximo nivel de tiempo de procesamiento (240min) y concentración de sacarosa de 54°Brix.



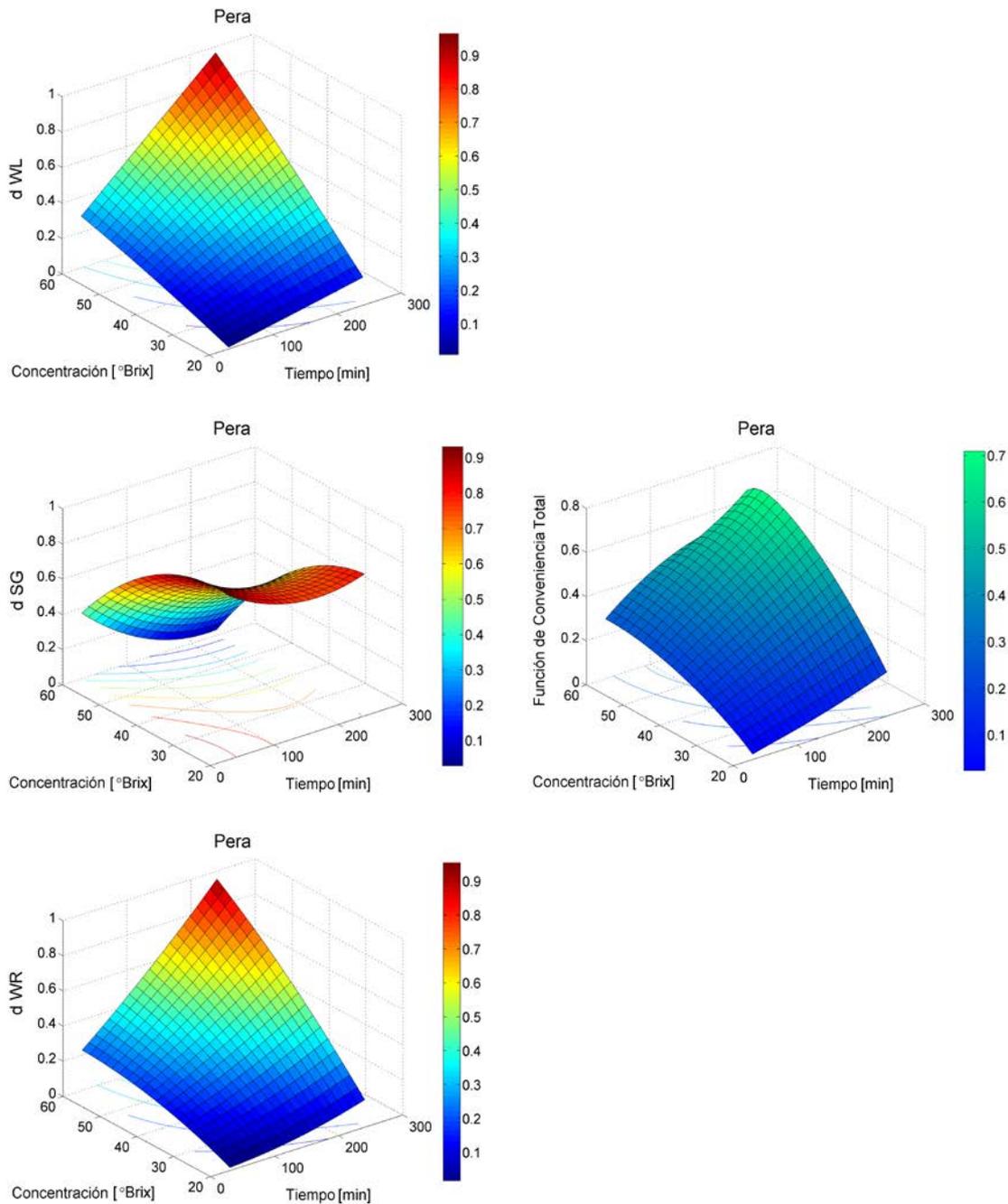
**Figura 14.** Gráficos de superficie de la función de conveniencia individual y total y contornos de la optimización-DO de calabacita. Izquierda: conveniencia individual para la pérdida de agua, ganancia de sólidos y pérdida de peso. Derecha: conveniencia total.



**Figura 15.** Gráficos de superficie de la función de conveniencia individual y total y contornos de la optimización-DO de kiwi. Izquierda: conveniencia individual para la pérdida de agua, ganancia de sólidos y pérdida de peso. Derecha: conveniencia total.

A pesar de las diferencias entre los resultados, ha sido posible encontrar la existencia de una zona común óptima para la deshidratación de frutas y hortalizas en soluciones de sacarosa con valores de tiempo de proceso entre 114 y 240min y concentración de sacarosa entre 54 y 60°Brix, correspondiente a valores de pérdida de agua entre 25.7 y 30%, ganancia de sólidos

entre 5.1 y 9.5% y valores de pérdida de peso entre 20.5 y 27.8%. Los resultados estuvieron dentro del rango de los valores obtenidos por Corzo y Gomez (2004) para melón cantalupo, Singh y col. (2008) para zanahoria y Ravindra y Chattopadhyay (2000) para papa.



**Figura 16.** Gráficos de superficie de la función de conveniencia individual y total y contornos de la optimización-DO de pera. Izquierda: conveniencia individual para la pérdida de agua, ganancia de sólidos y pérdida de peso. Derecha: conveniencia total.

**Tabla 8:** Condiciones óptimas de operación para la deshidratación osmótica de frutihortícolas.

Producto	Condiciones Óptimas		Respuestas Optimizadas			$DT_{max}$
	Tiempo (min)	Conc. (°Brix)	WL (%)	SG (%)	WR (%)	
Objetivo	-	-	max.	min.	max.	
Calabacita	114.0	60	30.95	9.59	23.36	0.595
Kiwi	145.5	60	29.99	8.04	27.88	0.665
Pera	240.0	54	25.74	5.19	20.57	0.709
$\theta_i$	-	-	1	1	1	
$v_i$	-	-	3	1	3	

$v_i$  importancia relativa asignada a cada respuesta;  $\theta_i$  factor de peso para las restricciones establecidas.

#### 4.1.1.2. Predicción de Perfiles de Humedad y Sólidos Solubles aplicado a datos propios y de literatura utilizando el modelo MODC.

Con el fin de profundizar el análisis sobre los mecanismos de transferencia de masa puestos en juego durante la deshidratación osmótica y obtener información suficiente para la siguiente etapa de deshidratación (microondas) se aplicó el modelo osmótico-difusional celular (MODC) previamente desarrollado por Spiazzi y Mascheroni (1997) el cual ha sido ampliamente validado (Spiazzi y Mascheroni, 1997; Spiazzi y Mascheroni, 2001; Agnelli y col, 2005) para la predicción de la pérdida de agua y ganancia de sólidos de diversas frutas y hortalizas (manzana, papa, pera y frutilla), varios solutos (sacarosa, glucosa, cloruro de sodio y polietilenglicol), formas (cubos, discos y mitades) y tamaños. Sin embargo, en todas las validaciones se analizó la exactitud del modelo para tiempos largos cercanos al equilibrio. En la presente Tesis se verificará la validez del modelo para la predicción de la evolución de la humedad y la concentración de sólidos solubles a tiempos cortos de deshidratación osmótica.

##### 4.1.1.2.1. Aplicación del modelo Osmótico-Difusional Celular (MODC) a medias rodajas de pera.

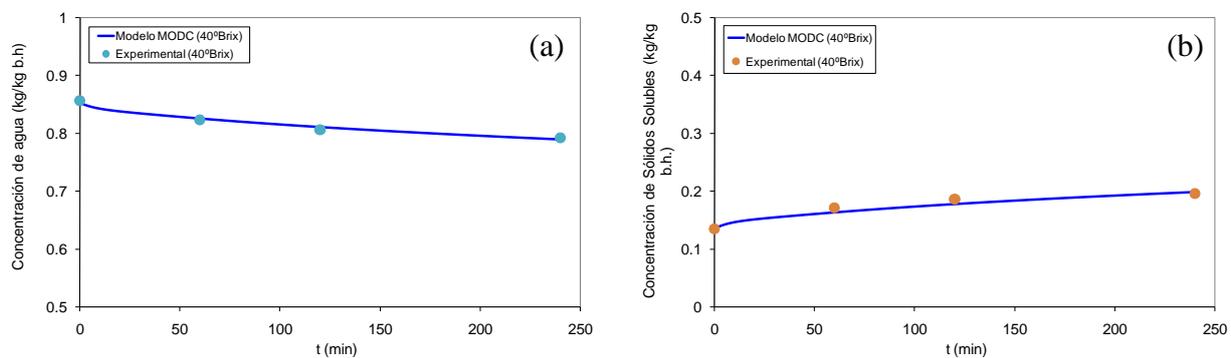
Primeramente se aplicó el modelo MODC a medias rodajas de pera deshidratadas osmóticamente en solución de sacarosa a 40°Brix durante 4h de proceso a temperatura constante de 30°C. En la Tabla 9 se muestran los principales parámetros y propiedades necesarios para la simulación del proceso de deshidratación e impregnación de peras.

**Tabla 9.** Parámetros y propiedades para el modelado de la deshidratación osmótica de pera\*

Propiedades	Valores	Unidades
Alimento	Pera	---
Forma	Media rodaja	---
$k_w$	$200 \cdot 10^{-9}$	$\text{m s}^{-1}$
$D_w$	$2.60 \cdot 10^{-9} (40^\circ\text{Brix})$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$D_s$	$0.28 \cdot 10^{-9} (40^\circ\text{Brix})$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$\rho$	950	$\text{kg m}^{-3}$
$C_{w \text{ ini}}$	0.8563	$\text{kg}_a \text{ kg}^{-1} \text{ b.h.}$
$C_{s \text{ ini}}$	0.135	$\text{kg}_{ss} \text{ kg}^{-1} \text{ b.h.}$
$C_{\text{insolubles}}$	0.01	$\text{kg}_{\text{insol}} \text{ kg}^{-1} \text{ b.h.}$
$L$ , Espesor	0.01	m
$d$ , Diámetro	0.06	m

\* Datos experimentales obtenidos en nuestros laboratorios (CIDCA).

Con respecto a los parámetros de ajuste del modelo, se puede considerar que tanto el coeficiente de transferencia de masa ( $kw$ ) como los coeficientes de difusión para el agua ( $D_w$ ) como para la sacarosa ( $D_s$ ) deben ajustarse de tal forma que permitan una correcta predicción de los valores experimentales (Spiazzi y Mascheroni, 1997). Agnelli y col. (2005) publicaron valores de coeficientes aparentes de difusión para el agua y sacarosa de  $1.25 \cdot 10^{-9}$  y  $0.1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  para discos de pera. Considerando los coeficientes de difusión obtenidos (Tabla 9) puede observarse que dichos valores son mayores que los publicados previamente en literatura, esto puede ser debido a la diferencias en la concentración de la solución osmótica utilizada en el trabajo previo (69°Brix).



**Figura 17.** Evolución del (a) concentración de agua y (b) sólidos solubles (-) predichos y (•) experimentales durante la deshidratación osmótica de medias rodajas de pera en solución de sacarosa a 40°Brix y temperatura constante de 30°C.

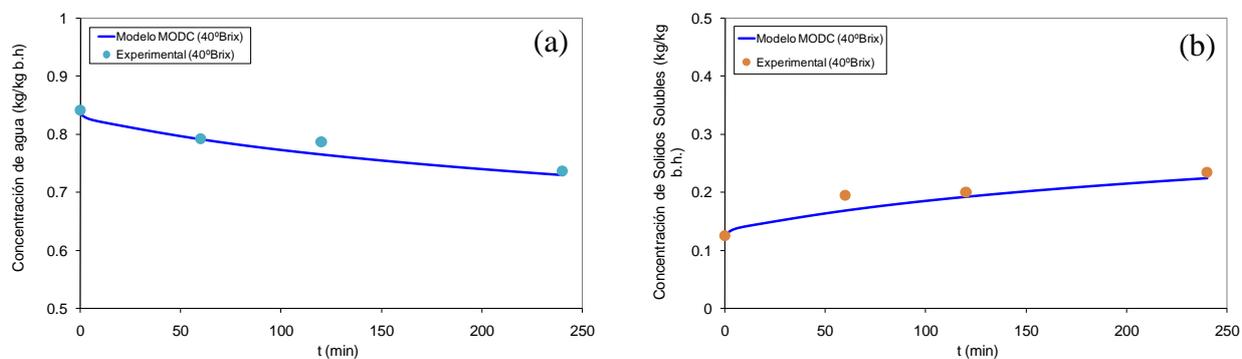
Las Figuras 17a y b muestran la variación del contenido de agua y sólidos solubles en función del tiempo y las predicciones del modelo durante 4h de deshidratación de medias rodajas de pera de 10mm de espesor en solución de sacarosa a 40°Brix. Las curvas de evolución de la humedad y sólidos solubles en función del tiempo durante la deshidratación osmótica de frutihortícolas en soluciones de azúcares presentan formas características, en donde en las primeras horas se produce una pérdida rápida de humedad y una alta incorporación de sólidos debido a la gran diferencia osmótica entre el tejido vegetal y la solución concentrada al inicio del proceso (Parjoko y col.,1996), que se manifiesta en una linealidad de las curvas a tiempos cortos. Posteriormente la velocidad de pérdida de agua va disminuyendo haciendo que la curva alcance un plateau, donde la velocidad de remoción de agua se hace nula. En dicho punto se considera que el producto ha alcanzado el equilibrio con la solución osmótica. Como puede observarse a partir de las Figuras 17a y b tanto la disminución del contenido de agua como el aumento de sólidos solubles en el alimento siguen una trayectoria lineal en función del tiempo. En el caso de

la curva de humedad esta funcionalidad lineal ocurre a partir de los 40s de proceso y en el caso de la evolución de la concentración de sólidos solubles a los 50s de deshidratación osmótica.

Considerando la calidad de la simulación, puede apreciarse una muy buena predicción de los valores de humedad (Figura 17a) así como de sólidos solubles (Figura 17b) durante las 4 horas de proceso.

#### 4.1.1.2.2. Aplicación del modelo Osmótico-Difusional Celular (MODC) a rodajas de kiwi.

Con el propósito de ampliar la validación se aplicó el modelo MODC a la deshidratación de rodajas de kiwi de 10mm de espesor en solución de sacarosa a 40°Brix durante 4 horas a temperatura constante de 30°C (Bianchi y col., 2011). La Tabla 10 resume los parámetros y propiedades necesarios para realizar las simulaciones.



**Figura 18.** Evolución del (a) contenido de agua y (b) sólidos solubles (-) predichos y (•) experimentales durante la deshidratación osmótica de rodajas de kiwi en solución de sacarosa a 40°Brix y temperatura constante de 30°C.

A partir de las Figuras 18a y b puede observarse que el modelo sigue la tendencia del proceso de deshidratación en relación a la evolución del contenido de agua y sólidos solubles, además puede apreciarse que predice adecuadamente los valores finales tanto de humedad como de sólidos solubles, presentando valores experimentales de humedad y sólidos solubles a las 4 horas de 0.763  $\text{kg}_{\text{agua}}.\text{kg}^{-1}$  b.h. y 0.235  $\text{kg}_{\text{ss}}.\text{kg}^{-1}$  b.h., respectivamente, y valores simulados de 0.730  $\text{kg}_{\text{agua}}.\text{kg}^{-1}$  b.h. y 0.224  $\text{kg}_{\text{ss}}.\text{kg}^{-1}$  b.h. (error<5%). A pesar de las discrepancias que se visualizan entre las simulaciones y los datos experimentales, especialmente a los 120 minutos en la curva de humedad y a los 60 minutos en la curva de sólidos solubles, se observa, en general, un buen ajuste del modelo a los datos experimentales.

En comparación con las predicciones obtenidas en peras a las 4 horas de proceso, pueden observarse diferencias en los valores finales tanto de humedad como de sólidos solubles, estas diferencias se ven reflejadas en los diferentes valores de difusividad para cada fruta. Esto puede ser debido a las grandes diferencias estructurales entre ambas, evidenciado por los valores de densidad,  $950 \text{ kg m}^{-3}$  para pera y  $1030 \text{ kg m}^{-3}$  para kiwi. En el caso de la pera se alcanza una humedad de 79.2% y en kiwi de 76.3% y sólidos solubles de 19.6% para pera y 23.5% para kiwi a las 4 horas de deshidratación osmótica.

Adicionalmente, puede observarse que el modelo predice adecuadamente los valores de humedad y sólidos solubles teniendo en cuenta las diferentes estructuras de los productos estudiados.

**Tabla 10.** Propiedades y parámetros para la simulación de la deshidratación osmótica de rodajas de kiwi.

Propiedades	Valor	Unidades
<i>Alimento</i>	Kiwi*	---
<i>Forma</i>	Rodaja	---
$kw$	$200 \cdot 10^{-9}$	$\text{m s}^{-1}$
$D_w$	$9.0 \cdot 10^{-9} \text{ (40°Brix)}$	$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$
$D_s$	$0.85 \cdot 10^{-9} \text{ (40°Brix)}$	$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$
$\rho$	1030	$\text{kg m}^{-3}$
$C_{w \text{ ini}}$	0.84206	$\text{kg}_a \text{ kg}^{-1} \text{ b.h.}$
$C_{s \text{ ini}}$	0.125	$\text{kg}_{\text{ss}} \text{ kg}^{-1} \text{ b.h.}$
$C_{\text{insolubles}}$	$3.29 \cdot 10^{-2}$	$\text{kg}_{\text{insol}} \text{ kg}^{-1} \text{ b.h.}$
$L$ , Espesor	0.010	m
$d$ , Diámetro	0.050	m

\*Datos experimentales extraídos de Bianchi y col. (2011).

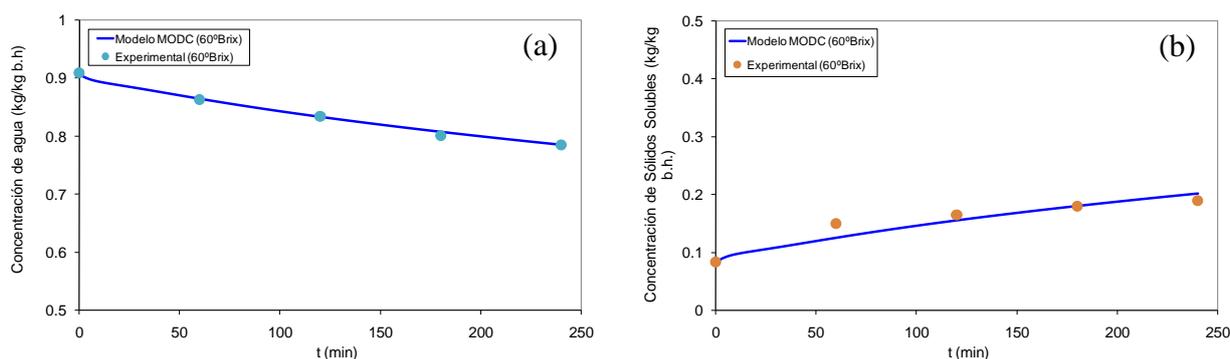
#### 4.1.1.2.3. Aplicación del modelo Osmótico-Difusional Celular (MODC) a rodajas de calabacita.

Finalmente se aplicó el modelo osmótico-difusional celular a la deshidratación osmótica de calabacita. Las muestras fueron sometidas a impregnación y deshidratación con solución de sacarosa a 60°Brix a temperatura constante de 30°C. Para la realización de las simulaciones fue requerida la información básica sobre las propiedades de la calabacita y los parámetros de ajuste del modelo, dicha información es resumida en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Propiedades y parámetros para la simulación de la deshidratación osmótica de rodajas de calabacita.

Propiedades	Valor	Unidades
<i>Alimento</i>	Calabacita*	---
<i>Forma</i>	Placa plana	---
$k_w$	$220 \cdot 10^{-9}$	$\text{m s}^{-1}$
$D_w$	$4.5 \cdot 10^{-9}$ (60°Brix)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$D_s$	$0.25 \cdot 10^{-9}$ (60°Brix)	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$\rho$	1040	$\text{kg m}^{-3}$
$C_{w \text{ ini}}$	0.909	$\text{kg}_a \text{kg}^{-1} \text{ b.h.}$
$C_{s \text{ ini}}$	0.083	$\text{kg}_{\text{ss}} \text{kg}^{-1} \text{ b.h.}$
$C_{\text{insolubles}}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$\text{kg}_{\text{insol}} \text{kg}^{-1} \text{ b.h.}$
$L$ , Espesor	0.010	m
$d$ , Diámetro	0.035	m

\*Datos experimentales obtenidos en nuestros laboratorios (CIDCA).



**Figura 19.** Evolución del (a) concentración de agua y (b) sólidos solubles (-) predichos y (•) experimentales durante la deshidratación osmótica de rodajas de calabacita en solución de sacarosa a 60°Brix y temperatura constante de 30°C.

Como puede observarse a partir de la Tabla 11, la calabacita presenta una humedad inicial del 90% y un contenido de sólidos solubles de 8%, estos valores difieren considerablemente de las dos frutas analizadas precedentemente. Como podría suponerse, estas diferencias generan una mayor pérdida de agua y un incremento en la incorporación de sólidos promovidos por la mayor fuerza impulsora para la deshidratación de la calabacita en comparación con kiwi y pera. En este mismo sentido puede mencionarse que la calabacita presenta una velocidad de pérdida de agua del 3% en comparación con 2.5% para kiwi y 1.5% para pera.

Observando la Figura 19, al igual que los casos anteriores, se puede apreciar una muy buena predicción de los valores finales (de humedad y sólidos solubles) del proceso demostrando que el modelo es capaz de reproducir el comportamiento de frutas y hortalizas durante la deshidratación osmótica.

El modelo MODC, a pesar de que permite buenas predicciones de los valores finales, presenta ciertas desventajas como el empleo de varios parámetros y propiedades (diámetro celular, número de células, porosidad, fracciones intracelulares y extracelulares) que son difíciles de averiguar o medir y además presenta 3 parámetros ajustables ( $k_w$ ,  $D_w$  y  $D_s$ ) que en muchos casos se alejan considerablemente de los valores correspondiente reportados en literatura. Con lo cual existe como alternativa abordar la problemática desde otro punto de vista abandonando la descripción celular y considerando los mecanismos netamente difusionales de transferencia de masa.

### 4.1.1.3. Predicción de Perfiles de Humedad y Sólidos Solubles aplicado a datos propios y de literatura utilizando modelo propuesto de MDFC

En esta sección se presentan los resultados de la validación del modelo difusional en flujo contracorriente (MDFC) el cual presenta las ventajas de menor complejidad en su planteo matemático y además tiene la particularidad de no presentar parámetros que necesiten ser ajustados para lograr una adecuada predicción de los datos experimentales.

#### 4.1.1.3.1. Aplicación del modelo Difusional en Flujo Contracorriente (MDFC) a medias rodajas de pera.

En la Tabla 12 se presentan los datos necesarios para realizar la simulación numérica (modelo MDFC) del proceso de deshidratación osmótica de medias de rodajas de peras en solución de sacarosa a 40°Brix.

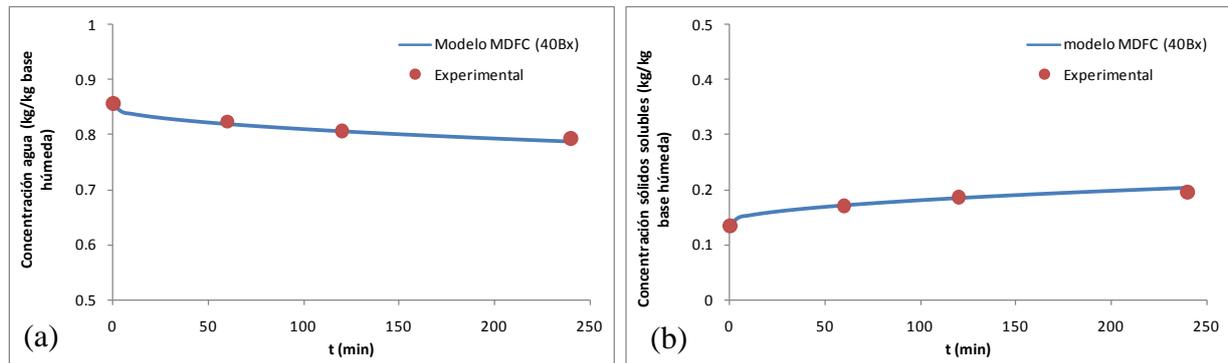
**Tabla 12.** Parámetros y propiedades de transporte para la simulación del proceso de deshidratación osmótica de pera\*

Parámetros/propiedades	Valores	Unidades
$\rho$ , Densidad fruta	950	kg m <sup>-3</sup>
$D_{w-s}$ , Coeficiente de difusión binario	<i>Matlab function</i> <sup>a</sup>	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
$T_{OD}$ , Temperatura solución osmótica	30	°C
$C_{sol}$ , Concentración solución osmótica	40	°Brix
$C_{w\ ini}$ , Humedad inicial de la muestra	0.855	kg <sub>a</sub> kg <sup>-1</sup> b.h.
$C_{s\ ini}$ , Concentración inicial sólidos solubles	0.135	kg <sub>ss</sub> kg <sup>-1</sup> b.h.
Forma	media rodaja	---
$d$ , Diámetro	0.06	m
$L$ , Espesor	0.01	m
$C_{w\ equi}$	0.67 <sup>b</sup>	kg <sub>a</sub> kg <sup>-1</sup> b.h.
$C_{s\ equi}$	0.25 <sup>b</sup>	kg <sub>ss</sub> kg <sup>-1</sup> b.h.

\* Datos experimentales obtenidos en nuestros laboratorios (CIDCA);

<sup>a</sup> Flourey y col. (2008);

<sup>b</sup> Obtenidos a partir de datos experimentales a 24hs de deshidratación.



**Figura 20.** Evolución del (a) contenido de agua y (b) sólidos solubles (-) predichos y (•) experimentales durante la deshidratación osmótica de medias rodajas de pera en solución de sacarosa a 40°Brix y temperatura constante de 30°C.

A partir de la Figura 20 puede apreciarse una excelente predicción de todos los valores de humedad y sólidos solubles hasta las 4 horas de deshidratación osmótica, presentando errores relativos promedios inferiores a 0.7% para los valores de humedad e inferiores a 3% para los sólidos solubles.

El modelo difusional en flujo contracorriente (MDFC) presenta una exactitud equivalente al modelo MODC sin embargo no presenta parámetros de ajuste con lo cual es más versátil y más amigable con el usuario. En adición utiliza una función predictiva (Ec. 69) para el cálculo del coeficiente efectivo de difusión ( $D_{w-s}$ ) en función de temperatura y de la concentración, dependiente fundamentalmente de la variación de la concentración de agua así como de sólidos solubles, permitiendo una mejor predicción de la evolución del proceso.

#### 4.1.1.3.2. Aplicación del modelo Difusional en Flujo Contracorriente (MDFC) a rodajas de kiwi

Del mismo modo que se realizó con el modelo MODC, el modelo difusional en flujo contracorriente (MDFC) fue aplicado a datos experimentales extraídos de literatura (Bianchi y col, 2011). En dicho trabajo se sometieron rodajas de kiwi a deshidratación osmótica con solución de sacarosa a 40°Brix a temperatura constante de 30°C. En la Tabla 13 se presentan los datos necesarios para la realización de las simulaciones del proceso.

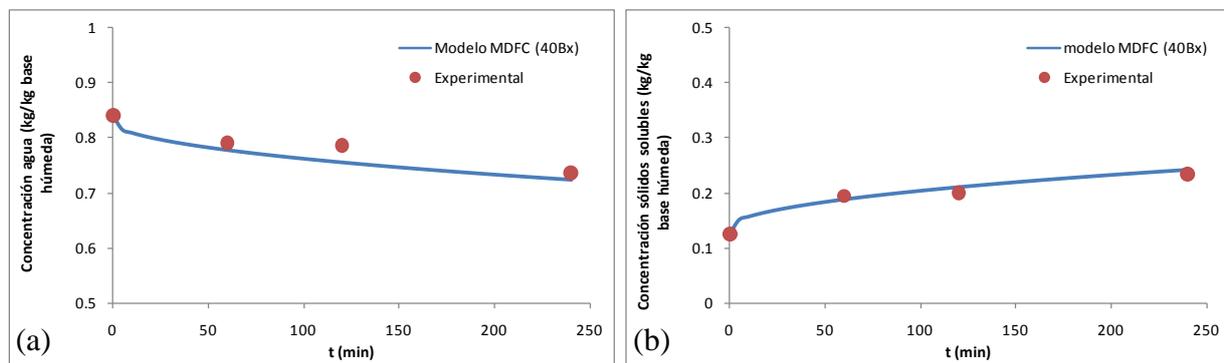
**Tabla 13.** Parámetros y propiedades de transporte para la simulación del proceso de deshidratación osmótica de kiwi\*

Parámetros/propiedades	Valores	Unidades
$\rho$ , Densidad fruta	1030	$\text{kg m}^{-3}$
$D_{w-s}$ , Coeficiente de difusión binario	<i>Matlab function</i> <sup>a</sup>	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$T_{OD}$ , Temperatura solución osmótica	30	$^{\circ}\text{C}$
$C_{sol}$ , Concentración solución osmótica	40	$^{\circ}\text{Brix}$
$C_{w\ ini}$ , Humedad inicial de la muestra	0.842	$\text{kg}_a \text{kg}^{-1} \text{b.h.}$
$C_{s\ ini}$ , Concentración inicial sólidos solubles	0.125	$\text{kg}_{ss} \text{kg}^{-1} \text{b.h.}$
Forma	placa plana	---
$d$ , Diámetro	0.05	m
$L$ , Espesor	0.01	m
$C_{w\ equi}$	0.61 <sup>b</sup>	$\text{kg}_a \text{kg}^{-1} \text{b.h.}$
$C_{s\ equi}$	0.38 <sup>b</sup>	$\text{kg}_{ss} \text{kg}^{-1} \text{b.h.}$

\*Datos experimentales extraídos de Bianchi y col. (2011);

<sup>a</sup> Flourey y col. (2008);

<sup>b</sup> Obtenidos a partir de datos experimentales de Bianchi y col. (2011).



**Figura 21.** Evolución del (a) contenido de agua y (b) sólidos solubles (-) predichos y (•) experimentales durante la deshidratación osmótica de rodajas de kiwi en solución de sacarosa a  $40^{\circ}\text{Brix}$  y temperatura constante de  $30^{\circ}\text{C}$ .

Las Figuras 21a y b muestran los datos experimentales de contenido de agua y sólidos solubles en función del tiempo de proceso y los datos simulados utilizando el modelo MDFC. En el caso de las predicciones de los valores de humedad pueden observarse que estas son comparables a los valores obtenidos por el modelo MODC, presentando errores relativos promedio inferiores 0.5%. Sin embargo, observando la Figura 21b, puede apreciarse claramente que el modelo

difusional propuesto (MDFC) logró seguir con mayor exactitud la evolución de la incorporación de sólidos. Esta mejora en las simulaciones puede ser debido a la funcionalidad del coeficiente de difusión con la concentración de sólidos solubles del producto.

#### 4.1.1.3.3. Aplicación del modelo Difusional en Flujo Contracorriente (MDFC) a rodajas de calabacita.

Para ampliar el análisis del modelo propuesto difusional de flujo contracorriente, también se validó contra datos experimentales de calabacita. En la Tabla 14 se presentan los parámetros y propiedades para el modelado matemático del proceso.

**Tabla 14.** Parámetros y propiedades de transporte para la simulación del proceso de deshidratación osmótica de calabacita\*

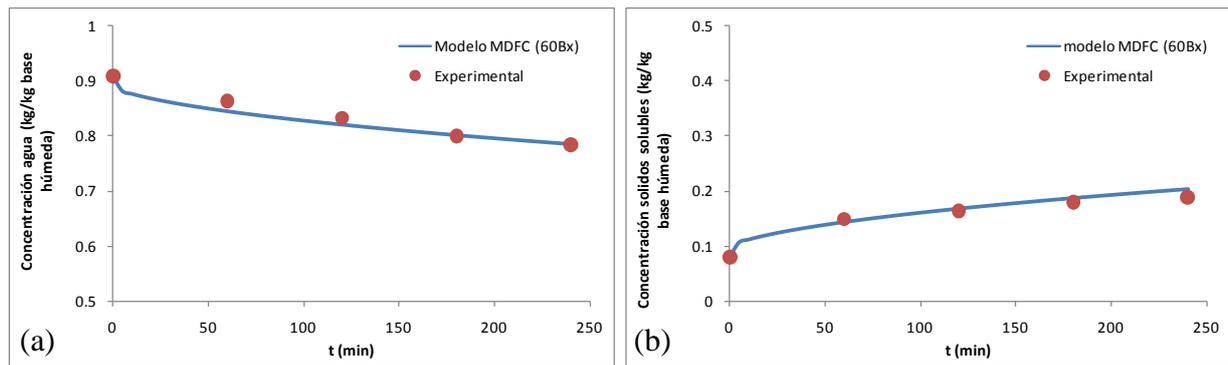
Parámetros/propiedades	Valores	Unidades
$\rho$ , Densidad fruta	1030	kg m <sup>-3</sup>
$D_{w-s}$ , Coeficiente de difusión binario	<i>Matlab function</i> <sup>a</sup>	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
$T_{OD}$ , Temperatura solución osmótica	30	°C
$C_{sol}$ , Concentración solución osmótica	60	°Brix
$C_{w\ ini}$ , Humedad inicial de la muestra	0.91	kg <sub>a</sub> kg <sup>-1</sup> b.h.
$C_{s\ ini}$ , Concentración inicial sólidos solubles	0.08	kg <sub>ss</sub> kg <sup>-1</sup> b.h.
Forma	placa plana	---
$d$ , Diámetro	0.035	m
$L$ , Espesor	0.01	m
$C_{w\ equi}$	0.40 <sup>b</sup>	kg <sub>a</sub> kg <sup>-1</sup> b.h.
$C_{s\ equi}$	0.23 <sup>c</sup>	kg <sub>ss</sub> kg <sup>-1</sup> b.h.

\*Datos experimentales obtenidos en nuestros laboratorios (CIDCA);

<sup>a</sup> Flourey y col. (2008);

<sup>b</sup> Determinado considerando en equilibrio con la solución osmótica a 60°Brix;

<sup>c</sup> Determinado experimentalmente.



**Figura 22.** Evolución del (a) contenido de agua y (b) sólidos solubles (-) predichos y (•) experimentales durante la deshidratación osmótica de rodajas de calabacita en solución de sacarosa a 60°Brix y temperatura constante de 30°C.

Observando las Figuras 22a y b puede apreciarse que las predicciones del modelo son comparables en relación a la evolución de la pérdida de agua, pero mejoraron las predicciones de la ganancia de sólidos en comparación con las simulaciones utilizando el modelo celular. Este hecho sugiere que el empleo de modelos celulares se debe realizar cuando se conocen con precisión los parámetros necesarios como  $k_w$ ,  $D_w$ ,  $D_s$ , número de células, fracción de volumen celular y extracelular, porosidad, etc., cuando esto no ocurre abordar la solución en forma difusional podría ser más adecuado para reducir los errores de predicción.

Adicionalmente podemos mencionar que el modelo propuesto se adaptó correctamente a las diferentes formas y tamaños de las muestras. Y la suposición de placa plana funcionó con adecuada exactitud para las distintas configuraciones simuladas.

Por último es importante mencionar que el modelo es sensible a los valores de equilibrio  $C_{w\text{ equi}}$  y  $C_{s\text{ equi}}$  ya que en el planteo se supone condiciones de contorno de concentración prescrita, con lo cual se deben disponer de estos valores a partir de estudios experimentales previos o empleando modelos empíricos como el modelo de Azuara.

### 4.1.2. Validación del modelo de deshidratación con microondas

Para la predicción de los perfiles de temperatura y humedad se empleará el modelo de deshidratación con microondas desarrollado en la sección 2.2.2 y cuya resolución matemática fue presentada en la sección 2.3.3.

#### 4.1.2.1. Predicción de Perfiles de Temperatura y Humedad aplicado a datos propios

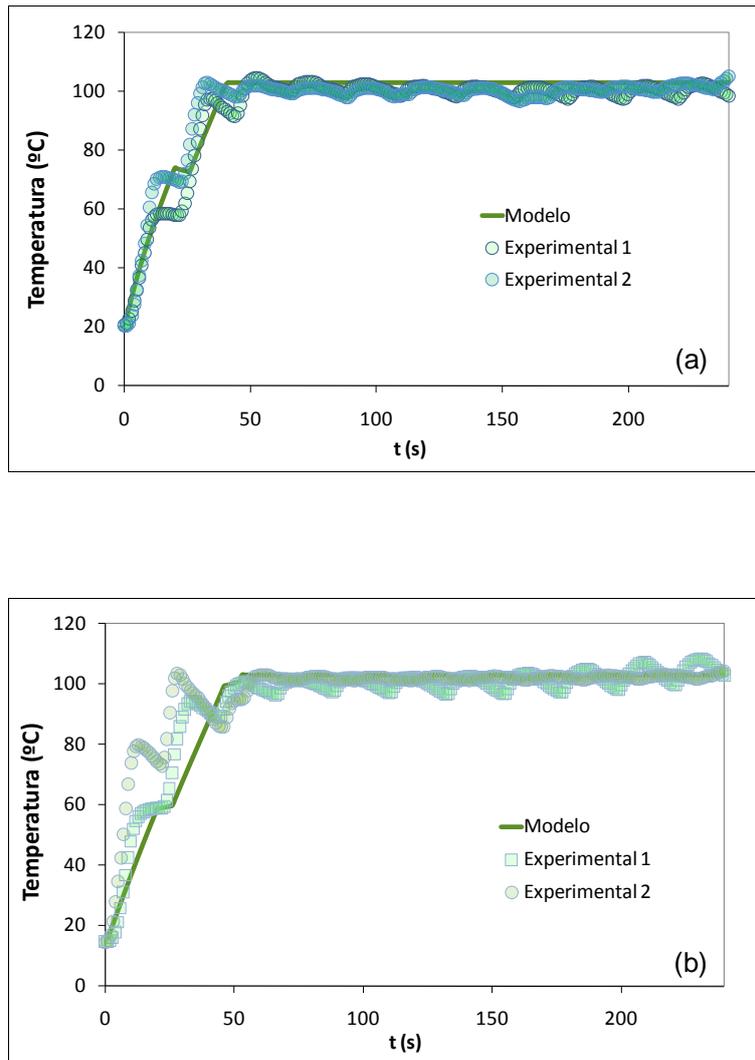
##### 4.1.2.1.1. Aplicación del modelo de Deshidratación con Microondas (MDMO) a rodajas de pera

En la Tabla 15 se resumen las propiedades y parámetros necesarios para el modelado matemático de la deshidratación con microondas aplicado a rodajas de pera.

**Tabla 15.** Parámetros y propiedades para el modelado de la deshidratación con microondas de pera fresca.

Propiedades/parámetros	Valores	Unidades
$\rho$ , Densidad del alimento	1023 <sup>a</sup>	kg m <sup>-3</sup>
$K$ , Conductividad térmica	0.595 <sup>b</sup>	W m <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup>
$C_p$ , Capacidad calorífica	3600 <sup>b</sup>	J kg <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup>
$D_w$ , Coeficiente difusión	2.6 10 <sup>-10</sup> <sup>c</sup>	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
$\alpha$ , Factor de atenuación	63.29-0.751 T+4.2 10 <sup>-3</sup> T <sup>2</sup>	adimensional
$\epsilon'$ , Constante dieléctrica	71.06-0.052 T-8.3 10 <sup>-4</sup> T <sup>2</sup> <sup>d</sup>	adimensional
$\epsilon''$ , Factor de pérdida	20.95-0.25 T+1.4 10 <sup>-3</sup> T <sup>2</sup> <sup>d</sup>	adimensional
$\alpha_d$ ( $C_w \leq 0.224$ )	1.4671 $C_w$ 100, $R^2=0.9991$ <sup>e</sup>	adimensional
$\alpha_d$ ( $C_w > 0.224$ )	40.932-0.0943 $C_w$ 100, $R^2=0.9997$ <sup>e</sup>	adimensional
$T_{eq}$ , Temperatura equilibrio	101	°C
$T_a$ , Temperatura aire	15	°C
Forma	placa plana	---
$d$ , Diámetro	0.055	m
$L$ , Espesor	0.015	m
$V$ , Volumen	3.56 10 <sup>-05</sup>	m <sup>3</sup>
Peso inicial muestra	36	g
$P_o$ , Potencia microondas	500	W
$C_{w\ ini}$ , Humedad inicial	0.86	kg <sub>a</sub> kg <sup>-1</sup> b.h.
$C_{eq}$ , Humedad de equilibrio	0.3657 <sup>f</sup>	kg <sub>a</sub> kg <sup>-1</sup> b.s.
$HR$ , Humedad relativa	0.75	kg <sub>a</sub> kg <sup>-1</sup> b.h.

a Sweet (1974); b Polley y col. (1980); c Roman y col (1979); d Sipahioglu y Barringer (2003);  
 e Regresión de los datos experimentales obtenidos por Feng y col. (2002);  
 f Iglesias y Chirife (1982).



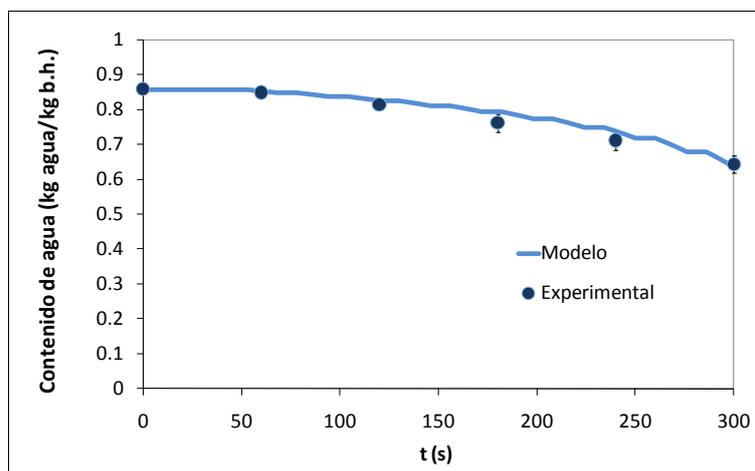
**Figura 23.** Temperaturas predichas (líneas) y experimentales (símbolos) en función del tiempo durante la deshidratación con microondas. a) Temperaturas superficie, b) Temperaturas centro. (Densidad de potencia microondas 9.11W/g, modo on-off).

La Figura 23 muestra las historias térmicas predichas y experimentales de la superficie y el centro de una placa de pera durante la prueba representativa de DMO. La existencia de las dos etapas diferentes asumidas en el modelo matemático puede ser observada: la etapa de calentamiento hasta  $T_{equi}$  es alcanzada y luego el período de temperatura constante. Un tercer período de sobrecalentamiento de la muestra seca no fue observado, porque los experimentos fueron detenidos antes que ocurra. Esta tercera etapa sucede cuando la energía necesaria para la vaporización es menor que la energía térmica convertida a partir de las microondas; la temperatura local entonces puede elevarse por encima de la temperatura evaporación del agua.

Este incremento continuo de la temperatura resulta en un sobrecalentamiento indeseable y la carbonización del alimento secado y debe ser evitado (Lu y col., 1999).

A partir de la Figura 23 está claro que la Ley de Lambert predice que durante la primera etapa el centro es el punto más frío mientras que la superficie es el punto más caliente, de acuerdo con el decaimiento exponencial de la potencia absorbida desde la superficie hacia el interior del alimento. Con respecto a las predicciones numéricas una buena concordancia es conseguida, las desviaciones podrían ser principalmente atribuidas a inexactitudes en la posición del sensor dentro del alimento (cerca del centro).

La Figura 24 presenta los valores experimentales y predichos de humedad en función del tiempo de proceso. Dos periodos de secado pueden ser distinguidos: (1) un período de secado, en el cual la energía de las microondas es convertida en energía térmica dentro del material húmedo, y la temperatura del producto aumenta sin evaporación significativa de agua, y (2) periodo de secado rápido durante el cual el perfil de temperatura constante se establece y la energía de las microondas es usada para la vaporización del agua. La pérdida de peso en el primer periodo (cerca de los 55s en estos experimentos) es muy baja; esto valida la suposición de evaporación leve hecha en la formulación del modelo para la primera etapa del secado con microondas. Posteriormente, un aumento marcado de velocidad de secado es observado permitiendo en solo 5 minutos disminuir la humedad inicial en un 25% aproximadamente.



**Figura 24.** Humedad predicha y experimental en función del tiempo durante la deshidratación con microondas de pera (Densidad de potencia microondas 9.11W/g, modo on-off).

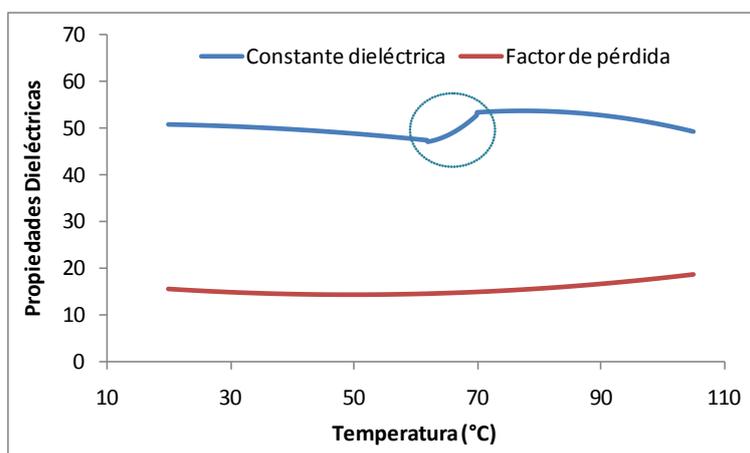
#### 4.1.2.2. Predicción de Perfiles de Temperatura y Humedad aplicado a datos extraídos de literatura

##### 4.1.2.2.1. Aplicación del modelo de Deshidratación con Microondas (MDMO) a rodajas de papa

###### 4.1.2.2.1.1. Densidad de potencia 5.47W/g y temperatura del aire 18°C

El modelo matemático MDMO fue aplicado a datos experimentales de deshidratación con microondas de papa. Las experiencias se realizaron en un horno microondas de 700W de potencia nominal y la temperatura del aire fue de 18°C, las muestras analizadas correspondieron a placas de papa de 15mm de espesor (Bouraoui y col, 1994). Los parámetros del proceso y las propiedades físicas y electromagnéticas del alimento que fueron usadas en el modelado matemático se muestran en la Tabla 16.

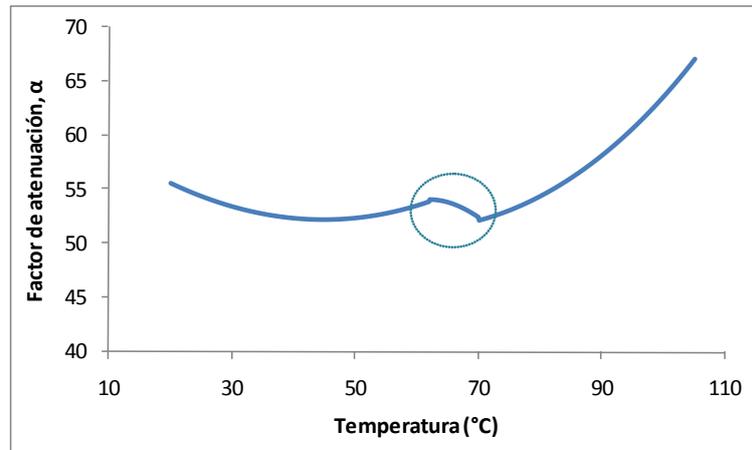
En el caso particular de la papa, las propiedades dieléctricas deben ser evaluadas en forma especial, teniendo en cuenta las modificaciones que experimenta el alimento debido al cambio de estructura del almidón como resultado del procesamiento térmico (Sipahioglu & Barringer, 2003). La Figura 25 muestra la variación de la constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ) y el factor de pérdida ( $\epsilon''$ ) con el aumento de la temperatura. Observando la curva de la constante dieléctrica, puede apreciarse claramente una discontinuidad entre los 62 a los 70°C debido al fenómeno mencionado anteriormente.



**Figura 25.** Variación de las propiedades dieléctricas de papa con la temperatura (Frecuencia microondas aplicada 2450MHz). (Datos extraídos de Sipahioglu & Barringer, 2003).

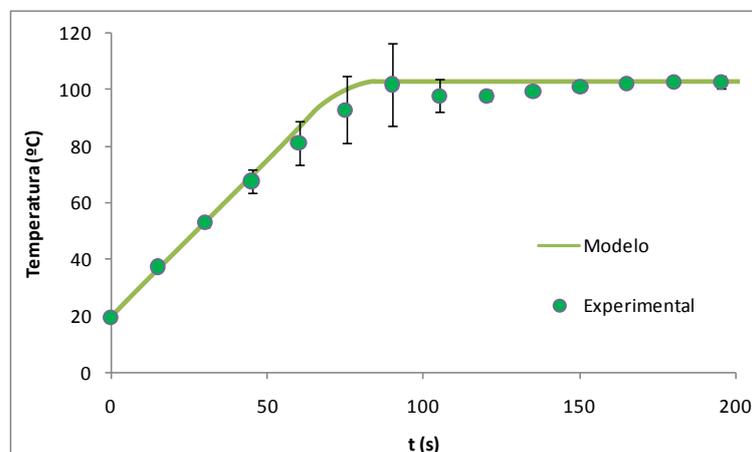
A partir de los datos experimentales de la constante dieléctrica y factor de pérdida en función de la temperatura, se calculó el factor de atenuación ( $\alpha$ ) y se obtuvieron las ecuaciones predictivas de  $\alpha$  para cada rango específico de temperaturas (Figura 26). Las ecuaciones obtenidas del factor

de atenuación en función de temperatura (Tabla 16) fueron incorporadas en el código computacional para la realización de las simulaciones.



**Figura 26.** Variación del factor de atenuación de papa con la temperatura (Frecuencia microondas aplicada 2450MHz).

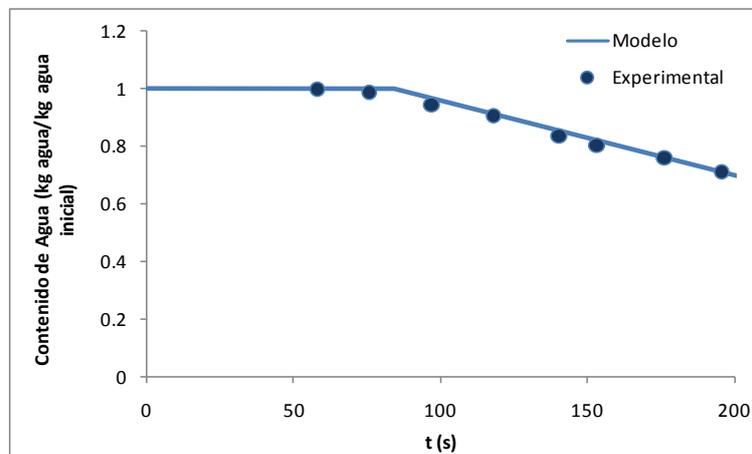
Se simularon los perfiles de humedad y temperatura durante 200s y se los compararon contra datos experimentales de humedad y temperatura. Las Figuras 27 y 28 muestran las historias térmicas y la evolución de humedad experimental y simulada durante la deshidratación con microondas de papa.



**Figura 27.** Temperatura predicha y experimental durante la deshidratación con microondas de papa (Densidad de potencia microondas 5.47W/g y temperatura aire 18°C). (Datos experimentales extraídos de Bouraoui y col., 1994).

Se puede observar que las temperaturas medias experimentales (Figura 27) obtenidas por Bouraoui y col., (1994) mantienen la suposición realizada previamente de la existencia de dos etapas en la deshidratación con microondas. Una primera etapa de calentamiento rápido hasta los 83s puede verificarse y luego la temperatura se mantiene constante ( $T_{equi}$ ) durante los siguientes 120s.

Con respecto a la evolución de la humedad (Figura 28), puede observarse del mismo modo las dos etapas bien diferenciadas, una etapa inicial en la cual la vaporización es leve o casi nula, y una segunda etapa en la cual la vaporización es intensa. Puede verse claramente que el modelo matemático desarrollado simula con buena exactitud las dos etapas mencionadas logrando una adecuada predicción de los tiempos de deshidratación.



**Figura 28.** Humedad predicha y experimental durante la deshidratación con microondas de papa (Densidad de potencia microondas 5.47W/g y temperatura aire 18°C). (Datos experimentales extraídos de Bouraoui y col., 1994).

**Tabla 16.** Parámetros y propiedades para el modelado de la deshidratación con microondas de papas<sup>a,b</sup>

Propiedades/parámetros	Valores	Unidades
$\rho$ , Densidad	1085 <sup>c</sup>	kg m <sup>-3</sup>
$K$ , Conductividad térmica	0.6835 <sup>c</sup>	W m <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup>
$C_p$ , Capacidad calorífica	3600 <sup>c</sup>	J kg <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup>
$D$ , Difusividad de agua	3.07 10 <sup>-10</sup> <sup>d</sup>	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
$\alpha$ (T<62.7815)	63.2884-0.4919 T+0.0055 T <sup>2</sup>	adimensional
$\alpha$ (62.78<T<70.06)	-37.2846+2.9674 T-0.0241 T <sup>2</sup>	adimensional
$\alpha$ (T>70.06)	81.0523-0.9642 T+0.0079 T <sup>2</sup>	adimensional
$\varepsilon'$ (T<62.7815)	50.7697+0.0263 T-0.0013 T <sup>2</sup> <sup>e</sup>	adimensional
$\varepsilon'$ (62.78<T<70.06)	267.0001-7.3227 T+0.0609 T <sup>2</sup> <sup>e</sup>	adimensional
$\varepsilon'$ (T>70.06)	18.8947+0.8982 T-0.0058 T <sup>2</sup> <sup>e</sup>	adimensional
$\varepsilon''$	17.79-0.1357 T+0.001370 T <sup>2</sup> <sup>e</sup>	adimensional
$\alpha_d$	43	adimensional
$T_{ini}$ , Temperatura inicial	20	°C
$T_{equi}$ , Temperatura equilibrio	103	°C
$T_a$ , Temperatura del aire	18	°C
$v$ , Velocidad del aire	0.51	m s <sup>-1</sup>
Forma	Placa plana	---
$d$ , Diámetro	0.05	m
$L$ , Espesor	0.015	m
$V$ , Volumen	2.95 10 <sup>-05</sup>	m <sup>3</sup>
Peso inicial muestra	31.956	g
$P_o$ , Potencia microondas	140 <sup>a</sup> - 175 <sup>b</sup>	W
$Y_o$ , Humedad inicial	0.7519	kg <sub>a</sub> kg <sup>-1</sup> b.h.
$HR$ , Humedad relativa	0.65	kg <sub>a</sub> kg <sup>-1</sup> b.h.
$Y_{equi}$ , Humedad equilibrio	0.012	kg <sub>a</sub> kg <sup>-1</sup> b.s.

<sup>a</sup> Datos experimentales extraídos de Durance y Yaghmaee (2011);

<sup>b</sup> Datos experimentales extraídos de Bouraoui y col. (1994);

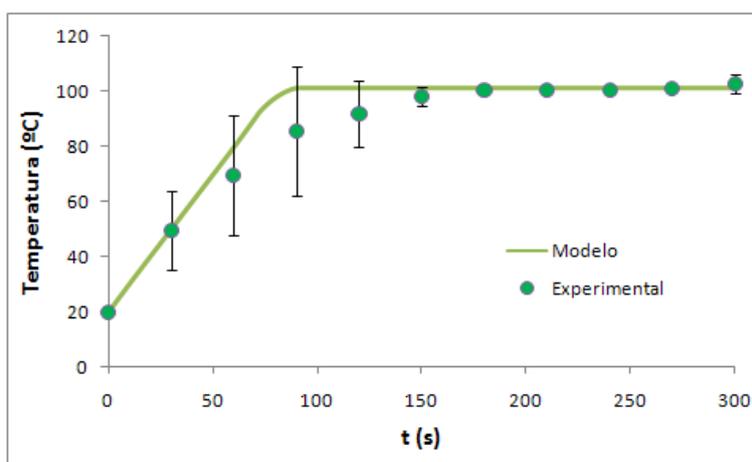
<sup>c</sup> Lamberg y Hallstrom (1986);

<sup>d</sup> Srikiatdena y Roberts (2008);

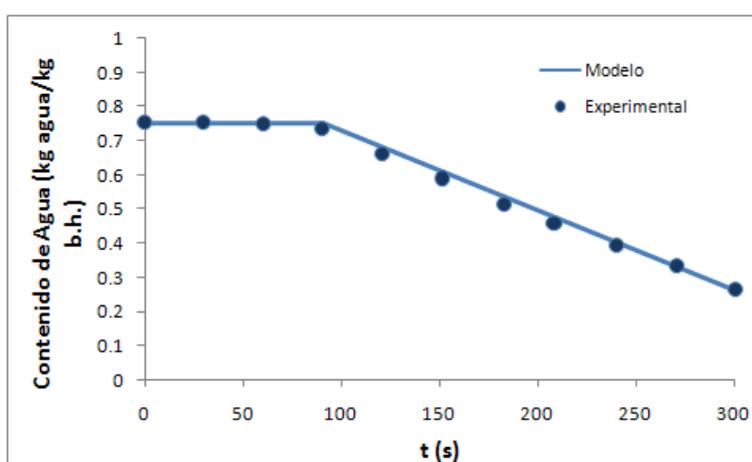
<sup>e</sup> Sipahioglu y Barringer (2003).

#### 4.1.2.2.1.2. Densidad de potencia 4.38W/g y temperatura del aire 18°C

Adicionalmente se aplicó el modelo MDMO al proceso de deshidratación de papa, la cual fue sometida a una densidad de potencia de microondas de 4.38W/g durante 300s. Se simularon los perfiles de humedad y temperatura y se los compararon contra datos experimentales de contenido de agua y temperatura promedio a cada tiempo de procesamiento (Durance y Yaghmaee, 2011). Las Figuras 29 y 30 muestran las historias térmicas y la evolución de humedad experimental y simulada durante la deshidratación con microondas de papa. La Tabla 16 muestra los parámetros y propiedades necesarios para la realización de las simulaciones.



**Figura 29.** Temperatura predicha y experimental durante la deshidratación con microondas de placas de papa (Densidad de potencia 4.38W/g y temperatura del aire de 18°C). (Datos experimentales extraídos de Durance y Yaghmaee, 2011).



**Figura 30.** Humedad predicha y experimental durante la deshidratación con microondas de placas de papa (Densidad de potencia 4.38W/g y temperatura del aire de 18°C). (Datos experimentales extraídos de Durance y Yaghmaee, 2011).

Analizando el tiempo necesario para alcanzar la temperatura de equilibrio, la Figura 29 muestra que a partir de los 90s parte del alimento comenzó la vaporización intensa. Dicho efecto es confirmado por la evolución de la humedad (Figura 30) la cual muestra que a partir de los 90s la velocidad de evaporación aumenta considerablemente manteniéndose hasta los 300s.

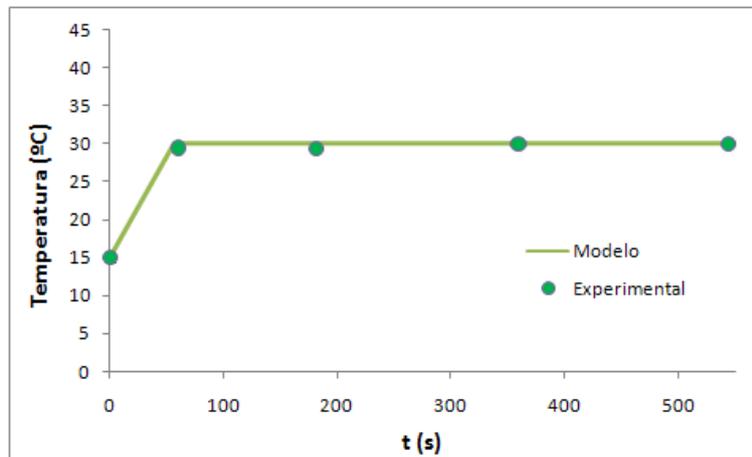
Con respecto a la aplicación del modelo matemático a los datos experimentales se puede ver (Figura 29) que hasta los 50s se predice adecuadamente la curva de temperaturas medias y posteriormente se desvía sensiblemente hasta los 150s. Estas desviaciones entre las simulaciones y los datos experimentales pueden ser debidas a la aparición de puntos calientes o fríos dentro del alimento, producidos por una distribución no homogénea del campo electromagnético generado por la aplicación de las microondas. A pesar de estas desviaciones en la predicción de los perfiles de temperatura, las simulaciones de la disminución de la humedad con respecto al tiempo (Figura 30) siguen con muy buena exactitud la evolución del proceso de deshidratación.

En adición, considerando el efecto de la densidad de potencia de microondas, puede observarse comparando las Figuras 27 y 29, que las simulaciones predicen adecuadamente la modificación en los perfiles de temperatura debido al efecto del aumento de la densidad de potencia de microondas de 4.38W/g (Figura 29) a 5.48W/g (Figura 27). Como resultado el tiempo necesario para alcanzar la temperatura de equilibrio fueron de 90s y 82s, respectivamente. Mostrando, como podía suponerse, que a mayor densidad de potencia mayor velocidad de calentamiento.

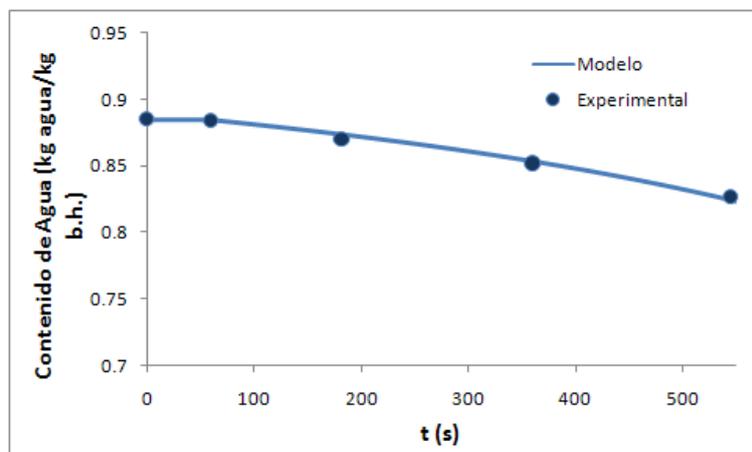
#### 4.1.2.2.2. Aplicación del modelo de Deshidratación con Microondas (MDMO) a rodajas de zanahoria (Temperatura aire 30°C – vacío – 2.95W/g)

La Tabla 17 muestra los parámetros y propiedades necesarias para la aplicación del modelo matemático a la deshidratación con microondas de zanahoria. Las experiencias se realizaron en un horno microondas de 359W de potencia nominal y la temperatura del aire fue de 30°C, las muestras analizadas correspondieron a placas de 4mm de espesor. Simultáneamente al proceso térmico, las muestras fueron sometidas a una presión de vacío de 50mbar (Cui y col., 2005).

De esta manera se obtuvieron los perfiles de humedad y temperatura para 550s y se los compararon contra curvas experimentales de humedad y temperatura. Las Figuras 31 y 32 muestran las historias térmicas y la evolución de humedad experimental y simulada durante la deshidratación con microondas de zanahoria con aplicación de vacío.



**Figura 31.** Temperatura predicha y experimental durante la deshidratación con microondas de placas de zanahoria (Densidad de potencia 2.95W/g y temperatura del aire de 30°C). (Datos experimentales extraídos de Cui y col., 2005).



**Figura 32.** Humedad predicha y experimental durante la deshidratación con microondas de placas de zanahoria (Densidad de potencia 2.95W/g y temperatura del aire de 30°C). (Datos experimentales extraídos de Cui y col., 2005).

Como puede apreciarse de la Figura 31 la temperatura de equilibrio se estableció en 30°C, esto es debido a la presión de vacío aplicada, la cual produce una reducción muy importante en el punto de ebullición de agua. En consecuencia, la temperatura a la cual comenzó el proceso de vaporización intensa descendió dramáticamente de 103°C en pera y papa deshidratada a presión atmosférica a 30°C con la aplicación de vacío en zanahoria. Considerando la calidad de las

predicciones puede observarse que el modelo se adaptó satisfactoriamente a las condiciones de vacío establecidas y los perfiles de temperatura siguieron con total exactitud la evolución de los datos experimentales hasta los 550s. Del mismo modo puede apreciarse a partir de la Figura 32 que las simulaciones de la evolución de la humedad predicen con exactitud los datos experimentales de humedad obtenidos por Cui y col. (2005).

**Tabla 17.** Parámetros y propiedades para el modelado de la deshidratación con microondas de zanahoria\*

Propiedades/parámetros	Valores	Unidades
$\rho$ , Densidad	1079 <sup>a</sup>	kg m <sup>-3</sup>
$K$ , Conductividad térmica	0.552 <sup>a</sup>	W m <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup>
$C_p$ , Capacidad calorífica	3792 <sup>a</sup>	J kg <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup>
$\alpha$ , Factor de atenuación	63.4587-0.2775 T+0.0054 T <sup>2</sup> <sup>b</sup>	adimensional
$\epsilon'$ , Constante dieléctrica	77.94-0.2068 T <sup>b</sup>	adimensional
$\epsilon''$ , Factor de pérdida	21.68-0.1040 T+0.0016 T <sup>2</sup> <sup>b</sup>	adimensional
$\alpha_d$ , Factor de atenuación deshidratado	90	adimensional
$T_{equi}$ , Temperatura equilibrio	30	°C
$P$ , Presión	30	mbar
$T_a$ , Temperatura aire	30	°C
$v$ , Velocidad aire	1	m s <sup>-1</sup>
Forma	placa plana	---
$d$ , Diámetro	0.04	m
$L$ , Espesor	0.004	m
$V$ , Volumen	5.0310 <sup>-06</sup>	m <sup>3</sup>
Peso inicial muestra	5.424	g
$P_o$ , Potencia microondas	16	W
$C_{w\ ini}$ , Humedad inicial	0.8848	kg <sub>a</sub> kg <sup>-1</sup> b.h.
$HR$ , Humedad relativa	0.62	kg <sub>a</sub> kg <sup>-1</sup> b.h.

\*Datos experimentales extraídos de Cui y col. (2005);

<sup>a</sup> Srikiatdena y Roberts (2008);

<sup>b</sup> Sipahioglu y Barringer (2003).

#### 4.1.2.2.3. Aplicación del modelo de Deshidratación con Microondas (MDMO) a rodajas de manzana (temperatura aire 40°C - vacío – 10W/g)

Se aplicó el modelo MDMO para simular la evolución de la humedad durante la deshidratación con microondas de manzanas. Bilbao-Sáinz y col. (2006) experimentaron con manzanas de 20mm de espesor, las cuales fueron sometidas a un procesamiento térmico en un horno de microondas especialmente diseñado aplicando una densidad de potencia de 10W/g, con circulación de aire de 1m/s y 40°C.

En la Tabla 18 se muestran las variables del proceso y las propiedades físicas y electromagnéticas del alimento que fueron usadas en el modelado matemático.

**Tabla 18.** Parámetros y propiedades para el modelado de la deshidratación con microondas de manzana\*

Parámetros/propiedades	Valores	Unidades
$\rho$ , Densidad	840 <sup>a</sup>	kg m <sup>-3</sup>
$K$ , Conductividad térmica	0.513 <sup>a</sup>	W m <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup>
$C_p$ , Capacidad calorífica	3843 <sup>b</sup>	kJ kg <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup>
$\alpha$ , Factor de atenuación	55.0801-0.7587 T+0.0044 T <sup>2</sup> <sup>c</sup>	adimensional
$\epsilon'$ , Constante dieléctrica	64.63-0.05240 T-0.0005831 T <sup>2</sup> <sup>c</sup>	adimensional
$\epsilon''$ , Factor de pérdida	17.23-0.2407 T+0.001348 T <sup>2</sup> <sup>c</sup>	adimensional
$\alpha_d$ , Factor de atenuación deshidratado	40.932-0.0943 C <sub>w</sub> 100 <sup>d</sup>	adimensional
$T_{equi}$ , Temperatura equilibrio	40	°C
$T_a$ , Temperatura aire	40	°C
$v$ , Velocidad aire	1	m s <sup>-1</sup>
$L$ , Espesor	0.02	m
$V$ , Volumen	6.28 10 <sup>-06</sup>	m <sup>3</sup>
Peso inicial de la muestra	6.095	g
Densidad de potencia de microondas	10	W/g
$C_{w\ ini}$ , Humedad inicial	0.85	kg <sub>a</sub> kg <sup>-1</sup> b.h.
$HR$ , Humedad relativa	0.62	kg <sub>a</sub> kg <sup>-1</sup> b.h.

\*Datos experimentales extraídos de Bilbao-Sáinz y col. (2006);

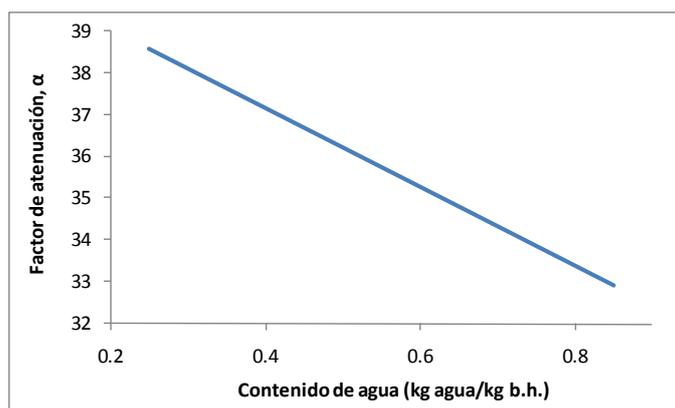
<sup>a</sup> Sweat (1974);

<sup>b</sup> Martínez-Monzó y col. (2000);

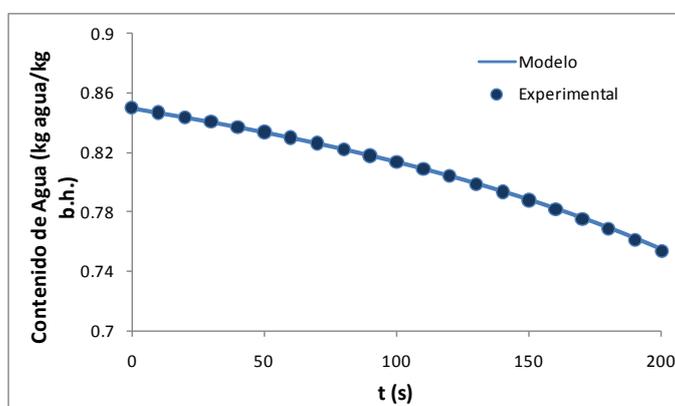
<sup>c</sup> Sipahioglu y Barringer (2003);

<sup>d</sup> Feng y col. (2002).

Con el propósito de lograr una mejor calidad de las simulaciones se incorporó la funcionalidad de las propiedades dieléctricas con la humedad para la etapa de vaporización intensa (Tabla 18). Las variaciones del factor de atenuación ( $\alpha_d$ ) con la humedad se presentan en la Figura 33. Como puede observarse a medida que disminuye el contenido de agua del alimento el factor de atenuación aumenta, disminuyendo de esta manera la capacidad del alimento de transformar las microondas en calor.



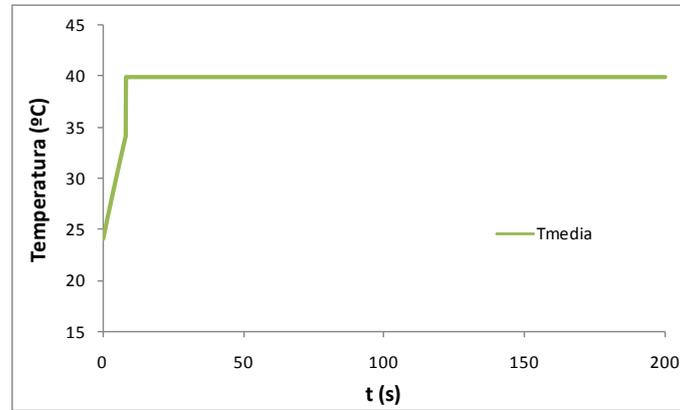
**Figura 33.** Variación del factor de atenuación de manzana con la humedad, para valores de humedad superiores a 23% (Frecuencia microondas aplicada 2.45GHz). (Datos extraídos de Sipahioglu & Barringer, 2003)



**Figura 34.** Humedad predicha y experimental durante la deshidratación con microondas de placas de manzana (Densidad de potencia 10W/g, temperatura del aire de 40°C y velocidad del aire de 1m/s). (Datos experimentales extraídos de Bilbao-Sáinz y col., 2006).

Las Figuras 34 y 35 presentan los valores experimentales y predichos de humedad y valores simulados de temperatura en función del tiempo de proceso. Puede observarse una muy buena predicción de la variación de la humedad en el tiempo. En este caso particular no se visualizaron

las dos etapas de la deshidratación con microondas, esto puede ser debido a la alta densidad de potencia utilizada (10 W/g) combinado con la aplicación de vacío en los primeros minutos de proceso.



**Figura 35.** Temperatura modelada durante la deshidratación con microondas de placas de manzana (Densidad de potencia 10W/g, temperatura del aire de 40°C y velocidad del aire de 1m/s).

### 4.1.3. Validación del modelo combinado de deshidratación osmótica seguida de la deshidratación con microondas

Para la predicción de los perfiles de humedad y temperatura durante el proceso de deshidratación combinada (osmótica-microondas) se emplearán los modelos difusional en flujo contracorriente (MDFC) y el modelo de deshidratación con microondas (MDMO). Cuyas formulaciones fueron presentadas en las secciones 2.2.1.4 y 2.2.2, y cuya resolución numérica se desarrolló en las secciones 2.3.2 y 2.3.3 para el proceso osmótico y microondas, respectivamente.

#### 4.1.3.1. Predicción de Perfiles de Temperatura y Humedad aplicado a datos propios y extraídos de literatura (modelo DO-DMO)

**Tabla 19.** Propiedades y parámetros para los modelos de deshidratación osmótica.

	Parámetro/propiedades	Agua	Sólidos solubles	Unidades
Modelo Osmótico-Difusional Celular (MODC)	$kw_{int}$	$200 \cdot 10^{-9}$	---	$m \cdot s^{-1}$
	$D_{w \text{ ini}}$	$1.36 \cdot 10^{-9}$	---	$m^2 \cdot s^{-1}$
	$D_{s \text{ ini}}$	---	$0.17 \cdot 10^{-9}$ (sacarosa)	$m^2 \cdot s^{-1}$
	$N_{cp}$ , Constante celular	$1.275 \cdot 10^6$	---	adimensional
	$C_g$ , Constante de forma	2	---	adimensional
	$A$	---	$13.116 \cdot 10^{-6}$ (sacarosa)	adimensional
	$B$	---	$-28.47 \cdot 10^{-3}$ (sacarosa)	adimensional
	$C$	---	$15.354$ (sacarosa)	adimensional
Modelo Difusional de Flujo Contracorriente (MDFC)	$C_{ini}$	0.856	0.115	$kg \cdot kg^{-1} \cdot b.h.$
	$C_{equi}$	$0.8003^{(20^\circ Brix)}$	$0.153^{(20^\circ Brix)}$	$kg \cdot kg^{-1} \cdot b.h.$
		$0.6945^{(40^\circ Brix)}$	$0.284^{(40^\circ Brix)}$	$kg \cdot kg^{-1} \cdot b.h.$
		$0.5657^{(60^\circ Brix)}$	$0.410^{(60^\circ Brix)}$	$kg \cdot kg^{-1} \cdot b.h.$
	$\rho$ , Densidad agua	$992^{(40^\circ C)}$	---	$kg \cdot m^{-3}$
	$\mu_w$ , Viscosidad agua	$658 \cdot 10^{-6}^{(40^\circ C)}$	---	Pa s
	$r_B$	---	$4.9 \cdot 10^{-10}$ (sacarosa) <sup>a</sup>	m
	$T_{OD}$	303.16	---	°K
	$\rho_{food}$	$1040^b$	---	$kg \cdot m^{-3}$
	$2L$	0.015	---	m

<sup>a</sup>Floury y col. (2008);

<sup>b</sup>Fumagalli y Silveira (2005).

## 4.1.3.1.1. Aplicación del modelo de Deshidratación Osmótica-Microondas a rodajas de pera

Con el propósito de validar el modelo completo de DO-DMO y evaluar la influencia de la concentración de la solución osmótica sobre las propiedades dieléctricas en la segunda etapa de deshidratación (microondas) se contrastaron los resultados de las predicciones numéricas contra datos experimentales de temperatura y humedad obtenidos en nuestros laboratorios. El modelo se aplicó a la deshidratación osmótica-microondas de peras. Las propiedades físicas de la pera fresca y osmodeshidratada y los parámetros necesarios para el modelado matemático son resumidos en las Tablas 19 y 20.

**Tabla 20.** Propiedades de transporte térmicas y electromagnéticas de para el modelado DMO de peras

Parámetros/propiedades	Fruta fresca	Fruta osmodeshidratada	Unidades
$\rho$ , Densidad fruta	1000 <sup>a</sup>	1056.7 <sup>a</sup> (20°Brix) 1065.5 <sup>a</sup> (40°Brix) 1065.5 <sup>a</sup> (60°Brix)	kg m <sup>-3</sup>
$k$ , Conductividad térmica	0.595 <sup>b</sup>	0.514 <sup>a</sup> (20°Brix) 0.506 <sup>a</sup> (40°Brix) 0.50 <sup>a</sup> (60°Brix)	W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>
$C_p$ , Capacidad calorífica	3600 <sup>c</sup>	3125 <sup>d</sup>	J kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>
$D_w$ , Coeficiente de difusión	2.6 10 <sup>-10</sup>		m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
$\epsilon'$ , Constante dieléctrica	71.06-0.052 T-3 10 <sup>-4</sup> T <sup>2</sup> <sup>e</sup>	67.3 <sup>f</sup>	adimensional
$\epsilon''$ , Factor de pérdida	20.95-0.25 T+1.4 10 <sup>-3</sup> T <sup>2</sup> <sup>e</sup>	13.28 <sup>f</sup> (20°Brix) 30 <sup>f</sup> (40°Brix) 23 <sup>f</sup> (60°Brix)	adimensional
$T_{equi}$ , Temperatura equilibrio	101		°C
$T_a$ , Temperatura aire	15		°C
Forma	placa plana	---	---
$L$ , Espesor	0.015		m
Potencia microondas	500		W
$C_{w\ ini} / C_{s\ ini}$	0.844/12.8	0.83/14 <sup>f</sup> (20°Brix) 0.80/18 <sup>f</sup> (40°Brix) 0.77/21 <sup>f</sup> (60°Brix)	kg kg <sup>-1</sup> b.h. / °Brix
$HR$ , Humedad relativa	0.75		kg kg <sup>-1</sup> b.h. / °Brix

<sup>a</sup> Agnelli y col. (2005);

<sup>b</sup> Sweat (1974);

<sup>c</sup> Polley y col. (1980);

<sup>d</sup> Tocci y Mascheroni (1996);

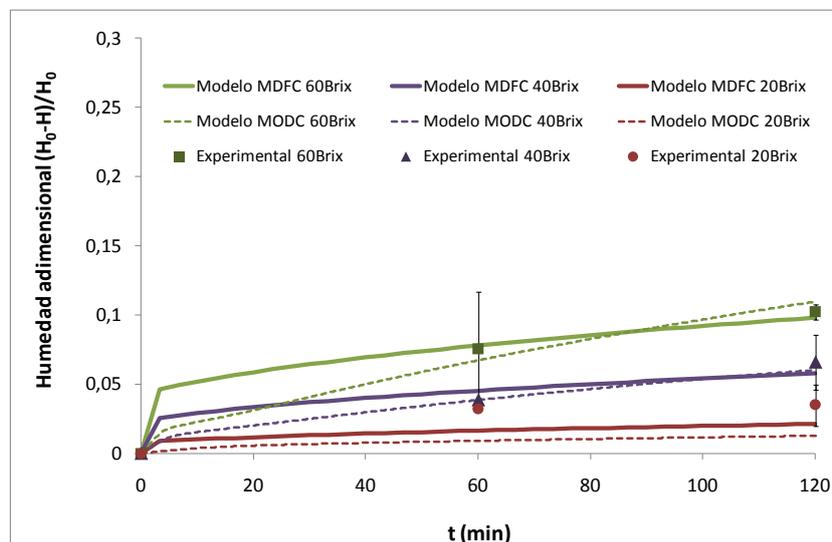
<sup>e</sup> Sipahioğlu y Barringer (2003);

<sup>f</sup> valores en el rango correspondiente a frutas y soluciones de azúcares (Datta y Anatheswaran, 2001).

La Figura 36 muestra las predicciones de los modelos Osmótico-Difusional Celular (MODC) y Difusional de Flujo Contracorriente (MDFC) y los datos experimentales de peras osmodeshidratadas con tres concentraciones de solución hipertónica de sacarosa (20, 40 y 60 °Brix).

A partir de los resultados experimentales, como era esperable, se puede observar que un incremento en la concentración de la solución hipertónica produce un aumento de la remoción de agua (Torregiani, 1993).

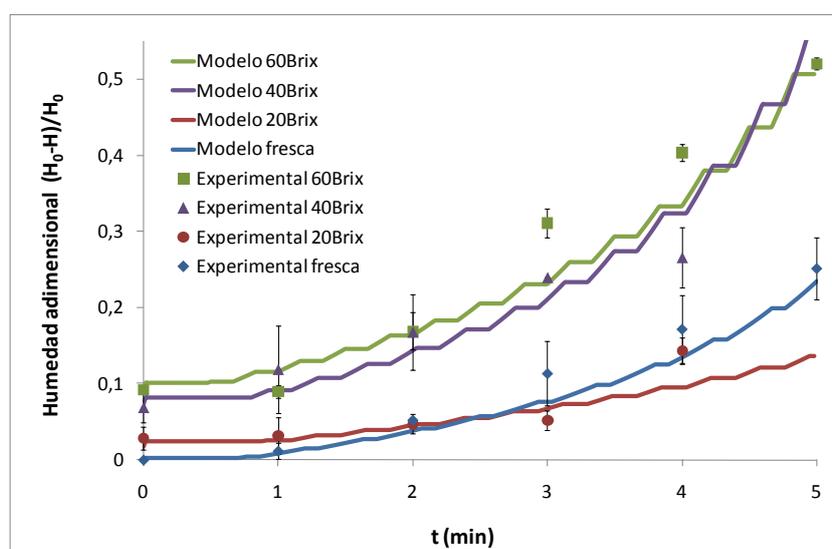
Además las predicciones numéricas para ambos modelos osmóticos obtuvieron valores de humedad precisos a 2 horas del proceso (error relativo promedio porcentual  $<0.25$  y  $<9.12$ , respectivamente). El modelo MODC fue previamente validado para tiempos largos de procesamiento por otros autores (Spiazzi y Mascheroni, 1997; Agnelli y col., 2005). Con respecto al modelo MDFC, siendo un modelo más sencillo, permitió obtener valores de humedad similares a los obtenidos por el modelo MODC. Usando el modelo MDFC en la primera etapa de deshidratación osmótica y el modelo propuesto para la etapa final de deshidratación con microondas, ha sido posible desarrollar una formulación más coherente con un nivel similar de complejidad en relación a la descripción del fenómeno del proceso combinado de deshidratación, y la vez con mucha menor complejidad matemática.



**Figura 36.** Evolución de la humedad adimensional experimental (símbolos) y predicha (líneas) durante el pretratamiento osmótico de rodajas de pera en soluciones de sacarosa de 20, 40 y 60°Brix.

Con respecto a la vinculación de ambos procesos de deshidratación, el modelo Difusional de Flujo Contracorriente (MDFC) fue utilizado para predecir las condiciones iniciales para la deshidratación con microondas (Figura 36 y 37).

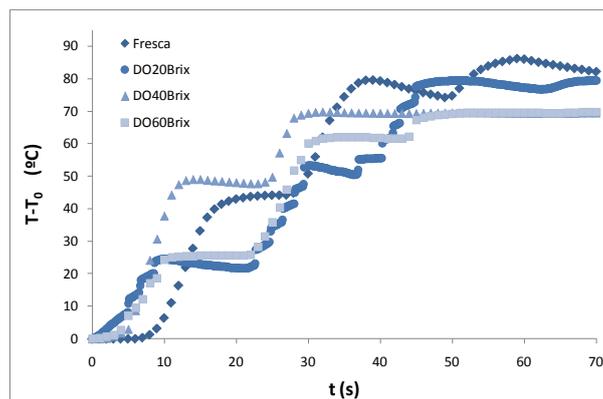
En las simulaciones de deshidratación osmótica (primera etapa) se obtuvieron los valores iniciales de concentración de agua para la segunda etapa (deshidratación con microondas). Los valores de humedad calculados para 2 horas de proceso fueron 0.8376, 0.8063 y 0.7718  $\text{kg}_{\text{agua}} \cdot \text{kg}^{-1}$  b.h. para muestras osmodeshidratadas con solución de sacarosa de 20, 40 y 60°Brix, respectivamente.



**Figura 37.** Evolución de la humedad adimensional experimental (símbolos) y predicha (líneas) durante la deshidratación con microondas de rodajas de pera fresca y osmodeshidratada en soluciones de sacarosa de 20, 40 y 60°Brix.

Analizando los primeros 3 minutos del proceso de deshidratación con microondas (Figura 37), las pérdidas de peso aumentan como resultado del incremento de la concentración de la solución de sacarosa durante el pretratamiento osmótico. Una alta velocidad de deshidratación, durante la DMO, fue alcanzada cuando el alimento fue pretratado con soluciones de sacarosa de 40 y 60°Brix. Este comportamiento puede ser atribuido al cambio de las propiedades dieléctricas promovido por la incorporación de azúcar durante la deshidratación osmótica. Otros autores han observado el mismo fenómeno durante la liofilización con microondas de chips de papas (Wang y col., 2010). En dicho trabajo estudiaron las cinéticas de secado durante la liofilización de muestras frescas y osmodeshidratadas con solución de sacarosa. Observaron que un incremento en la concentración de azúcar mejoró la velocidad de secado, pero en el cambio de 40 a 50% la

velocidad de secado no siguió mejorando. Esto puede ser atribuido a la alta incorporación de azúcar, una alta concentración de sacarosa inhibe la pérdida de agua en la etapa de secado con microondas. Esto podría producir una reducción en la porosidad del tejido debido a una excesiva infiltración de azúcar o a una posible formación de una capa de azúcar periférica. Experimentos previos llevados adelante en nuestros laboratorios verificaron esta suposición. En ellos medimos los perfiles de sólidos solubles en las muestras sometidas a diferentes concentraciones de sacarosa y observamos un alto contenido de azúcar cerca de la superficie de las muestras. Esto puede explicar la superposición de las curvas (40 y 60°Brix) mostradas en la Figura 37.

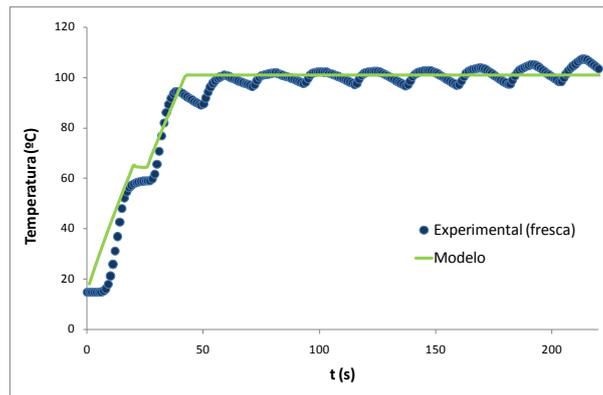


**Figura 38.** Incremento de temperatura superficial durante los primeros 70s de deshidratación con microondas de peras frescas y osmodeshidratadas (solución de sacarosa de 20, 40 y 60°Brix).

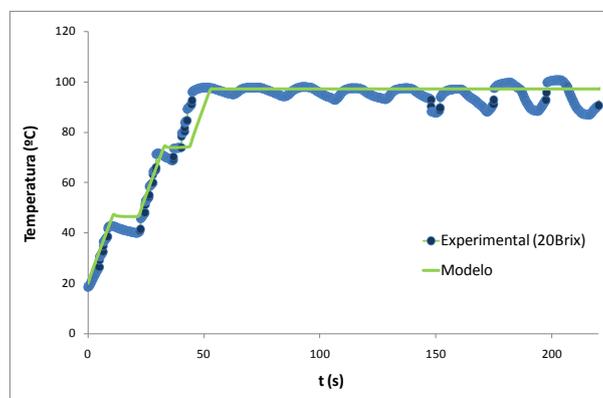
Concerniente a la evolución de la temperatura durante la deshidratación con microondas, dos zonas bien definidas pueden ser observadas (Figura 38). Durante la primera etapa de calentamiento, la temperatura aumenta rápidamente, y posteriormente se hace constante a la temperatura de equilibrio, donde el cambio de temperatura se vuelve despreciable. Puede ser notado, en el periodo de calentamiento intenso (tiempo de proceso menor a 50s), no hay cambios en la temperatura durante ciertos intervalos de tiempo, este comportamiento ocurre por la operación cíclica (on-off) del horno de microondas. La pendiente de cada curva experimental representa la velocidad de incremento de temperatura que está relacionada con las propiedades dieléctricas de la fruta.

En la Figura 38 se aprecia que el tratamiento en la solución de sacarosa de 40°Brix promueve la mayor tasa de cambio de temperatura durante la irradiación, seguida por la condición de 60°Brix. La menor pendiente es presentada por las peras sometidas a solución hipertónica de 20°Brix. Las peras frescas mostraron una tasa de incremento de temperatura intermedio entre las peras tratadas con solución de 40°Brix y 20°Brix. Estas diferencias en la pendiente pueden ser

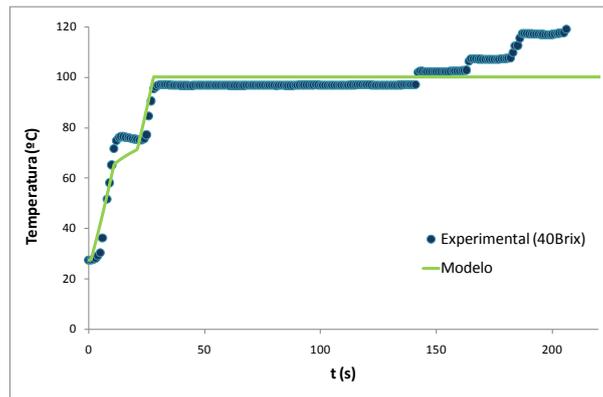
atribuidas al cambio en las propiedades dieléctricas debido a la pérdida de agua y ganancia de sólidos durante el pretratamiento osmótico que afecta la capacidad de alimento de transformar las microondas en calor. Liao y col. (2003) estudiaron la dependencia de las propiedades dieléctricas de varias soluciones de sacarosa con la concentración. En sus análisis puede apreciarse que las propiedades dieléctricas aumentaron a medida que la concentración de la solución aumentó alcanzando un máximo a 40°Brix. Estos resultados podría explicar el comportamiento observado de peras con diferente contenido de agua y azúcar.



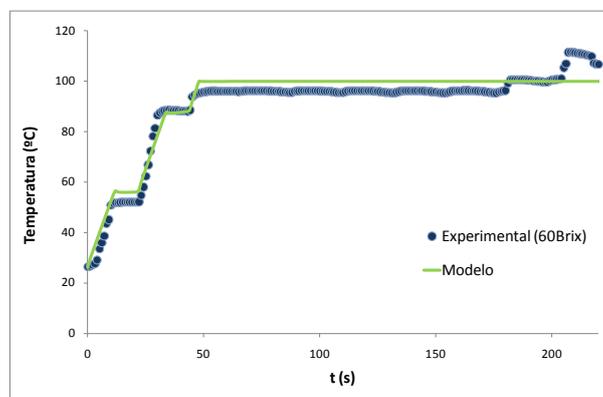
**Figura 39.** Temperatura superficial predicha y experimental durante la deshidratación con microondas de placas de peras frescas (Densidad de potencia 9.11W/g).



**Figura 40.** Temperatura superficial predicha y experimental durante la deshidratación con microondas de placas de peras osmóticamente deshidratadas en solución de sacarosa a 20°Brix (Densidad de potencia 9.11W/g).



**Figura 41.** Temperatura superficial predicha y experimental durante la deshidratación con microondas de placas de peras osmodeshidratadas en solución de sacarosa a 40°Brix (Densidad de potencia 9.11W/g).



**Figura 42.** Temperatura superficial predicha y experimental durante la deshidratación con microondas de placas de peras osmodeshidratadas en solución de sacarosa a 60°Brix (Densidad de potencia 9.11W/g).

En relación al proceso de simulación de la etapa de calentamiento, es relevante mencionar que el modelo presenta una gran sensibilidad al valor de la temperatura de equilibrio ( $T_{equi}$ ), esto implica que los tiempos obtenidos en la etapa de vaporización leve están altamente condicionados por este valor. Por consiguiente es de vital importancia que el valor  $T_{equi}$  sea establecido en base a datos precisos obtenidos experimentalmente.

Con respecto a la capacidad predictiva del modelo desarrollado (Figuras 39-42), los resultados muestran que el modelo numérico se adapta correctamente a las modificaciones que ocurren en los perfiles de temperatura experimental durante las etapas de calentamiento intensivo y de equilibrio; adicionalmente el modelo predice adecuadamente el fenómeno on-off del horno de microondas. Como puede apreciarse en las Figuras 41 y 42 el modelo desarrollado no considera

la etapa posterior de sobrecalentamiento, por esta razón el modelo no sigue el incremento de la temperatura luego de la etapa de equilibrio en las muestras tratadas con soluciones de 40 y 60°Brix.

Por último, puede también observarse la buena exactitud de las predicciones (Tablas 21 y 22), para la temperatura y el contenido de humedad a pesar de las suposiciones realizadas durante el desarrollo del modelo de deshidratación combinada osmótica-microondas.

**Tabla 21.** Error relativo absoluto porcentual (ERA%) para las predicciones de temperatura

Condición	Error (%)
Fresca-DMO	7.87
DO20Brix-DMO	5.13
DO40Brix-DMO	14.95
DO60Brix-DMO	5.59

**Tabla 22.** Error relativo absoluto porcentual (ERA%) para las predicciones de humedad

Condición	Error (%)
Fresca-DMO	2.15
DO20Brix-DMO	1.97
DO40Brix-DMO	4.41
DO60Brix-DMO	6.00

## 4.1.3.1.2. Aplicación del modelo de Deshidratación Osmótica-Microondas a rodajas de banana

*Modelado de primera etapa de deshidratación (Deshidratación Osmótica)*

Adicionalmente el modelo completo DO-DMO fue aplicado a la deshidratación osmótica-microondas de rodajas de banana considerando diferentes tiempos de pretratamiento osmótico (60 y 150 min) y varias densidades de potencias de microondas (0.25, 0.50 y 0.75W/g). Datos experimentales extraídos de literatura (Pereira, 2007) fueron utilizados para la validación del modelo. Se consideraron para el modelado matemático las propiedades y parámetros consignados en las Tablas 23 y 24.

**Tabla 23.** Parámetros y propiedades de transporte para la simulación del proceso de deshidratación osmótica de banana\*

Parámetros/propiedades	Valores	Unidades
$\rho$ , Densidad fruta	930 <sup>a</sup>	kg m <sup>-3</sup>
$D_{w-s}$ , Coeficiente de difusión binario	<i>Matlab function</i> <sup>b</sup>	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
$PM_a$ , Peso molecular agua	18 <sup>b</sup>	g mol <sup>-1</sup>
$PM_s$ , Peso molecular sacarosa	342.3 <sup>b</sup>	g mol <sup>-1</sup>
$T_{OD}$ , Temperatura solución osmótica	40	°C
$C_{sol}$ , Concentración solución osmótica	55	°Brix
$C_{w\ ini}$ , Humedad inicial de la muestra	0.73	kg <sub>a</sub> kg <sup>-1</sup> b.h.
$C_{s\ ini}$ , Concentración inicial sólidos solubles	0.1	kg <sub>ss</sub> kg <sup>-1</sup> b.h.
Forma	placa plana	---
$d$ , Diámetro	0.03	m
$L$ , Espesor	0.01	m
$C_{w\ equi}$	0.45	kg <sub>a</sub> kg <sup>-1</sup> b.h.
$C_{s\ equi}$	0.25	kg <sub>ss</sub> kg <sup>-1</sup> b.h.

\*Datos experimentales extraídos de Pereira (2007);

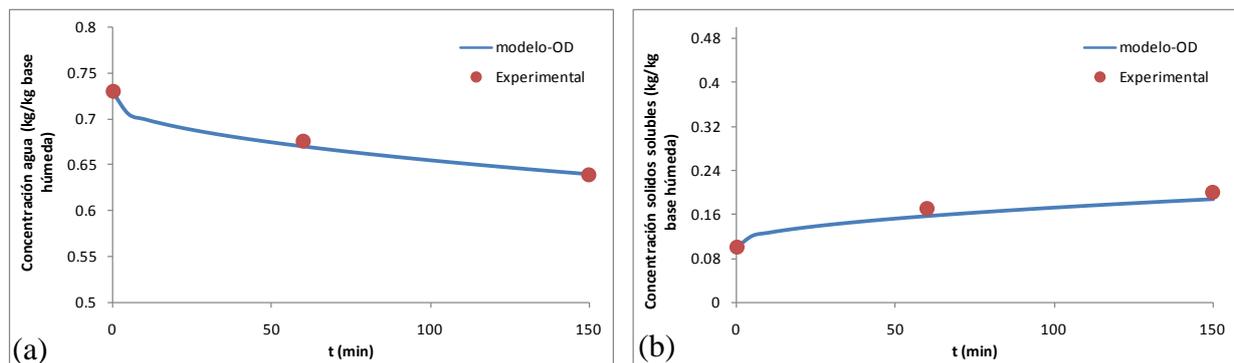
<sup>a</sup> Sankata y Castaigne (2004);

<sup>b</sup> Flourey y col. (2008).

Con el fin de simular los perfiles de humedad y sólidos solubles durante el pretratamiento osmótico (DO) de rodajas de banana en solución de sacarosa a 55°Brix, fue aplicado el modelo difusional en flujo contracorriente (MDFC). Las Figuras 43a y b muestran evolución del contenido de agua y de sólidos solubles del alimento durante la primera etapa de deshidratación (DO) y las predicciones obtenidas por el modelo. Como muestran las figuras las rodajas de banana fueron sometidas a 60 y 150 minutos de deshidratación en solución osmótica a

temperatura constante de 40°C. Visualizando los valores experimentales y predichos de humedad puede apreciarse la muy buena exactitud de las predicciones obtenidas por el modelo MDFC.

Los contenidos de agua predichos a 60 y 150min fueron de 67.06% y 64.04% presentando errores relativos <0.76%, mostrando de esta manera una excelente predicción del modelo. Por consiguiente las simulaciones realizadas con el modelo MDFC serán utilizadas como valores iniciales para la aplicación del modelo de deshidratación con microondas (MDMO), segunda etapa del proceso combinado de deshidratación.

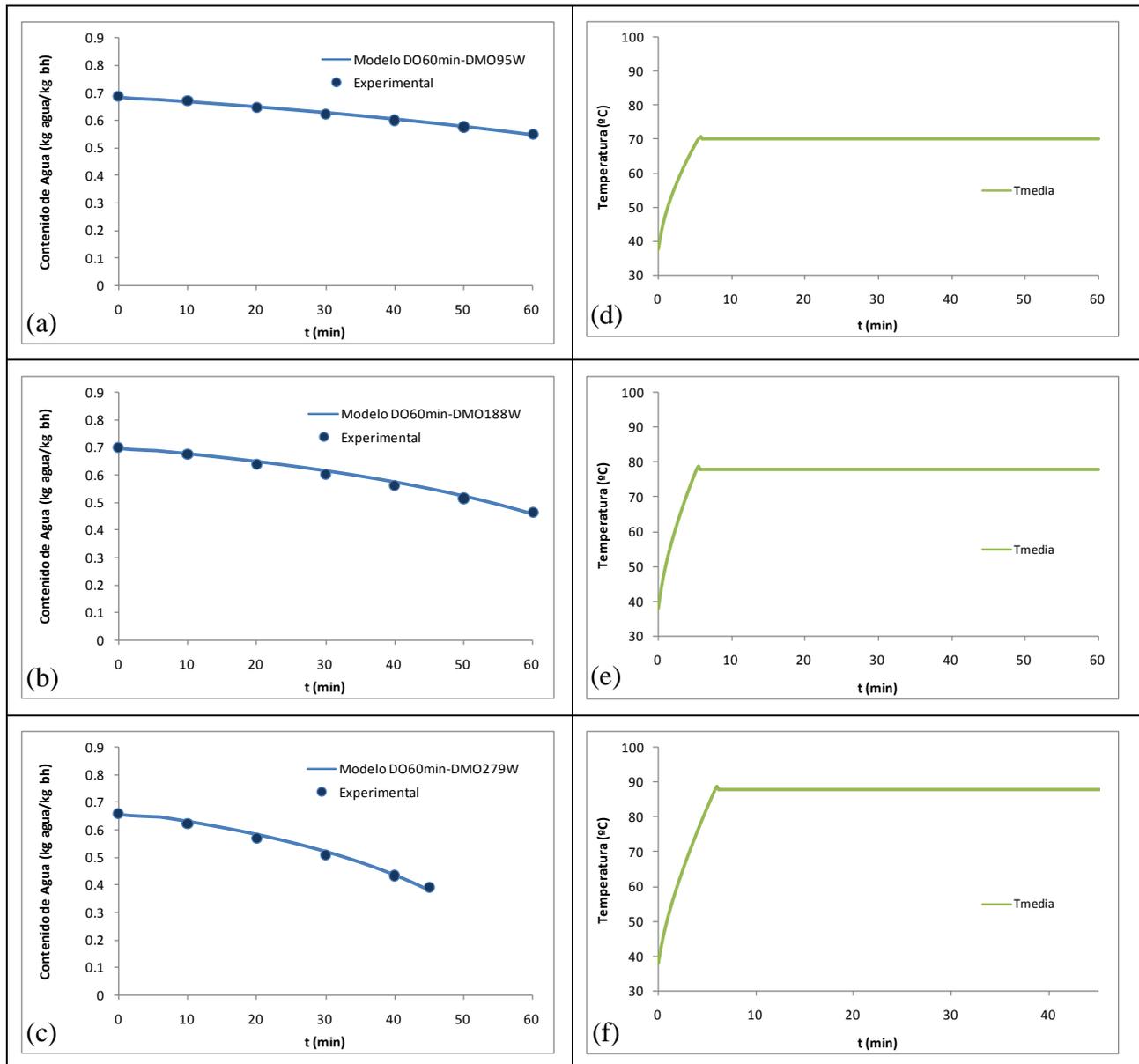


**Figura 43.** Evolución del (a) contenido de agua y (b) sólidos solubles (-) predichos y (•) experimentales durante la deshidratación osmótica de rodajas de banana en solución de sacarosa a 55°Brix y temperatura constante de 40°C. Datos experimentales extraídos de Pereira (2007).

#### *Modelado de la segunda etapa de deshidratación (Deshidratación con microondas)*

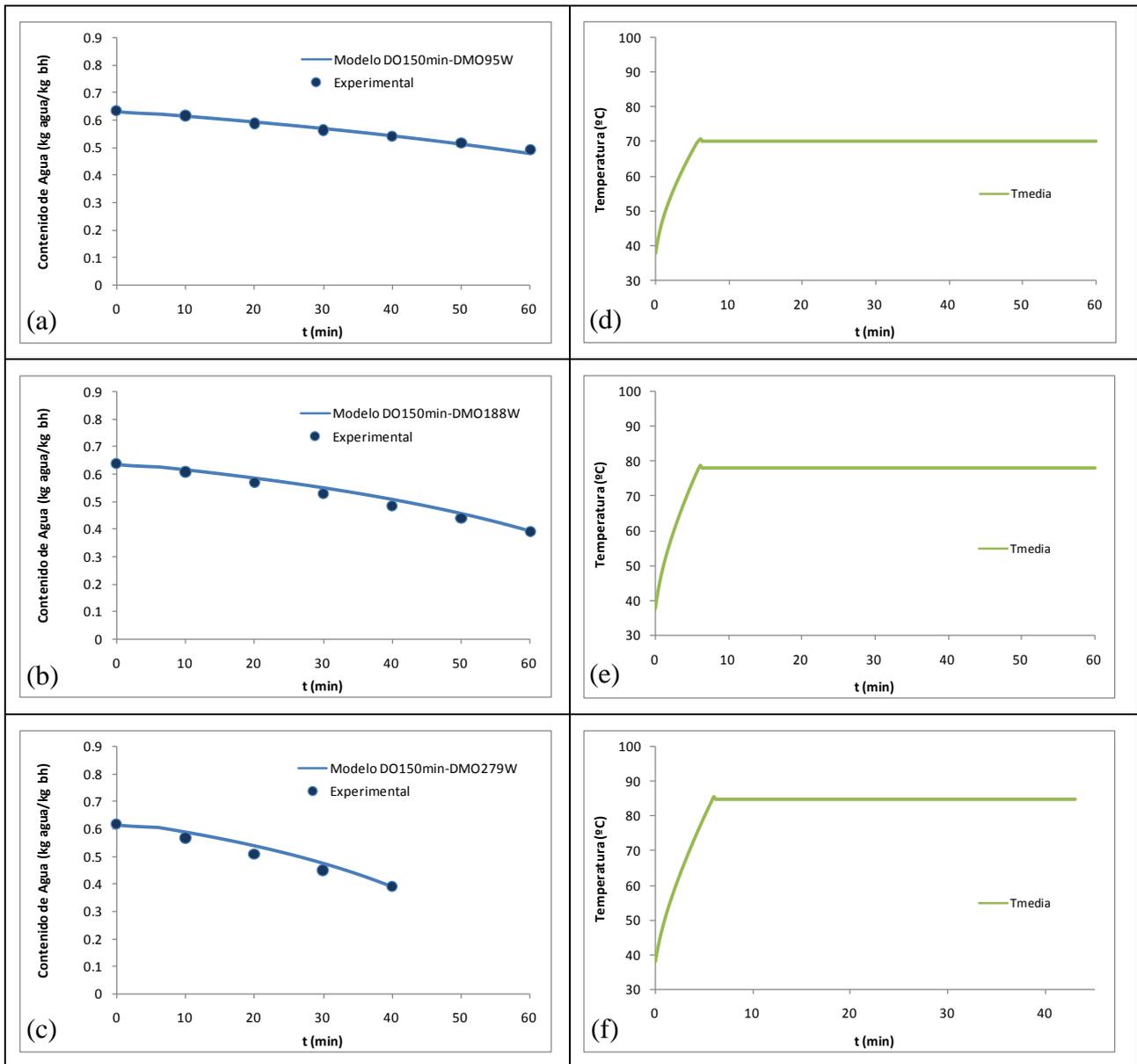
Las Figuras 44a, b y c muestran el contenido de agua experimental y simulado en función del tiempo de procesamiento durante la deshidratación con microondas de rodajas de bananas osmodeshidratadas durante 60min con aplicación de diferentes potencia de microondas.

En relación a la velocidad de deshidratación, evidenciado por la mayor o menor caída en las curvas cinéticas de deshidratación, puede observarse que a medida que potencia de microondas aumenta la velocidad aumenta en proporción directa. A los 40s de procesamiento las bananas sometidas a microondas de 279W alcanzaron la mayor disminución del contenido de agua presentando una humedad porcentual de 43% en comparación con las bananas sometidas a 95W que presentaron una humedad de 55%. Para lograr una buena predicción de los valores de humedad fue necesario configurar las temperaturas de equilibrio en forma separada para cada intensidad de potencia analizada (Figuras 44d, e y f). La correcta determinación de las temperaturas de equilibrio fueron establecidas considerando los datos experimentales de temperatura obtenidos por Pereira (2007), dichas temperaturas son informadas en la Tabla 24.



**Figura 44.** Evolución de la (a, b y c) humedad (-) predicha y (●) experimental y de la temperatura modelada (d, e y f) durante la deshidratación con microondas de bananas osmodeshidratadas durante 60min en solución de sacarosa. (Datos experimentales extraídos de Pereira, 2007).

Nuevamente a partir de las Figuras 45a, b y c se observa la dependencia de la velocidad de deshidratación con la densidad de potencia configurada en las experiencias de deshidratación con microondas. A mayor densidad de potencia mayor la capacidad de deshidratación del proceso y en consecuencia menor el tiempo de deshidratación necesario.



**Figura 45.** Evolución de la (a, b y c) humedad (-) predicha y (●) experimental y de la temperatura modelada (d, e y f) durante la deshidratación con microondas de bananas osmodeshidratadas durante 150min en solución de sacarosa. (Datos experimentales extraídos de Pereira, 2007).

En adición a la configuración de las temperaturas de equilibrio para cada densidad de potencia (Tabla 24), fue necesario incorporar la funcionalidad de las propiedades dieléctricas con la humedad en la etapa de vaporización intensa. Especialmente en el caso de las muestras que fueron deshidratadas con la mayor densidad de potencia de microondas (0.75W/g), a tiempos cercanos a la humedad de equilibrio (35 y 40s) las curvas experimentaron una desviación importante debido al cambio en las propiedades dieléctricas del alimento. A medida que disminuye el contenido de agua del alimento las propiedades dieléctricas del material se

modifican haciendo que la capacidad de transformar las microondas en calor disminuya sensiblemente provocando una disminución de la pendiente en la curva de evolución de humedad, corrigiendo de esta manera las desviaciones en las simulaciones obtenidas. Dicha funcionalidad fue basada en los datos experimentales obtenidos por Feng y col. (2002). En dicho trabajo mostraron la funcionalidad de las propiedades dieléctricas de manzanas con el contenido de humedad durante la deshidratación con microondas.

**Tabla 24.** Parámetros y propiedades para el modelado de la deshidratación combinada osmótica-microondas de banana\*

Parámetros/Propiedades	Valores	Unidades
$\rho$ , Densidad fruta	930 <sup>a</sup>	kg m <sup>-3</sup>
$k$ , Conductividad térmica	0.481 <sup>b</sup>	W m <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup>
$C_p$ , Capacidad calorífica	3550 <sup>c</sup>	J kg <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup>
$\alpha$ , Factor de atenuación	66.0167-0.4739 T+0.0051 T <sup>2</sup> <sup>d</sup>	adimensional
$\epsilon'$ , Constante dieléctrica	68.73-0.08229 T-0.0005706 T <sup>2</sup> <sup>d</sup>	adimensional
$\epsilon''$ , Factor de pérdida	21.28-0.1536 T+0.001450 T <sup>2</sup> <sup>d</sup>	adimensional
$\alpha_d$ , Factor de atenuación deshidratado	62-0.0943 $C_w$ 100 <sup>e</sup>	adimensional
$T_{equi}$ , Temperatura de equilibrio	70 <sup>(95W)</sup> 78 <sup>(188W)</sup> 88 <sup>(279W)</sup>	°C °C °C
$T_a$ , Temperatura aire	70	°C
$v$ , Velocidad aire	0.8	m s <sup>-1</sup>
Peso inicial carga completa	380	g
Forma	placa plana	---
$d$ , Diámetro	0.03	m
$L$ , Espesor	0.01	m
$V$ , Volumen muestra	7.07E-06	m <sup>3</sup>
Densidad de potencia de microondas	0.2500 <sup>(95W)</sup> 0.5000 <sup>(188W)</sup> 0.7500 <sup>(279W)</sup>	W g <sup>-1</sup> W g <sup>-1</sup> W g <sup>-1</sup>
Peso inicial de la muestra	6.574	g
$HR$ , Humedad relativa	0.6	kg <sub>a</sub> kg <sup>-1</sup> b.h.

\* Datos experimentales extraídos de Pereira (2007);

<sup>a</sup> Sankata y Castaigne (2004);

<sup>b</sup> Sweat (1974);

<sup>c</sup> Phoungchandang y Woods (2000);

<sup>d</sup> Sipahioglu y Barringer (2003);

<sup>e</sup> Basado en los datos obtenidos por Feng y col. (2002).

Como puede apreciarse a partir de las Figuras 44 y 45 el modelo combinado DO-DMO obtuvo predicciones de los valores de humedad muy satisfactorios para todas las condiciones estudiadas (Tabla 25), mostrando una gran adaptabilidad del modelo desarrollado a diferentes configuraciones de operación, tanto en términos de predicción de condiciones de pretratamiento osmótico como de diferentes intensidades de potencia de microondas aplicadas.

**Tabla 25.** Error relativo absoluto porcentual (ERA%) para las predicciones de humedad

Condición	Error (%)
DO60min-DMO95W	0.58
DO60min-DMO188W	1.58
DO60min-DMO279W	1.98
DO150min-DMO95W	1.09
DO150min-DMO188W	2.72
DO150min-DMO279W	3.97

# Capítulo 5

# Conclusiones

## Capítulo 5 Conclusiones

Un modelo matemático completo y relativamente simple y fácil de usar ha sido desarrollado para la predicción simultánea de los perfiles de humedad y temperatura durante el proceso combinado de deshidratación osmótica-microondas. Su principal originalidad es poder considerar el proceso inicial de deshidratación osmótica y ligar los perfiles predichos de concentración de agua y sólidos solubles con la transferencia simultánea de energía y masa en la etapa de deshidratación con microondas, incluyendo, también, la generación interna de calor y el efecto del control on-off del horno de microondas. Además fue incorporado en la formulación del modelo el efecto de la ganancia de sólidos durante el proceso de deshidratación osmótica sobre la etapa final de secado con microondas.

Dos modelos (osmótico-difusional celular –MODC- y difusional de flujo contracorriente –MDFC-) fueron probados para predecir los perfiles de humedad y sólidos solubles durante la etapa de deshidratación osmótica. Los resultados obtenidos por ambos modelos dieron una exactitud similar, a pesar de que el modelo MODC es mucho más detallado. Probablemente las principales suposiciones realizadas para el modelo MDFC (como volumen constante) no introducen errores significativos debido a los cortos tiempos (hasta las 2 horas) involucrados en las determinaciones experimentales, dichos tiempos no generan importantes reducciones de peso y en consecuencia la reducción de volumen puede considerarse despreciable.

La generación interna de calor, durante la deshidratación con microondas, debido al campo electromagnético fue considerada usando la aproximación con ley de Lambert, la cual implica un decaimiento exponencial de la potencia incidente con la profundidad de penetración. En adición, dos periodos sucesivos fueron modeladas: (1) calentamiento inicial seguido por (2) vaporización intensa en la superficie del alimento. Los experimentos propios de deshidratación de rodajas de pera y datos encontrados en literatura mostraron la existencia de estas dos etapas. Adicionalmente en el modelo de deshidratación con microondas se tuvieron en cuenta las características de alimento, las diferentes potencias de microondas utilizadas, las diversas presiones de trabajo aplicadas (normal o con aplicación de vacío) y los diferentes modos de operaciones del horno de microondas (con aplicación continua o cíclica de potencia).

Considerando el proceso combinado, a partir de los datos experimentales (propios y de literatura) y las simulaciones numéricas, el efecto del tipo de alimento, la concentración de la solución osmótica, tiempo de proceso y tamaño del producto fue analizado durante el proceso de

deshidratación osmótica (DO). Las condiciones alcanzadas por el alimento junto con las condiciones de operación durante DO afectan directamente al proceso de deshidratación con microondas (DMO) en la segunda etapa del proceso combinado, principalmente cambiando las propiedades físicas del alimento. En ambas etapas, las pérdidas de peso aumentaron como resultado del incremento de la concentración de solución de sacarosa. La mayor velocidad de deshidratación, durante la deshidratación con microondas, fue alcanzado cuando los productos fueron pretratados con soluciones de sacarosa de 40 y 60°Brix. Este comportamiento puede ser atribuido al cambio en las propiedades dieléctricas promovido por la incorporación de azúcar durante la deshidratación osmótica.

Con respecto a las predicciones obtenidas por el modelo completo desarrollado puede observarse una muy buena concordancia con los datos experimentales propios y obtenidos de literatura.

Finalmente, se obtuvo un modelo completo e integrado que puede ser usado para la predicción de la pérdida de peso en un amplio rango de condiciones de operación durante el proceso de deshidratación combinado osmótico-microondas de frutas y hortalizas.

**Utilidad del modelo completo desarrollado:** Teniendo un conocimiento adecuado de las propiedades físicas de los productos a simular tales como: densidad, capacidad calorífica, conductividad térmica, propiedades dieléctricas; y realizando una correcta configuración de las condiciones de operación: peso, tamaño y forma de la muestra, concentración de la solución osmótica, tiempo y temperatura del pretratamiento, potencia de microondas aplicadas, velocidad y temperatura del aire circundante, y modo de operación del horno; los códigos propios desarrollados pueden ser utilizados para predecir pérdidas de peso, distribución de la temperatura, sólidos solubles y humedad dentro de frutas y hortalizas sometidas a deshidratación osmótica-microondas. Además realizando pequeñas modificaciones al programa original, se podría calcular el tiempo de procesamiento necesario para alcanzar un cierto contenido de agua final del producto a deshidratar.

## Nomenclatura

- $A$  Superficie del alimento ( $m^2$ ) (sección 2.2.2.1)
- $A_{ext}$  Área de transferencia extracelular ( $m^2$ ) (sección 2.1.1.1) y  $A_o$  (sección 2.2.1.2)
- $A_{int}$  Área de transferencia celular ( $m^2$ ) (sección 2.1.1.1) y  $A_c$  (sección 2.2.1.2)
- $a_w$  Actividad de agua (sección 2.1.1.1)
- $C$  Concentración ( $kg\ m^{-3}$ ) (sección 2.2.2.1)
- $C_g$  Coeficiente dependiente de la forma de las células y de la fracción de volumen extracelular (sección 2.2.1.2)
- $C_p$  Capacidad calorífica ( $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ) (sección 2.2.2.1)
- $c_s'$  Concentración molar de sólidos solubles ( $mol\ m^{-3}$ ) (sección 2.2.1.3)
- $D$  Coeficiente de difusión ( $m^2\ s^{-1}$ ) (sección 2.1.1.1)
- $D_0$  Coeficiente preexponencial de la relación de Arrhenius ( $m^2\ s^{-1}$ ) (sección 2.1.1.2)
- $D_{ef}$  Coeficiente efectivo de difusión ( $m^2\ s^{-1}$ ) (sección 2.1.1.2)
- $D_{w-s}$  Coeficiente de difusión binario ( $m^2\ s^{-1}$ ) (sección 2.2.1.3)
- $d_i$  Función de conveniencia individual (adimensional) (sección 3.1.3.2)
- $d_p$  Profundidad de penetración de las microondas (sección 2.1.2.2)
- $DT$  Función de conveniencia total o global (adimensional) (sección 3.1.3.2)
- $E$  Intensidad del campo eléctrico ( $V\ m^{-1}$ ) (sección 2.1.2.2)
- $E_0$  Intensidad del campo eléctrico en la superficie de la muestra ( $V\ m^{-1}$ ) (sección 2.1.2.2)
- $E_a$  Energía de activación de la relación de Arrhenius (sección 2.1.1.2)

- $f$  Frecuencia de la onda electromagnética ( $s^{-1}$ ) (sección 2.1.2.2)
- $f(t, c_{jc})$  Variación de la masa del componente  $j$  con el tiempo dentro de la célula (sección 2.3.1)
- $g(t, c_{jo})$  Variación de la masa del componente  $j$  con el tiempo en los espacios intercelulares adyacentes (sección 2.3.1)
- $h$  Coeficiente de transferencia de energía ( $W m^{-2} °C^{-1}$ ) (sección 2.2.2.1)
- $H_{ini}$  Humedad inicial del producto (%) (sección 3.1.2)
- $H_t$  Humedad al tiempo  $t$  del producto (%) (sección 3.1.2)
- $k$  Conductividad Térmica ( $W m^{-1} °C^{-1}$ ) (sección 2.2.2.1)
- $k_B$  Constante de Boltzmann (sección 2.1.1.2)
- $k_m$  Coeficiente de transferencia de masa ( $m s^{-1}$ ) (sección 2.2.2.1)
- $k_{RK}$  Coeficiente del método de Runge Kutta (sección 2.3.1)
- $k_{wint}$  Coeficiente de transferencia de masa transmembrana ( $m s^{-1}$ ) (sección 2.1.1.1) y  $k_{wc}$  (sección 2.2.1.2)
- $L$  Semiespesor (m) (sección 2.2.2.1)
- $L_i$  Valores mínimos aceptables de cada respuesta (sección 3.1.3.2)
- $L_{vap}$  Calor latente de vaporización ( $J kg^{-1}$ ) (sección 2.2.2.1)
- $M$  Masa de la muestra (kg) (sección 2.1.1)
- $M_{j sol}^{osm}$  Masa del componente  $j$  dentro de la solución osmótica (sección 2.2.1.2)
- $m_{RK}$  Coeficiente del método de Runge Kutta (sección 2.3.1)
- $m_v$  Tasa de vaporización de agua ( $kg s^{-1}$ ) (sección 2.2.2.2)
- $m_w$  Masa de agua líquida (kg) (sección 3.2.2)

- $N_{cp}$  Coeficiente dependiente del número de células y de la fracción de volumen celular (sección 2.2.1.2)
- $n_{j,c}$  Flujo celular (sección 2.2.1.2)
- $n_{j,o}$  Flujo extracelular (sección 2.2.1.2)
- $P$  Potencia generada por la absorción de las microondas (W) (sección 2.2.2.1)
- $P^*$  Potencia disipada ( $\text{W m}^{-3}$ ) (sección 2.1.2.2)
- $P_0$  Potencia disipada en la superficie del material ( $\text{W m}^{-3}$ ) (sección 2.1.2.2)
- $P'_o$  Potencia incidente en cada cara expuesta (W) (sección 2.2.2.1)
- $Q$  Generación volumétrica de calor ( $\text{W m}^{-3}$ ) (sección 2.2.2.1)
- $R$  Constante universal de los gases
- $R^2$  Coeficiente de determinación ajuste polinómico (sección 3.1.3.1)
- $r_B$  Radio de la partícula (m) (sección 2.1.1.2)
- $S_1$  Parámetro del modelo de Azuara (sección 2.2.1.1.1)
- $S_2$  Parámetro del modelo de Azuara (sección 2.2.1.1.1)
- $SG$  Ganancia de sólidos (%)
- $SG_\infty$  Ganancia de sólidos en el equilibrio, modelo Azuara (fracción) (sección 2.2.1.1.1)
- $ST$  Sólidos totales ( $\text{kg}_{ST} \text{ kg}^{-1} \text{ b.h.}$ ) (sección 3.1.2)
- $t$  Tiempo (s) (sección 2.2.2.1)
- $T$  Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) (sección 2.2.2.1)
- $\tan \delta$  Factor de disipación (sección 2.1.2.2)

$T_{DO}$	Temperatura del alimento durante la deshidratación osmótica (°K) (sección 2.2.1.3)
$T_i$	Valores objetivo de cada respuesta (sección 3.1.3.2)
$u$	Velocidad de encogimiento (sección 2.2.1.2)
$U_i$	Valores máximos aceptables de cada respuesta (sección 3.1.3.2)
$V$	Volumen del producto (m <sup>3</sup> ) (sección 2.2.2.1)
$V_\xi$	Elemento de volumen (sección 2.2.1.2)
$v_i$	Importancia relativa asignada a cada respuesta (sección 3.1.3.2)
$V_M$	Volumen de la molécula (sección 2.1.2.2.1)
$WL$	Pérdida de agua (%)
$WL_\infty$	Pérdida de agua en el equilibrio, modelo Azuara (fracción) (sección 2.2.1.1.1)
$WR$	Reducción de peso (%)
$x$	Posición (m) (sección 2.2.2.1)
$x_i$	Variables operativas (tiempo, concentración) (sección 3.1.3.1)
$y_i$	Respuesta predicha ( $WL$ , $SG$ o $WR$ ) (sección 3.1.3.1)
$z$	Distancia entre cada elemento de volumen (sección 2.2.1.2)

### **Símbolos griegos**

$\alpha$	Factor de atenuación (sección 2.1.2.2)
$\beta_0$	Término independiente de la ecuación polinómica (sección 3.1.3.1)
$\beta_i$	Término de los efectos lineales de la ecuación polinómica (sección 3.1.3.1)

$\beta_{ii}$	Término de los efectos cuadráticos de la ecuación polinómica (sección 3.1.3.1)
$\beta_{ij}$	Término de los efectos de interacción de la ecuación polinómica (sección 3.1.3.1)
$\kappa$	Constante característica de la ecuación de Debye (sección 2.1.2.2.1)
$\lambda$	Longitud de onda de la radiación (m) (sección 2.1.2.2)
$\lambda_0$	Longitud de onda en el vacío (sección 2.1.2.2)
$\tau$	Tiempo de relajación (sección 2.1.2.2.1)
$\nu$	Viscosidad cinemática (sección 2.1.2.2.1)
$\rho$	Densidad ( $\text{kg m}^{-3}$ )
$\varepsilon'$	Constante dieléctrica (adimensional) (sección 2.1.2.2)
$\varepsilon''$	Factor de pérdida dieléctrica (adimensional) (sección 2.1.2.2)
$\varepsilon_r$	Permitividad relativa compleja (sección 2.1.2.2)
$\mu_i$	Potencial químico del componente $i$ (sección 2.1.1.1)
$\mu_m$	Viscosidad de la mezcla binaria (Pa s) (sección 2.1.1.2)
$\mu_i^\circ$	Potencial químico de referencia (sección 2.1.1.1)
$\Delta t$	Paso de tiempo (s) (sección 2.3.1)
$\theta_1$	Influencia relativa de la aproximación al máximo (sección 3.1.3.2)
$\theta_2$	Influencia relativa de la aproximación al mínimo (sección 3.1.3.2)

## Subíndices

<i>a</i>	Ambiente
<i>d</i>	Material deshidratado
<i>De</i>	Derecha, indica el sentido de la onda incidente (sección 2.2.2.1)
<i>equi</i>	Equilibrio
<i>ext</i>	Extracelular (sección 2.1.1.1) y <i>o</i> (sección 2.2.1.2)
<i>ini</i>	Inicial
<i>int</i>	Celular (sección 2.1.1.1) y <i>c</i> (sección 2.2.1.2)
<i>Iz</i>	Izquierda, indica el sentido de la onda incidente (sección 2.2.2.1)
<i>j</i>	Componente genérico (agua –w- o sólidos solubles –s-)
<i>s</i>	Sólidos solubles
<i>t</i>	Al tiempo <i>t</i>
<i>w</i>	Agua

## Referencias

- A.O.A.C. (2000). *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*, 17th ed., Gaithersburg, Ed. William Horwitz.
- Agnelli, M.E., Marani, C.M. & Mascheroni, R.H. (2005). Modelling of heat and mass transfer during (osmo) dehydrofreezing of fruits. *Journal of Food Engineering*, 69(4), 415-424.
- Arballo, J. R., Campañone, L. A. & Mascheroni, R. H. (2010). Modelling of microwave drying of fruits. *Drying Technology*, 28, 1178-1184.
- Azuara, E., Cortes, R., Garcia, H.S. & Beristain, C.I. (1992). Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's second law. *International Journal of Food Science and Technology*, 27, 239-242.
- Barat, J.M., Grau, A. & Fito, P. (1998). *Deshidratación osmótica de alimentos*. Ed. Servicio de publicaciones. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Barbosa-Cánovas, G.V. & Vega-Mercado, H. (2000). *Deshidratación de alimentos*. Editorial Acibria S.A. Zaragoza, España, con autorización de Aspen Publishers, Inc. Maryland, USA.
- Beaudry, C., Raghavan, G.S.V., Ratti, C. & Rennie, T.J. (2004). Effect of four drying methods on the quality of osmotically dehydrated cranberries. *Drying Technology*, 22, 521–539.
- Berk, Z. (2009). *Food process engineering and technology*. Ed. Academic Press, MA, USA.
- Bianchi, M., Guarnaschelli, A. & Milisenda, P. (2011). Dehidrocongelación de frutas: estudio de los parámetros de calidad. *Revista INVENIO*, 14(26), 117-132.
- Bilbao-Saíenz, C., Andrés, A., Chiralt, A. & Fito, P. (2006). Microwaves phenomena during drying of apple cylinders. *Journal of Food Engineering*, 74, 160-167.
- Bird, R.B., Stewart, W.E. & Lightfoot, E.N. (1976). *Transport phenomena*. John Wiley and Sons, New York.
- Biswal, R.N. & Le Maguer, M. (1989). Mass transfer in plant material in contact with aqueous solutions of ethanol and sodium chloride equilibrium data. *Journal of Food Process Engineering*, 11, 159-176.

- Boldor, D., Sanders, T.H., Swartzel, K.R. & Farkas, B.E. (2005). A model for temperature and moisture distribution during continuous microwave drying. *Journal of Food Process Engineering*, 28, 68-87.
- Bouraoui, M., Richard, P. & Durance, T. (1994). Microwave and convective drying of potato slices. *Journal of Food Process Engineering*, 17, 353-363.
- Bruin, S. & Luyben, K.Ch.A.M. (1980). Drying of food materials: a review of recent developments. In *Advances in Drying*, Vol. I. Ed. A.S. Mujumdar. Hemisphere Publishing Corp., NY.
- Campañone, L. A. & Zaritzky, N. E. (2005). Mathematical analysis of microwave heating process. *Journal of Food Engineering*, 69(3), 359-368.
- Campañone, L.A.; Salvadori, V.O. & Mascheroni, R.H. (2001). Weight loss during freezing and storage of unpackaged foods. *Journal of Food Engineering*, 47, 69-79.
- Clemens, J. & Saltiel, C. (1996). Numerical modeling of materials processing in microwave furnaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39 (8), 1665-1675.
- Constantinides, A. & Mostoufi, N. (1999). *Numerical methods for chemical engineers with matlab applications*. Prentice-Hall.
- Conway, J., Castaigne, F., Picard G. & Vovan, X. (1983). Mass transfer considerations in the osmotic dehydration of apples. *Can. Inst. Food Sci. Technol. J.*, 16, 25–29.
- Corzo, O. & Gomez, E.R. (2004). Optimization of osmotic dehydration of cantaloupe using desired function methodology. *Journal of Food Engineering*, 64, 213-219.
- Corzo, O., Bracho, N., Vásquez, A. & Pereira, A. (2008). Optimization of a thin layer drying process for coroba slices. *Journal of Food Engineering*, 85, 372-380.
- Crapiste, G.H. & Rotstein, E. (1997). Design and performance evaluation of dryers. In *Handbook of Food Engineering Practice*, Eds. E. Rotstein, K.J. Valentas, R.P. Singh, CRC Press, USA.
- Crapiste, G.H. (2000). Simulation of drying rates and quality changes during the dehydration of foodstuffs. In *Trends in Food Engineering*, Editores: Lozano, J.E., Añon, C., Parada-Arias, E., Barbosa-Cánovas, G. Ed. Technomic, Pennsylvania, USA.

- Cui, Z-W., Xu, S-Y., Sun, D-W. & Chen, W. (2005). Temperature changes during microwave-vacuum drying of sliced carrots. *Drying Technology*, 23, 1057-1074.
- Chapra, S.C. & Canale, P.P. (2007). *Métodos Numéricos para Ingenieros*. Fifth Edition. México, Mc Graw-Hill.
- Chiralt, A. & Fito, P. (2003). Transport mechanisms in osmotic dehydration: the role of structure. *Food Science and Technology International*, 9, 179-186.
- Datta, A.K. & Ananteswaran, R.C. (2001). *Handbook of microwave technology for food applications*. Marcel Dekker, USA.
- Datta, A.K. & Zhang, J. (1999). Porous media approach to heat and mass transfer in solid foods; Department of Agriculture and Biology Engineering, Cornell University: Ithaca, NY.
- Derringer, G.C. & Suich, R. (1980). Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology*, 12, 214–219.
- Dinčov, D.D., Parrott, K.A. & Pericleous, K.A. (2004). Heat and mass transfer in two-phase porous materials under intensive microwave heating. *Journal of Food Engineering*, 65, 403-412.
- Drouzas, A.E. & Schubert, H. (1996). Microwave application in vacuum drying of fruits. *Journal of Food Engineering*, 28(2), 203–209.
- Durance, T. & Yaghmaee, P. (2011). Microwave dehydration of food and food ingredients, In: *Comprehensive Biotechnology (Second Edition)*, Ed. Murray Moo-Young. Academic Press, Burlington. ISBN 9780080885049, 10.1016/B978-0-08-088504-9.00306-8.
- Eren, I. & Kaymak-Ertekin, F. (2007). Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, 79, 344–352.
- Erle, U. & Schubert, H. (2001). Combined osmotic and microwave-vacuum dehydration of apples and strawberries. *Journal of Food Engineering*, 49, 193-199.
- Farkas, D.F. & Lazar, M.E. (1969). Osmotic dehydration of apple pieces: effect of temperature and syrup concentration on rates. *Food Technology*, 23, 688-690.
- Fellows, P.J. (2000). *Food processing technology, principles and practice*. Ed. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England.

Feng, H. & Tang, J. (1998). Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed. *Journal of Food Science*, 63(4) 679-683.

Feng, H., Tang, J. & Cavaliere, R.P. (2002). Dielectric properties of dehydrated apples as affected by moisture and temperature. *Transactions of the ASAE*, 45(1), 129-135.

Ferrari, C.C., Arballo, J.R., Mascheroni, R.H. & Hubinger, M.D. (2011). Modelling of mass transfer and texture evaluation during osmotic dehydration of melon under vacuum. *International Journal of Food Science and Technology*, 46, 436–443.

Floury, J, Le Bail, A & Pham, Q.T. (2008). A three-dimensional numerical simulation of the osmotic dehydration of mango and effect of freezing on the mass transfer rates. *Journal of Food Engineering*, 85, 1-11.

Fumagalli, F. & Silveira, A.M. (2005). Quality evaluation of microwave-dried Packham's triumph pear. *Drying Technology*, 23, 2215-2226.

George, S.D., Cenkowski, S. & Muir, W.E. (2004). A review of drying technologies for the preservation of nutritional compounds in waxy skinned fruit. North Central ASAE/CSAE Conf, Winnipeg, Manitoba, Canada, 24–25 September.

Giraldo, G., Talens, P., Fito, P. & Chiralt, A. (2003) Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. *Journal of Food Engineering*, 58, 33-43.

Goula, A. & Lazarides, H.N. (2011). Modelling of transport processes during osmo-dehydro-freezing. Proceedings of 11th International Congress of Engineering and Food, ICEF2011, Athens, Greece.

Gunasekaran, N. (2002). Effect of fat content and food type on heat transfer during microwave heating. MS thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia.

Iglesias, H. & Chirife, J. (1982). Handbook of Food Isotherms: Water Sorption Parameters for Food and Food Components. Academic Press: New York.

Jangam, S.V. & Mujundar, A.S. (2010). Basic concepts and definitions, in *Drying of foods, vegetables and fruits – Volume 1*, Ed. Jangam, S.V., Law, C.L. & Mujumdar, A.S., 2010, ISBN – 978-981-08-6759-1, Published in Singapore, 1-30.

- Jayaraman, K. S. & Das Gupta, D. K. (1992). Dehydration of fruits and vegetables—recent developments in principles and techniques. *Drying Technology*, 10(1), 1–50.
- Jia, D. & Afzal, M.T. (2008). Modeling the heat and mass transfer in microwave drying of white oak. *Drying Technology*, 26(9), 1103–1111.
- Jones, P.L. (1986). High frequency dielectric heating in paper making. *Drying Technology*, 4(2), 103-107.
- Kaymak-Ertekin, F. & Sultanoğlu, M. (2000). Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apples. *Journal of Food Engineering*, 46, 243-250.
- Khin, M. M., Zhou, W. & Perera, C. O. (2006). A study of the mass transfer in osmotic dehydration of coated potato cubes. *Journal of Food Engineering*, 77(1), 84–95.
- Khraisheh, M.A.M; Cooper, T.J.R. & Magee, T.R.A. (1997). Microwave and air drying I. Fundamental considerations and assumptions for the simplified thermal calculations of volumetric power absorption. *Journal Food Engineering*, 33, 207-219.
- Kowalski, S.J., Mierzwa D. & Sronek, B. (2009). Drying of osmotically dehydrated biological materials. *Chemical and Process Engineering*, 30, 559-568.
- Krokida, M.K. & Maroulis, Z.B. (1999). Effect of microwave drying on some quality properties of dehydrated products. *Drying Technology*, 17(3) 449-466.
- Kurz, C., Carle, R. & Schieber, A. (2008). Characterisation of cell wall polysaccharide profiles of apricots (*Prunus armeniaca* L.), peaches (*Prunus persica* L.), and pumpkins (*Cucurbita* sp.) for the evaluation of fruit product authenticity. *Food Chemistry*, 106, 421-430.
- Lamberg, I. & Hallstrom, B. (1986). Thermal properties of potatoes and a computer simulation model of a blanching process. *Journal of Food Technology*, 21, 577-585.
- Lenart, A. & Flink, J.M. (1984). Osmotic dehydration of potatoes. II. Criteria for the end point of the osmotic process. *Journal of Food Technology*, 19, 45-63.
- Liao, X., Raghavan, G.S.V., Dai, J. & Yaylayan, V.A. (2003). Dielectric Properties of  $\mu$ -D-glucose Aqueous Solutions at 2450 MHz. *Food Research International*, 36, 485-490.

Liao, X., Raghavan, V.G.S., Meda, V. & Yaylayan, V.A. (2001). Dielectric properties of supersaturated  $\alpha$ -D glucose aqueous solutions at 2450MHz. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 36, 131–138.

Lin, Y.E., Anantheswaran, R.C. & Puri, V.M. (1995). Finite Element Analysis of Microwave Heating of Solid Foods. *Journal of Food Engineering*, 25, 85-112.

Liu, C.M.; Wang, Q.Z. & Sakai, N. (2005). Power and temperature distribution during microwave thawing, simulated by using Maxwell's equations and Lambert law. *International Journal of Food Science and Technology*, 40, 9-21.

Lu, L., Tang, J. & Ran, X. (1999). Temperature and moisture changes during microwave drying of slices food. *Drying Technology*, 17(3), 413-432.

Madiouli, J., Sghaier, J., Lecomte, D. & Sammouda, H. (2011). Determination of porosity change from shrinkage curves during drying of food material. In press: *Food and Bioproducts Processing*, doi: 10.1016/j.fbp.2010.12.002, in press.

Manivannan, P. & Rajasimman, M. (2011). Optimization of process parameters for the osmotic dehydration of beetroot in sugar solution. *Journal of Food Process Engineering* 34 (3) : 804-825.

Marcotte, M. & Le Maguer, M. (1991). Repartition of water in plant tissue subjected to osmotic processes. *Journal of Food Process Engineering*, 13, 297–320.

Martinez-Delfa, G., Olivieri, A. & Boschetti, C.E. (2009). Multiple response optimization of styrene-butadiene rubber emulsion polymerization. *Computers and Chemical Engineering*, 33, 850-856.

Martínez-Monzó, J., Barat, J.M., González-Martínez, C., Chiralt, A. & Fito, P. (2000). Changes in thermal properties of apple due to vacuum impregnation. *Journal of Food Engineering*, 43, 213-218.

Maskan, M. (2001). Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48, 177-182.

Mayor, L. & Sereno A.M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials. *Journal of Food Engineering*, 61, 373–386.

Mayor, L., Moreira, R. & Sereno, A.M. (2011). Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) fruits. *Journal of Food Engineering*, 103, 29-37.

Meredith, R. (1998). *Engineering Handbook of Industrial Microwave Heating*. The Institution of Electrical Engineers, London.

Mújica-Paz, H., Valdez-Fragoso, A., López-Malo, A., Palou, E. & Welti-Chanes, J. (2003). Impregnation properties of somefruits at vacuum pressure. *Journal of Food Engineering*, 56, 307–314.

Nelson, S.O. & Datta, A.K. (2001). Dielectric properties of food materials and electric field interactions. In: *Handbook of microwave technology for food application*, Eds. Datta, A.K. y Anantheswaran, R.C., Marcel Dekker, New York.

Ni, H., & Datta, A. K. (2002). Moisture as related to heating uniformity in microwave processing of solids foods. *Journal of Food Process Engineering*, 22, 367–382.

Noshad, M., Mohebbi, M., Shahidi, F. & Mortazavi, S.A. (2011). Multi-objective optimization of osmotic–ultrasonic pretreatments and hot-air drying of quince using Response Surface Methodology. *Food and Bioprocess Technology*, doi: 10.1007/s11947-011-0577-8.

Okos, M. R., Narishman, G., Singh, R. K., & Weitnauer, A. C. (1992). Food dehydration. In *Handbook of food engineering*. New York: Marcel Dekker.

Ozdemir, M., Ozen, B.F., Dock, L.L. & Floros, J.D. (2008). Optimization of osmotic dehydration of diced green peppers by response surface methodology. *LWT - Food Science and Technology*, 41, 2044-2050.

Palou, E., López-Malo, A., Argáiz, A. & Welti, J. (1994). The use of Peleg's equation to model osmotic concentration of papaya. *Drying Technology*, 12, 965-978.

Panagiotou, N.M., Karathanos, V.T. & Maroulis, Z.B. (1998). Mass transfer modelling of the osmotic dehydration some fruits. *International Journal of Food Science and Technology*, 33, 267-284.

Parjoko, K.A., Rahman, M.S., Buckle, K.A. & Perera, C.O. (1996) Osmotic dehydration kinetics of pineapple wedges using palm sugar. *LWT - Food Science and Technology*, 29, 452-459.

Pauli, M.; Kayser, T.; Adamiuk, G. & Wiesbeck, W. (2007). Modeling of mutual coupling between electromagnetic, and thermal fields in microwave heating. In *Microwave Symposium–IEEE/MTT-S International*, 1983-1986.

Pereira, N. (2007). Study on the application of microwaves to the drying of osmotically treated bananas. Doctoral thesis. UNICAMP, Campinas, Brasil.

Pereira, N., Marsaioli Jr., A. & Ahrné, L.M. (2007). Effect of microwave power, air velocity and temperature on the final drying of osmotically dehydrated bananas. *Journal of Food Engineering*, 81, 79-87.

Phoungchandang, S. & Woods, J.L. (2000). Solar drying of bananas: mathematical model, laboratory simulation, and field data compared. *Journal of Food Science*, 65(6), 990-996.

Polley, S.L., Snyder, O.P. & Kotnour, P. (1980). A compilation for thermal properties of foods. *Food Technology*, 34, 76-94.

Prothon, F., Ahrné, L.M., Funebo, T., Kidman, S., Langton & M. & Sjöholm, I. (2001). Effects of combined osmotic and microwave dehydration of apple on texture, microstructure and rehydration characteristics. *LWT, Food Science and Technology*, 34, 95-101.

Rahman, M.S., Sablani, S.S. & Al-Ibrahin, M.A. (2001). Osmotic dehydration of potato: equilibrium kinetics. *Drying Technology*, 19(6), 1163-1176.

Raoult-Wack, A.L., Guilbert, S., Le Maguer, M. & Rios, G. (1991). Simultaneous water and solute transport in shrinking media. Part 1. Application to dewatering and impregnation soaking process analysis (osmotic dehydration). *Drying Technology*, 9, 589-612.

Raoult-Wack, A.L., Lafont, F., Rios, G. & Guilbert, S. (1989) Osmotic dehydration: Study of mass transfer in terms of engineering properties, In *Drying '89*, Eds A. S. Mujumdar & M. Roques, Hemisphere New York, pp. 487.

Rastogi, N.K. & Raghavarao, K.S.M.S. (1994). Effect of temperature and concentration on osmotic dehydration of coconut. *LWT, Food Science and Technology*, 27, 564–567.

Rastogi, N.K. & Raghavarao, K.S.M.S. (1997). Mass transfer during osmotic dehydration of carrot: comparison of different methods for the estimation of effective diffusivities. In *Engineering and Food (Part 2)*, Ed. R. Jowitt. London: Sheffield Academic Press.

- Rattanadecho, P., Aoki, K. & Akahori, M. (2001). Experimental and numerical study of microwave drying in unsaturated porous material. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 28, 605–616.
- Ravindra, M.R. & Chattopadhyay, P.K. (2000). Optimisation of osmotic preconcentration and fluidised bed drying to produce dehydrated quick-cooking potato cubes. *Journal of Food Engineering*, 44, 5-11.
- Roman, G., Rotstein, E. & Urbicain, M.J. (1979). Kinetics of water vapor desorption from apples. *Journal of Food Science*, 44 (1), 193–197.
- Ryynänen, S. (1995). The electromagnetic properties of food materials: A review of basic principles. *Journal of Food Engineering*, 26, 409–429.
- Sagar, V.R. & Kumar, P.S. (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal of Food Science and Technology - Mysore*, 47, 15-26.
- Salvatori, D., Andrés, A., Chiralt, A. & Fito, P. (1998). The response of some properties of fruits to vacuum impregnation. *Journal of Food Process Engineering*, 21, 59-73.
- Sanga, E.C.M., Mujumdar, A.S. & Raghavan, G.S.V. (2002). Simulation of convection–microwave drying for a shrinking material. *Chemical Engineering and Processing*, 41, 487–499.
- Sankata, C.K. & Castaigne F. (2004). Foaming and drying behaviour of ripe bananas. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.* 37, 517-525.
- Saravacos, G. D. (2005). Mass transfer properties of foods. In *Engineering Properties of Foods* Eds. M. A. Rao, S. S. H. Rizvi, & A.K. Datta. CRC Press, Taylor and Francis Group, Chapter 8.
- Schiffmann, R.F. (2001). Microwave processes for the food industry. In *Handbook of Microwave Technology for Food Applications*, Eds. Datta, A.K. y Anantheswaran, R.C. Marcel Dekker, New York.
- Sharma, S.K., Muvaney, S.J. & Rizvi, S.S. (2003). *Ingeniería de Alimentos, Operaciones unitarias y prácticas de laboratorio*. Ed. Limuza Wiley, Mexico, DF.
- Singh, B., Panesar, P.S. & Nanda, V. (2008). Optimization of osmotic dehydration process of carrot cubes in sucrose solution. *Journal of Food Process Engineering*, 31, 1-20.

Singh, B., Panesar, P.S., Nanda, V. & Kennedy, J.F. (2010). Optimisation of osmotic dehydration process of carrot cubes in mixtures of sucrose and sodium chloride solutions. *Food Chemistry*, 123, 590-600.

Sipahioglu, O. & Barringer, S.A. (2003). Dielectric properties of vegetables and fruits as a function of temperature, ash and moisture content. *Journal of Food Science*, 68 (1), 234–239.

Spiazzi, E.A. & Mascheroni, R.H. (1997). Mass Transfer Model for Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetables. I. Development of the Simulation Model. *Journal of Food Engineering*, 34(4), 387–410.

Spiazzi, E.A. & Mascheroni, R.H. (2001). Modelo de deshidratación osmótica de alimentos vegetales. *Mat – Serie A*, 4, 23-32.

Srikiatdena, J. & Roberts, J.S. (2008). Predicting moisture profiles in potato and carrot during convective hot air drying using isothermally measured effective diffusivity. *Journal of Food Engineering*, 84 (4), 516–525.

Sungsoontorn, S., Rattanadecho, P. & Pakdee, W. (2011). One-dimensional model of heat and mass transports and pressure built up in unsaturated porous materials subjected to microwave energy. *Drying Technology*, 29(2), 189–204.

Sweat, V.E. (1974). Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables. *Journal of Food Science*, 39, 1080–1083.

Tocci, A.M. & Mascheroni, R.H. (1996). Determinación por calorimetría diferencial de barrido de la capacidad calorífica y entalpía de frutas parcialmente deshidratadas en soluciones acuosas concentradas de azúcar. In *I Congreso Ibero-Americano de Ingeniería de Alimentos*, vol(I), 411-420.

Toledo, R.T. (2007) *Fundamentals of food process engineering*, 3rd Ed. Springer, Athens, GA 30602. USA.

Tong, C.H. & Lund, D.B. (1993). Microwave heating of baked dough products with simultaneous heat and moisture transfer. *Journal of Food Engineering*, 19, 319-339.

Torreggiani, D. & Bertolo, G. (2001). Osmotic pre-treatments in fruit processing: chemical, physical and structural effects. *Journal of Food Engineering*, 49(2-3), 247-253.

- Torregiani, D. (1993). Osmotic dehydration in fruit and vegetables. *Food Research International*, 26, 59–68.
- Verboven, P., Datta, A.K., Anh, N.T., Scheerlinck, N. & Nicolai, B.M. (2003). Computation of airflow effects on heat and mass transfer in a microwave oven. *Journal of Food Engineering*, 59, 181–190.
- Vollmer, M. (2004). Physics of the microwave oven. *Physics Education* “Special feature: food physics”, 39(1), 74-81. (doi:10.1088/0031-9120/39/1/006)
- Wang, R., Zhang, M. & Mujumdar, A.S. (2010). Effect of osmotic dehydration on microwave freeze-drying characteristics and quality of potato chips. *Drying Technology*, 28(6), 798-806.
- Yao, Z. & Le Maguer, M. (1996). Mathematical modelling and simulation of mass transfer in osmotic dehydration processes. Part I: Conceptual and mathematical models. *Journal of Food Engineering*, 29:349-360.
- Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A.S. & Wang, S. (2006). Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science and Technology*, 17, 524-534.
- Zhou, L., Puri, V.M., Anantheswaran, R.C. & Yeh, G. (1995). Finite element modelling of heat and mass transfer in food materials during microwave heating-model, development and validation. *Journal of Food Engineering*, 25, 509-529.
- Chenlo, F., Moreira, R., Pereira, G., & Ampudia, A. (2002). Viscosities of aqueous solutions of sucrose and sodium chloride of interest in osmotic dehydration processes. *Journal of Food Engineering*, 54, 347–352.



# Anexos

## D) Código Propio para la Optimización múltiple de la deshidratación osmótica mediante regresión polinomial (RP) y la metodología de la función de conveniencia (MFC) usando Matlab.

```

% -----
% PROGRAMA 'RP-MFC' PARA TESIS DOCTORAL - 2013
% AJUSTE POLINOMIAL Y METODOLOGÍA DE LA FUNCIÓN DE CONVENIENCIA
% OPTIMIZACIÓN DE LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE PLACAS DE PERA
% -----

% Factores: CONCENTRACIÓN DE LA SOLUCIÓN Y TIEMPO DE PROCESO
% Respuestas: PÉRDIDA DE AGUA, GANANCIA DE SÓLIDOS Y PÉRDIDA DE PESO
% -----

clear all,clc,close all

A=xlsread('od_pear_polynomial_WL.xls');

t=A(:,1);
Az=A(:,2);
WL=A(:,3);
SG=A(:,4);
WR=A(:,5);
n=length(t);

%MODELO POLINOMIAL PARA LA PÉRDIDA DE AGUA (WL)
%WL=b1+b2.t+b3.Az+b4.t.^2+b5.Az.^2+b6.t.Az
X11=ones(n,1);
X12=(t);
X13=(Az);
X14=(t.^2);
X15=(Az.^2);
X16=(Az.*t);
X1=[X11,X12,X13,X14,X15,X16];
[b1,bint1,R1,Rint1,stat1]=regress((WL),X1,0.05);

%MODELO POLINOMIAL PARA LA GANANCIA DE SOLIDOS (SG)
%WL=b1+b2.t+b3.Az+b4.t.^2+b5.Az.^2+b6.t.Az
X21=ones(n,1);
X22=(t);
X23=(Az);
X24=(t.^2);
X25=(Az.^2);
X26=(Az.*t);
X2=[X21,X22,X23,X24,X25,X26];
[b2,bint2,R2,Rint2,stat2]=regress((SG),X2,0.05);

%MODELO POLINOMIAL PARA LA REDUCCION DE PESO (WR)
%WL=b1+b2.t+b3.Az+b4.t.^2+b5.Az.^2+b6.t.Az
X31=ones(n,1);
X32=(t);
X33=(Az);
X34=(t.^2);

```

```

X35=(Az.^2);
X36=(Az.*t);
X3=[X31,X32,X33,X34,X35,X36];
[b3,bint3,R3,Rint3,stat3]=regress((WR),X3,0.05);

%RESULTADOS REGRESION
b1%Coeficientes Modelo WL
R2_WL=stat1(1)%Coeficiente de Correlacion
p_value=stat1(3)

b2%Coeficientes Modelo SG
R2_SG=stat2(1)%Coeficiente de Correlacion
p_value=stat2(3)

b3%Coeficientes Modelo WR
R2_WR=stat3(1)%Coeficiente de Correlacion
p_value=stat3(3)

%Superficies de Respuesta factores: Sucrose-time
[t1,Az1]=meshgrid(min(t):(max(t)-min(t))/20:max(t),...
    min(Az):(max(Az)-min(Az))/20:max(Az));

WLpre=b1(1)+b1(2)*t1+b1(3)*Az1+...
    b1(4)*t1.^2+b1(5)*Az1.^2+b1(6)*Az1.*t1;

SGpre=b2(1)+b2(2)*t1+b2(3)*Az1+...
    b2(4)*t1.^2+b2(5)*Az1.^2+b2(6)*Az1.*t1;

WRpre=b3(1)+b3(2)*t1+b3(3)*Az1+...
    b3(4)*t1.^2+b3(5)*Az1.^2+b3(6)*Az1.*t1;

figure(1)
surfc(t1,Az1,WLpre)
title('Pear')
% shading interp
colorbar
xlabel('Time [min]','fontsize',12)
ylabel('Concentration [\circBrix]','fontsize',12)
zlabel('WL [%]','fontsize',14)

figure(2)
surfc(t1,Az1,SGpre)
title('Pear')
% shading interp
colorbar
xlabel('Time [min]','fontsize',12)
ylabel('Concentration [\circBrix]','fontsize',12)
zlabel('SG [%]','fontsize',14)

figure(3)
surfc(t1,Az1,WRpre)
title('Pear')
% shading interp
colorbar
xlabel('Time [min]','fontsize',12)

```

```

ylabel('Concentration [\circBrix]', 'fontsize', 12)
xlabel('WR [%]', 'fontsize', 14)

%DESIRABILITY FUNCTION METHOD
%-----
%Constraints: Maximaze WL, WR and Minimaze SG
TWL=max(WL);
UWL=max(WL);
LWL=min(WL);

TSG=min(SG);
USG=max(SG);
LSG=min(SG);

TWR=max(WR);
UWR=max(WR);
LWR=min(WR);

r=1;%factor de peso
for i=1:length(Az1)%PARA MAXIMIZAR WL
    for j=1:length(t1)
        if WLpre(i,j)<LWL
            d1(i,j)=0;
        elseif WLpre(i,j)>TWL
            d1(i,j)=1;
        else
            d1(i,j)=((WLpre(i,j)-LWL)/(TWL-LWL))^r;
        end
    end
end

figure(4)
surfc(t1,Az1,d1)
title('Pear')
% shading interp
colorbar
xlabel('Time [min]', 'fontsize', 12)
ylabel('Concentration [\circBrix]', 'fontsize', 12)
xlabel('d WL', 'fontsize', 14)

for i=1:length(Az1)%PARA MINIMIZAR SG
    for j=1:length(t1)
        if SGpre(i,j)<TSG
            d2(i,j)=1;
        elseif SGpre(i,j)>USG
            d2(i,j)=0;
        else
            d2(i,j)=((USG-SGpre(i,j))/(USG-TSG))^r;
        end
    end
end

figure(5)
surfc(t1,Az1,d2)

```

```

title('Pear')
% shading interp
colorbar
xlabel('Time [min]', 'fontsize',12)
ylabel('Concentration [\circBrix]', 'fontsize',12)
zlabel('d SG', 'fontsize',14)

for i=1:length(Az1)%PARA MAXIMIZAR WR
    for j=1:length(t1)
        if WRpre(i,j)<LWR
            d3(i,j)=0;
        elseif WRpre(i,j)>TWR
            d3(i,j)=1;
        else
            d3(i,j)=((WRpre(i,j)-LWR)/(TWR-LWR))^r;
        end
    end
end

figure(6)
surfc(t1,Az1,d3)
title('Pear')
% shading interp
colorbar
xlabel('Time [min]', 'fontsize',12)
ylabel('Concentration [\circBrix]', 'fontsize',12)
zlabel('d WR', 'fontsize',14)

('Factor de Importancia')
v=[3 1 3]%Importance factor
for i=1:length(Az1)%WHOLE DESIRABILITY
    for j=1:length(t1)
        D(i,j)=(d1(i,j)^v(1)*d2(i,j)^v(2)*d3(i,j)^v(3))^(1/sum(v));
    end
end

figure(7)
surfc(t1,Az1,D)
title('Pear')
% shading interp
colorbar
xlabel('Time [min]', 'fontsize',12)
ylabel('Concentration [\circBrix]', 'fontsize',12)
zlabel('Total Desirability Function', 'fontsize',12)
colormap winter

%Maximun Value of Desirability Function
[Valuemax,II]=max(D);
[Dmax,J]=max(Valuemax);
I=II(J);

%Muestra los resultados en pantalla (Workspace)
display('D maxima Pear'),Dmax
display('Posicion FILA I - COLUMNA J'),[I,J]
display('Optimal Time'),t1(1,J)

```

```
display('Optimal Concentracion'),Az1(I,1)
display('Optimal WL'),WLpre(I,J)
display('Optimal SG'),SGpre(I,J)
display('Optimal WR'),WRpre(I,J)
```

```
% Fin del programa
```

```
% -----
```

## II) Código Propio para la Deshidratación Osmótica usando Matlab.

```

% -----
% PROGRAMA 'MDFC' PARA THESIS DOCTORAL - 2013
% Ejemplo: Validación experimentos propios aplicados a DO de
"CALABACITA"
% Modelado de la Deshidratación osmótica (Modelo Propuesto)
% Solución del Modelo Difusional en Flujo Contracorriente (MDFC)
%-----

clear all, clc, close all

%MODELADO DE LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE PLACAS DE CALABACITA
%EN SOLUCIÓN DE SACAROSA A 60°BRIX

global densf Tod

% Condiciones Iniciales
yo=0.91;%humedad inicial [kg agua/kg w.b.]
so=0.08;%solidos solubles iniciales [kg ss/kg w.b.]
Tod=30;
PMw=18e-3;%Peso molecular agua [kg/mol]
PMs=342.3e-3;%Peso molecular soluto [kg/mol] azucar
densf=1030;%Densidad de la fruta [kg/m3]"CALABACITA"
vmw=1.810e-5;%volumen molar agua[m3/mol]
vms=21.110e-5;%volumen molar soluto [m3/mol] azucar

% Dimensiones de la Muestra
% Forma: SLAB
esp=0.010;%Espesor de la muestra [m]
plx=0.035;%Largo [m]
ply=0.035;%Ancho [m]

semie=esp/2;%Semiespesor de la placa [m]

area=pi*((plx+ply)/2/2)^2;%Area superior/inferior de la placa [m2]
vols=area*semie;%Volumen de la mitad de la muestra [m3]
vol=area*esp;%Volumen de la muestra [m]

masaini=densf*vol;%Masa inicial de la fruta [kg]

msseco=masaini*(1-yo);%Masa inicial de solido seco [kg]

mwini=masaini*yo;%Masa inicial de agua [kg]
msini=masaini*so;%Masa inicial de solidos solubles [kg]
mins=masaini-mwini-msini;%Masa inicial Insolubles [kg]

Cwini=mwini/vol;%Concentración inicial de agua [kg/m3]
Csini=msini/vol;%Concentración inicial de solidos solubles [kg/m3]
Cwinim=mwini/PMw/vol;%[mol/m3]
Csinim=msini/PMs/vol;%[mol/m3]

Cweq=0.40;%Equilibrio con la solucion
Cseq=0.23;%Maximo por formacion costra

```

```

Cweqm=Cweq*densf/PMw;%[mol/m3]
Cseqm=Cseq*densf/PMS;%[mol/m3]

Cweqm=Cweqm;
Cseqm=Cseqm;

%-----

% Discretización Espacial
xm=esp;%Placa plana de banana
in=30;%100 optimo para el perfil medio
x=linspace(0,xm,in+1);
dx=xm/in;

% Discretización Temporal
tm=60*60*4;% Para una hora de proceso
dt=300;%100 optimo para el perfil medio
t=0:dt:tm;

% Humedad Inicial de las Placas de Pera [kg agua/kg bh]
Cw=Cwini*ones(size(x));
Cwmolar=Cwinim*ones(size(x));%[mol/m3]
CCw(1,:)=Cw;
CCwmol(1,:)=Cwmolar;%[mol/m3]

% Solidos solubles Iniciales de las Placas de Pera [kg agua/kg bh]
Cs=Csini*ones(size(x));
Csmolar=Csinim*ones(size(x));%[mol/m3]
CCs(1,:)=Cs;
CCsmol(1,:)=Csmolar;%[mol/m3]

UBHini=mwini/masaini;%humedad en base humeda inicial
UBSini=mwini/msseco;%humedad en base seca inicial
UBH=UBHini*ones(size(x));
UBS=UBSini*ones(size(x));
masatot=masaini*ones(size(x));

tt(1)=t(1);

% Geometria (0-placa plana, 1-cilindro infinito, 2-esfera)
a=0;% Placas de Pera %

A1=zeros(length(x));
A2=zeros(length(x));

% Discretización Implícita ATRASADA (armado de la matriz tri-diagonal)

s=dt/dx^2;

mwt=mwini*ones(length(x),1);
mst=msini*ones(length(x),1);

for i=2:length(t)
    %Borde1 x=0
    A1(1,1)=[1];

```

```

b1(1)=Cweqm;
A2(1,1)=[1];
b2(1)=Cseqm;
% Nodos Interiores
for j=2:length(x)-1
    A1(j,[j-1 j j+1])=[-
s*Dee(Cwmolar(j),Csmolar(j))+s*(Dee(Cwmolar(j+1),Csmolar(j+1))-
Dee(Cwmolar(j-1),Csmolar(j-1)))/4 ...
    1+2*s*Dee(Cwmolar(j),Csmolar(j)) ...
    -s*Dee(Cwmolar(j),Csmolar(j))-
s*(Dee(Cwmolar(j+1),Csmolar(j+1))-Dee(Cwmolar(j-1),Csmolar(j-1)))/4];

    b1(j)=Cwmolar(j);

    A2(j,[j-1 j j+1])=[-
s*Dee(Cwmolar(j),Csmolar(j))+s*(Dee(Cwmolar(j+1),Csmolar(j+1))-
Dee(Cwmolar(j-1),Csmolar(j-1)))/4 ...
    1+2*s*Dee(Cwmolar(j),Csmolar(j)) ...
    -s*Dee(Cwmolar(j),Csmolar(j))-
s*(Dee(Cwmolar(j+1),Csmolar(j+1))-Dee(Cwmolar(j-1),Csmolar(j-1)))/4];

    b2(j)=Csmolar(j);
end

%Borde2 x=2L
A1(j+1,j+1)=[1];
b1(j+1)=Cweqm;
A2(j+1,j+1)=[1];
b2(j+1)=Cseqm;

%Resuelve la matrix tridiagonal
Cwmolarnew=inv(A1)*b1'; %[mol/m3]
Csmolarnew=inv(A2)*b2'; %[mol/m3]

%-----
%Masa de agua y sólidos solubles al tiempo t
mwt=Cwmolarnew*vol*PMw; %[kg]
mst=Csmolarnew*vol*PMs; %[kg]
mwevap=mwini-mwt; %[kg]

%Humedad en base húmeda y seca al tiempo t
ubh=mwt./(mwt+mst+mins);
ubs=mwt./(mst+mins);
%Pérdida de agua y ganancia de sólidos al tiempo t
wl=(mwini-mwt)./masaini*100;
sg=(mst-msini)./masaini*100;

%Corrección de la Concentración
Cwmolarnew1=mwt./(mwt+mst+mins)*densf/PMw;
Csmolarnew1=mst./(mwt+mst+mins)*densf/PMs;

%Corrección de la masa de agua al tiempo t
mwt=Cwmolarnew1*vol*PMw; %[kg]
mst=Csmolarnew1*vol*PMs; %[kg]

```

```

    %Asigna los nuevos valores para el tiempo nuevo
    CCwmol(i,:)=Cwmolarnew1;
    CCsmol(i,:)=Csmolarnew1;
    UBH(i,:)=ubh;
    UBS(i,:)=ubs;
    WL(i,:)=wl;
    SG(i,:)=sg;
    mmwt(i,:)=mwt;
    mmst(i,:)=mst;
    mmwevap(i,:)=mwevap;

    %Reemplaza los nuevos valores de concentracion
    Cwmolar=Cwmolarnew1;
    Csmolar=Csmolarnew1;
end

%Cálculo de la concentration media agua
CCwmolm=sum(CCwmol')/length(CCwmol(1,:));

%Cálculo de la concentration media soluto
CCsmolm=sum(CCsmol')/length(CCsmol(1,:));

UBHmm=CCwmolm/densf*PMw;
CCsm=CCsmolm/densf*PMs;

UBHm=sum(UBH')/length(UBH(1,:));

tmin=t/60;

AA1=xlsread('OD-Cw-calabacita_Bambicha_30C');
Cwexp40=AA1(:,2)/100;
Cwexp60=AA1(:,3)/100;
texp1=AA1(:,1);
Cwexp_molar=Cwexp60*densf/PMw;

AA2=xlsread('OD-Cs-calabacita_Bambicha_30C');
Csexp40=AA2(:,2)/100;
Csexp60=AA2(:,3)/100;
texp2=AA2(:,1);
Csexp_molar=Csexp60*densf/PMs;

figure(1)
plot(tmin,CCwmolm)
title('Concentracion Molar Agua [mol/m3]')
xlabel('t (min)')
ylabel('Cw mol [mol/m3]')
hold on
plot(texp1,Cwexp_molar,'o')
axis([0 250 20000 58000])
hold off

figure(2)
plot(tmin,CCsmolm)
title('Concentracion Molar Solidos solubles')
xlabel('t (min)')

```

```

ylabel('Cs mol [mol/m3]')
hold on
plot(texp2,Csexp_molar,'o')
axis([0 250 0 2000])
hold off

figure(3)
% plot(tmin,UBHm, '.',tmin,UBHm)
plot(tmin,UBHm)
title('UBH')
xlabel('t (min)')
ylabel('Cw media [kg/kg w.b] CALABACITA')
axis([0 250 0 1])
hold on
%Datos experimentales OD-Calabacita
plot(texp1,Cwexp60,'.b')
% axis([0 120 0.77 0.87])
hold off

figure(4)
% plot(tmin,UBHm, '.',tmin,UBHm)
plot(tmin,CCsm)
title('Conc Solidos Solubles')
xlabel('t (min)')
ylabel('Cs media [kg/kg w.b] CALABACITA')
axis([0 250 0 1])
hold on
%Datos experimentales OD-Bananas
plot(texp2,Csexp60,'.b')
% axis([0 120 0.77 0.87])
hold off

break
%-----
%IMPRIME LOS RESULTADOS EN PLANILLAS EXCEL
%-----

RR1=[t'/60,UBHm];
xlswrite('Cw_modelOD60Bx-30C_Calabacita.xls',RR1)

RR2=[t'/60,CCsm];
xlswrite('Cs_modelOD60Bx-30C_Calabacita.xls',RR2)

```

Función asociada al programa principal:

```

function g=Dee(cw,cs)%"CALABACITA - en solución de sacarosa"
global densf Tod
rhofood=densf*1e3;%densidad del alimento

cwm=cw;%[mol/m3]
csm=cs;%[mol/m3]

kB=1.38e-23;

```

```
T=Tod+273.16;%Temperatura absoluta de la solución osmótica
rB=4.9e-10;
%AGUA.visc(30°C)=797.7e-6;visc(40°C)=653e-6;[Pa.s]
%AGUA.dens(30°C)=995.6;dens(40°C)=992.2;[kg/m3]
muw=797.7e-6;%viscosidad del agua
rhow=995.6;%densidad del agua

mu=(995+0.1284.*csm).*muw./rhow.*(1+0.73.*csm./(995+0.1284.*csm)).*...
    exp((csm./(995+0.1284.*csm)).^1.10/(8.345.*(T/273.16)-7.402));
D=kB*T./(6*pi*rB.*mu);

g=D;
```

### III) Código Propio para la Deshidratación con Microondas usando Matlab.

```

% -----
% PROGRAMA 'MDMO' PARA THESIS DOCTORAL - 2013
% Ejemplo: Validación experimentos de Cui y col (2005) "Zanahoria"
% Alimento irradiado por una cada y sin ciclos de potencia
% -----

clear all,clc,close all
global TC

%
*****
% LECTURA DE DATOS PARTICULARES DE LA MUESTRA
%
*****
DENSO=1;
IC=0;
IIC=0;

YO=0.8848;%humedad zanahoria [kg agua/kg w.b.]

% CALCULAR EN FUNCION DEL CONTENIDO DE AGUA

POTS=0;%potencia en la superficie [W]

POTS_C=16;%potencia absorbida [W]
%
*****

HR=0.62;%humedad relativa

FINL=60*10;%tiempo final proceso STOP (en segundos)

% Dimensiones Cilindro finito
ESP=0.004;%espesor del producto [m]
PLX=0.040;%largo [m]
PLY=0.040;%ancho [m]

SEMIE=ESP/2;%semi espesor de la placa [m]

T0=15;%temperatura inicial [°C]
TA=30;%temperatura del aire [°C]

% AREA=PLX*PLY;%area superior/inferior del cilindro de pera
AREA=pi*((PLX+PLY)/2/2)^2;
VOLUMEN=AREA*SEMIE;%volumen de la mitad del producto

MASAINI=1140*VOLUMEN;%masa SEMIESPESOR [kg]
EMEINI=MASAINI*YO;%masa inicial AGUA del producto [kg]
EMEDIS2=EMEINI;%masa disponible [kg]
EMEINI2=EMEDIS2;

```

```

EMETOT=MASAINI;%masa inicial [kg]

% EMESS=DENSCF(T0)*VOLUMEN-EMEINI
EMESS=EMETOT*(1-YO);%masa de solido seco [kg]

% CURVA DE SORCION DEL ALIMENTO DE TRABAJO hr=0.75

WEQUI=0.3657;%humedad equilibrio en base seca [kg agua/kg s.s.]

EMEEQ=WEQUI*EMESS;%masa de agua en equilibrio [kg agua]
CEQUI=DENSO*FACTOR(WEQUI);%concentracion en equilibrio [kg agua/m3
alimento]

EMEDIS=EMEINI2;%masa de agua total disponible [kg]

EMET=0;%masa de agua en el tiempo t
EMEVAP=0;%masa de agua vaporizada en el tiempo (acumulado) [kg agua]

% *****
% PROPIEDADES DEL AIRE
% *****
PMA=28.84/1000;
RG=8.314;
PRESIA=1.01E5;
TAK=TA+273.16;
DENSIA=(PRESIA*PMA)/(RG*TAK);
CPA=1025.75+0.07724*TAK+0.00001488*TAK^2-5713500/(TAK^2);
CONDA=(0.002646*TAK^1.5)/(TAK+245.4*10^(-12/TAK));
VISCA=(1.458E-6*TAK^1.5)/(TAK+110.4);

%*****
% PROPIEDADES DE LA MASA
%*****
POROSI=YO;
TORTUO=1;

% *****
% PROPIEDADES DEL AGUA
% *****

TC=30;%temperatura de equilibrio

DELTHV=2.4e6;
DENSL=1000;
VISCOL=5.468e-4;
PERMEAL=5e-14;
PATM=PRESIA;

%*****

SUIM=0.0;
SUPA=0.0;
EVAP=0.0;

DENSO=DENSCF(T0);

```

```

% VAPOR EN LA SUPERFICIE DEL ALIMENTO

PVAS=PSAT(TA);
PVA=PVAS;
PM=18/1000;

CSAIRE=PVA*PM/(RG*TAK);%concentración maxima de agua en aire, ley
gases ideales
CVA=HR*PVA*PM/(RG*TAK);%por psicrometria - concentracion de agua en el
aire

% DIFERENCIA DE CONCENTRACIONES DE VAPOR CARACTERISTICA
% DE LA PELICULA DE AIRE

DIFCAI = CSAIRE - CVA;

% CONVERSION A CONCENTRACION (KG/M CUBICO) Y HUMEDAD PORCENTUAL
% FACTOR ES EL COCIENTE W/(1+W)

CCERO=DENSO*YO;

% DIFERENCIA DE CONCENTRACIONES CARACTERISTICA DE AGUA
% A TRAVES DE LA PELICULA EXPRESADA COMO MEDIO SOLIDO EQUIVALENTE

CEQUI=EMEEQ/VOLUMEN;

DIFCM = CCERO - CEQUI;

TMEDIA=T0;
YOMED=YO;
CMEDIA=CCERO;

UBS=100*EMEDIS/EMESS;
UBSM=100*(EMEDIS)/EMESS;
UBS1=UBS;

% CORREL DE TREYBAL PARA RE LE 5E5 AGREGAR LAS CORRELACIONES
% para el cálculo de k'm y h
PR=CPA*VISCA/CONDA;
SC=VISCA/(DENSIA*DVA(T0,TA));

% CORREL DE TREYBAL PARA RE LE 5E5

% RNU=0.664*PR^0.3333*RE1^0.5
% RNUHAM=8.77*PR^0.3333*RE1^0.328

H=0.5;
RNU=H*PLX/CONDA;
RE1=(RNU/(0.664*PR^0.3333))^2;

RNUAB=1.235*RE1^0.444*SC^0.3333;
K=RNUAB*DVA(T0,TA)/PLX;

%=====

```

```

% CORRELACION PARA CONSIDERAR LA CONVECCIÓN DE AIRE CALIENTE
%=====
% % calculo de 'h' para placa plana
%
% % CORREL DE TREYBAL PARA RE LE 5E5
%
% RNU=0.664*PR^0.3333*RE1^0.5
% H=RNU*CONDA/PLX
%
% % CORRELACION PARA K POR ANALOGIA
% RNUAB=RNU*(PR^(-0.333333))/(SC^(-0.33333))
% K=RNUAB*DVA(T0,TA)/PLX
%=====

% PARA LA TRANSFERENCIA A T POSITIVAS SE EMPLEA EL K
% EQUIVALENTE, EN UNIDADES DE PRODUCTO
KCG = K*DIFCAI/DIFCM;%coeficiente de transferencia de masa k'm

% *****
% INICIALIZACION
% LA POSICION CENTRAL ES I=1
% SE LLAMARA R A LA POSICION DEL FRENTE DE EVAPORACION
% *****
RANT=SEMIE;%longitud al tiempo anterior
R=SEMIE;%espesor al tiempo t

% *****
% LECTURA DE DX, DT E INTERVALO DE IMPRESION DTIMP
% *****

SUMIN=0;
TAP=10;

NINC=15;%numero de incrementos
DT=0.1;%delta t
DTIMP=1;
TIEIMP=DTIMP;

DTANT=DT;

L=NINC;%contador de nodo
L1=L+1;%nodo borde
DX1=SEMIE/NINC;%delta x

M=L1;
MM=L1;

% *****
% INICIALIZACION DE VARIABLES
% *****
CCERO=EMEDIS2/(VOLUMEN);
TIE=0;

% The Bulk (fruta o vegetal)***

```

```

for I=1:L1
    T(I)=T0;
    C(I)=CCERO;
    POTENCIA(I)=0;
end

% Puntos interiores ***

for I=2:L1-1
    POS(I)=(I-1)*DX1;

    POTENCI1=exp(-2*ALFAE(T0)*(SEMIE-(POS(I)-DX1/2)));
    POTENCI2=exp(-2*ALFAE(T0)*(SEMIE-(POS(I)+DX1/2)));
    POTENCIA(I)=(-POTENCI1+POTENCI2)*POTS;

    VOL1=PLY*PLX*(POS(I)+DX1/2);
    VOL2=PLY*PLX*(POS(I)-DX1/2);
    VOL(I)=VOL1-VOL2;
end

% Centro ***
POS(1)=0;
VOL(1)=PLY*PLX*(POS(1)+DX1/2);
POTENCI1=exp(-2*ALFAE(T0)*(SEMIE));
POTENCI2=exp(-2*ALFAE(T0)*(SEMIE-(POS(1)+DX1/2)));

POTENCIA(1)=(-POTENCI1+POTENCI2)*POTS;

% BORDE ***
POS(L1)=(L1-1)*DX1;

POTENCI1=exp(-2*ALFAE(T0)*(SEMIE-(POS(L1)-DX1/2)));
POTENCI2=exp(-2*ALFAE(T0)*(SEMIE-(POS(L1))));
POTENCIA(L1)=(-POTENCI1+POTENCI2)*POTS;

VOL1=PLY*PLX*(POS(L1));
VOL2=PLY*PLX*(POS(L1)-DX1/2);

VOL(L1)=VOL1-VOL2;

%*****
% SE GUARDAN LOS VALORES EN VARIABLES ANTERIORES
%*****

nt1=0;
while T(1)<TC & TIE<=FINL
    for I=1:L1
        TANT(I)=T(I);
        CANT(I)=C(I);
    end

    TIE=TIE+DT; % AVANCE DEL TIEMPO
%     rel=TIE/30;%INTERMITTENT SUPPLY SETTING
%     IREL=fix(TIE/30);
%     TIEAP=7.5;%tiempo apagado del magnetron

```

```

%     TIEENC=22.5;%tiempo prendido del magnetrón
%     difer=rel-IREL;
%     t1=0.77;
%     t2=0.23;
%     if difer>=t1
%         POTS=0;
%     else
%         POTS=POTS_C;
%     end

POTS=POTS_C;

% *****
% ECUACIONES DE BALANCE DE MASA (matriz tridiagonal AM.C(i-1) +
BM.C(i) + CM.C(i+1) = DM)
% *****

% en el centro
I=1;
FCC=1/DT;
FCC1=(IC+1)*DIFT(TANT(I))/DX1^2;
BM(1)=FCC+FCC1;
CM(1)=-1*FCC1;
DM(1)=CANT(I+1)*FCC1+CANT(I)*(FCC-FCC1);

% Puntos Interiores
for I=2:L1-1
    FCC2=1/DT;
    FCC3=DIFT(TANT(I))/DX1^2 ;
    FCC4=DIFT(TANT(I-1))/(8*DX1^2);
    FCC5=DIFT(TANT(I+1))/(8*DX1^2);
    FCI5=DIFT(TANT(I))*IC/(4*(I-1)*DX1^2);
    AM(I)=-1*FCC3/2.+FCC5-FCC4+FCI5;
    BM(I)=FCC2+FCC3;
    CM(I)=-1*FCC3/2.-FCC5+FCC4-FCI5;
    DGG1=CANT(I+1)*(FCC3/2.+FCC5-FCC4+FCI5)+CANT(I)*(FCC2-FCC3);
    DM(I)=DGG1+CANT(I-1)*(-1*FCC5+FCC3/2.+FCC4-FCI5);
end

% Borde
I=L1;

DGG9=KCG*2*DX1/DIFT(TANT(I));
FCC25=1/DT;
FCC26=DIFT(TANT(I))/DX1^2;
FCC27=DIFT(TANT(I-1))/(8*DX1^2);
FCC28=DIFT(TANT(I))/(8*DX1^2);
DIC10=DIFT(TANT(I))*IC/(4*(I-1)*DX1^2);
DG10=FCC26/2.+FCC28-FCC27+DIC10;
AM(I)=-FCC26;
BM(I)=FCC25+DGG9*DG10+FCC26;
DGG11=CANT(I)*(-1*DGG9*DG10+FCC25-FCC26);
DGG12=CANT(I-1)*FCC26;
DM(I)=DGG11+DGG12+DGG9*CEQUI*2*DG10;

```

```

COEFM=zeros(L1,L1);
for J=1:L1
    COEFM(J,J)=BM(J);
end
for J=1:L1-1
    COEFM(J,J+1)=CM(J);
end
for J=2:L1
    COEFM(J,J-1)=AM(J);
end

DVM=DM';
C=COEFM\DVM;%Calculo de la concentracion en x al tiempo t
(resolucion Matriz tridiagonal)

semel=0;
flux=DIPT(TANT(L))*(C(L)-C(L1))/DX1;

%*****
% ECUACIONES DEL BCE DE ENERGIA
%*****

%   CALCULA ENERGIA

%   Centro (energía)

I=1;
FCC=VOL(I)*DENSCF(TANT(I))*CPCF(TANT(I))/DT;
FCC1=VOL(I)*(IC+1)*COND CF(TANT(I))/DX1^2;
BE(1)=FCC+FCC1;
CE(1)=-1*FCC1;
POTENCI1=exp(-2*ALFAE(TANT(I))*(SEMIE));
POTENCI2=exp(-2*ALFAE(TANT(I))*(SEMIE-(POS(1)+DX1/2)));
POTENCIA(1)=(-POTENCI1+POTENCI2)*POTS;
DE(1)=TANT(I+1)*FCC1+TANT(I)*(FCC-FCC1)+POTENCIA(I);

for I=2:L1-1
    FCC2=VOL(I)*DENSCF(TANT(I))*CPCF(TANT(I))/DT;
    FCC3=VOL(I)*COND CF(TANT(I))/DX1^2;
    FCC4=VOL(I)*COND CF(TANT(I-1))/(8*DX1^2);
    FCC5=VOL(I)*COND CF(TANT(I+1))/(8*DX1^2);
    FCI5=VOL(I)*COND CF(TANT(I))*IC/(4*(I-1)*DX1^2);
    AE(I)=-1*FCC3/2.+FCC5-FCC4+FCI5;
    BE(I)=FCC2+FCC3;
    CE(I)=-1*FCC3/2.-FCC5+FCC4-FCI5;
    DGG1=TANT(I+1)*(FCC3/2.+FCC5-FCC4+FCI5)+TANT(I)*(FCC2-FCC3);
    POTENCI1=exp(-2*ALFAE(TANT(I))*(SEMIE-(POS(I)-DX1/2)));
    POTENCI2=exp(-2*ALFAE(TANT(I))*(SEMIE-(POS(I)+DX1/2)));
    POTENCIA(I)=(-POTENCI1+POTENCI2)*POTS;
    DEF=DGG1+TANT(I-1)*(-1*FCC5+FCC3/2.+FCC4-FCI5)+POTENCIA(I);
    DE(I)=DEF;
end

% Borde (Energía)

```

```

I=L1;
DGG9=H*2*DX1/CONDCF(TANT(I));
FCC25=VOL(I)*DENSCEF(TANT(I))*CPCF(TANT(I))/DT;
FCC26=VOL(I)*CONDCF(TANT(I))/DX1^2;
FCC27=VOL(I)*CONDCF(TANT(I-1))/(8*DX1^2);
FCC28=VOL(I)*CONDCF(TANT(I))/(8*DX1^2);
DIC10=VOL(I)*CONDCF(TANT(I))*IC/(4*(I-1)*DX1^2);
DG10=FCC26/2.+FCC28-FCC27+DIC10;

DG178=DG10*DELTHV*2*DX1*KCG/CONDCF(TANT(I));

AE(I)=-FCC26;
BE(I)=FCC25+DGG9*DG10+FCC26;
DGG11=TANT(I)*(-1*DGG9*DG10+FCC25-FCC26);
DGG12=TANT(I-1)*FCC26;
DGG14=DGG9*TA*2*DG10;
DGG15=DG178*(CANT(I)+C(I));
DGG16=DG178*CEQUI*2;

POTENCI1=exp(-2*ALFAE(TANT(I))*(SEMIE-(POS(L1)-DX1/2)));
POTENCI2=exp(-2*ALFAE(TANT(I))*(SEMIE-(POS(L1))));
POTENCIA(L1)=(-POTENCI1+POTENCI2)*POTS;

DE(I)=DGG11+DGG12+DGG14+POTENCIA(I)+DGG15-DGG16;

%*****
%OBTENCIÓN DE LA MATRIZ TRIDIAGONAL PARA CALCULO PERFILES
TEMPERATURA
%*****
COEFT=zeros(L1,L1);%Comienzo matriz tridiagonal de Temperatura
for J=1:L1
    COEFT(J,J)=BE(J);
end
for J=1:L
    COEFT(J,J+1)=CE(J);
end
for J=2:L1
    COEFT(J,J-1)=AE(J);
end

DVE=DE';
T=inv(COEFT)*DVE;%Calculo de la concentracion en x al tiempo t

% Calculo TMEDIA
% CALCULO TMEDIA SUPONGO 16 PUNTOS
SUTOT=0;
% Metodo Trapecios
for I=2:(L1-1)
    SUTOT=SUTOT+T(I);%suma todo menos los extremos
end
AREAT=(DX1/2)*(T(1)+T(L1))+2*SUTOT;
TMEDIA=AREAT/SEMIE;

```

```

% CALCULO CMEDIA
% CONSIDERAR QUE SUPONGO L1 PUNTOS (caso nuestro=16)
SUTOTC=0;
% Metodo Trapecios
for I=2:(L1-1)
    SUTOTC=SUTOTC+C(I);%suma todo menos los extremos
end
AREAC=(DX1/2)*(C(1)+C(L1)+2*SUTOTC);
CMEDIA=AREAC/SEMIE;

% CALCULO DE LA MASA EVAPORADA
EMET=CMEDIA*VOLUMEN;%masa total de agua SEMIESPESOR [kg fruta]
EMEVAPT=EMEDIS2-EMET;%masa evaporada acumulada [kg]
EMEVAP=EMEVAPT;%masa evaporada en el tiempo t

EMERREAL=2*EMET;

UBH(nt1+1)=EMERREAL/(EMERREAL+EMESS*2);%humedad al tiempo t
UBH1(nt1+1)=EMERREAL/(EMEINI*2);
UBS1(nt1+1)=EMERREAL/(EMESS*2);

for I=1:L1
    POS(I)=(I-1)*DX1;
end

for I=1:L1 %estabilizacion de la temperatura
    if T(I)>=TC
        T(I)=TC;
    end
end

nt1=nt1+1;
TMAT(nt1,:)=T; %guarda el perfil de TEMP al tiempo t
TMAT1(nt1)=TMEDIA;
end

tiempo_etapa_1=nt1*0.1 %tiempo etapa 1 en segundos

% *****
% COMIENZA LA VAPORIZACION
% *****
nt2=nt1;
while TIE<=FINL %mientras el tiempo sea menor o igual

    TIE=TIE+DT; %AVANCE DEL TIEMPO

%SECUENCIA PARA INCLUIR LOS CICLOS DE POTENCIA DEL MICROONDAS
%    rel=TIE/32;
%    IREL=fix(TIE/32);
%    TIEAP=7.5;
%    TIEENC=22.5;
%    difer=rel-IREL;
%    t1=0.75;
%    t2=0.25;
%    if difer>=t1

```

```

%       POTS=0;
%       else
%       POTS=POTS_C;
%       end

POTS=POTS_C;

TASAV=POTS*(1-exp(-2*ALFAEC(T(1),UBH(end))*SEMIE))/DELTHV;

EMEVAP=EMEVAP+TASAV*DT;
EMET=EMEDIS2-EMEVAP;

EMERREAL=2*EMET;
UBH(nt2+1)=EMERREAL/(EMERREAL+EMESS*2);%humedad al tiempo t
UBH1(nt2+1)=EMERREAL/(EMEINI*2);
UBS1(nt2+1)=EMERREAL/(EMESS*2);
nt2=nt2+1;
TMAT(nt2,:)=TC;
TMAT1(nt2)=TC;
end

%RESULTADOS SIMULACIÓN
tiempo_etapa_2=(nt2-nt1)*0.1
tpo_secado=nt2*0.1
UBH(end)
UBH1(end)

Texp_c=xlsread('Fig1_Cui_Tcen.xls');
Texp_s=xlsread('Fig1_Cui_Tsup_1.xls');
TMATc_exp=Texp_c(:,2);
TMATs_exp=Texp_s(:,2);
tTc=Texp_c(:,1);
tTs=Texp_s(:,1);

% figure(1)
% plot([0:0.1:(nt2-1)/10],TMAT(:,[end 1]))%gafica la primera etapa
"Calentamiento"
% xlabel('t [s]','fontsize',14)
% ylabel('Temperature [°C]','fontsize',14)
% legend('Surface','Center')
% % axis([0 240 0 120])
% hold on
% plot([0:0.1:(nt2-1)/10],TMAT1(:),'--r')
% plot(tTc,TMATc_exp, '.',tTs,TMATs_exp, '.')
% legend('Model_s', 'Model_c', 'Model_m', 'Exp_c', 'Exp_s')
% axis([0 FINL 0 110])

figure(1)
plot([0:0.1:(nt2-1)/10],TMAT1(:),'--r')%gafica la primera etapa
"Calentamiento"
xlabel('t [s]','fontsize',14)
ylabel('Temperature [°C]','fontsize',14)

hold on

```

```

plot(tTc, TMATc_exp, '.', tTs, TMATs_exp, '.')
legend('Model_m', 'Exp_c', 'Exp_s')
axis([0 FINL 0 50])
hold off

Hexp=xlsread('Fig1_Cui_hum_1.xls');
UBS1_exp=Hexp(:,2);
th1=Hexp(:,1);

figure(2)%Con valores fijos experimentales HUMEDAD
plot([0:0.1:(nt2-1)/10],UBS1)
title('UBS')
xlabel('t [s]', 'fontsize',14)
ylabel('Moisture content (g water/g d.b)', 'fontsize',14)
% axis([0 300 0 1])

hold on

plot(th1,UBS1_exp, '.')
legend('Model', 'Experimental')
axis([0 FINL 0 9])

hold off

% figure(3)%Con valores fijos experimentales HUMEDAD
% plot([0:0.1:(nt2-1)/10],UBH1)
% xlabel('t [s]', 'fontsize',14)
% ylabel('Moisture content (g water/g water initial)', 'fontsize',14)
% axis([0 300 0 1])

%-----
%IMPRIME LOS RESULTADOS EN PLANILLAS EXCEL
%-----

res_temp=[([0:0.1:(nt2-1)/10]),(TMAT(:,[end 1])),([0:0.1:(nt2-1)/10]),(TMAT1)];
xlswrite('Cui_temp_1.xls',res_temp);%genera una planilla en EXCEL

res_hum_db=[([0:0.1:(nt2-1)/10]),UBS1'];
xlswrite('Cui_hum_db.xls',res_hum_db);%genera una planilla en EXCEL

```

Funciones asociadas al programa principal:

```

function alfa1=ALFAE(T0)
global TC
%Factor de atenuación (inversa de la penetracion)
%"CARROTS"

if T0<TC
    alfa1=63.4587-0.2775*T0+0.0054*T0^2;
else
    alfa1=90;
end

```

```
function alfa2=ALFAEC(T0,UBH)
%Factor de atenuación (inversa de la penetracion)
%"CARROTS"

% alfa2=33;
if UBH>=0.224
    alfa2=90;%ESTIMACIÓN PROPIA, ARBALLO(2012)
else
    alfa2=1.4671*100*UBH;%OLD VALUE!!
end
```

```
function CHPC=CHPC(P,T)
%Calcula la Concentracion de Vapor Saturado en el frente de
evaporacion
RG=8.314;
PM=18/1000;
TK=T+273.16;
CHPC=P*PM/(RG*TK);
```

```
function CONDCF=CONDCF(T)
%Subprograma conductividad termica "CARROTS"
CONDCF=0.552;%fuente: Srikiatdena & Roberts (2008)
```

```
function CPCF=CPCF(T)
%Calor Especifico "CARROTS"
% CP1=-0.027*T+1.196*0.846+0.02435*15+0.0313*0.846*T;
% CP2=-0.04833*0.846*15+0.00032*15*T;
% CPCF=1000*(CP1+CP2);
CPCF=3792;%fuente: Srikiatdena & Roberts (2008)
```

```
function DENSCF=DENSCF(T)
%Densidad "CARROTS"
DENSCF=1079;%KG/VOLUMEN,fuente: Srikiatdena & Roberts (2008)
```

```
function DIFT=DIFT(T)
%Coeficiente de Difusion del Agua en la Pera fresca
DIFT=2.6e-10;
```

```
function DVA=DVA(T0,TA)
%Coeficiente de Difusion de Agua en Aire (estado gaseoso)
TMEDIA=(T0+TA)/2;
TMK=TMEDIA+273.5;
GAMMA=1.78917-2.1314348E-3*TMK;
DVA=5.6845525E-9*(TMK^1.5)/GAMMA;
```

```
function BH=FACTOR(DBS)
%Convierte base seca en base humeda
BH = DBS/(1 + DBS);
```

```
function PSAT=PSAT(T)
%Presion de saturacion
A=72.73974;
B=-8.2;
C=0.0057113;
D=-7235.4261;
P=A+B*log(T+273.16)+C*(T+273.16)+D/(T+273.16);
PSAT=exp(P)*100;
```

```
function PEQ=PEQ(T)
%Presion (saturacion) de Equilibrio a temp positivas
A=72.73974;
B=-8.2;
C=0.0057113;
D=-7235.4261;
P=A+B*log(T+273.16)+C*(T+273.16)+D/(T+273.16);
PEQ=exp(P)*100;
```

## Publicaciones resultantes del proceso de elaboración de la presente Tesis Doctoral

Las siguientes publicaciones y presentaciones surgieron de la realización de la presente tesis doctoral:

### Trabajos Publicados en Revistas Científicas

- “Modeling of Microwave Drying of Fruits.” Arballo, J.R., Campañone, L.A., Mascheroni, R.H. *Drying Technology*, 28, 1178-1184, (2010).
- “Modelling of Mass Transfer and Texture Evaluation during Osmotic Dehydration of Melon under Vacuum.” Ferrari, C.C, Arballo, J.R., Mascheroni, R.H., Hubinger, M.D. *International Journal of Food Science and Technology*, 46, 436-443, (2011).
- “Mass transfer kinetics and regression-desirability optimization during osmotic dehydration of pumpkin, kiwi and pear.” Arballo, J.R., Bambicha, R.R., Campañone, L.A., Agnelli, M.E., Mascheroni, R.H. *International Journal of Food Science and Technology*, 47, 306-314, (2012).
- “Modeling of Microwave Drying of Fruits. Part II: Effect of osmotic pretreatment on the microwave dehydration process.” Arballo, J.R., Campañone, L.A., Mascheroni, R.H. *Drying Technology*, 30, 404-415, (2012).
- “Numerical solution of coupled mass and energy balances during osmotic-microwave dehydration.” Arballo, J.R., Campañone, L.A. and Mascheroni, R.H. *Computational and Applied Mathematics (CAM)*, 31(3), 539–558, (2012).
- “Osmotic dehydration of nectarines: influence of the operating conditions and determination of the effective diffusion coefficients.” Rodríguez, M. M., Arballo, J. R., Campañone, L. A., Cocconi, M. B., Pagano, A. M. and Mascheroni, R. H. *Food and Bioprocess Technology*, in press: accepted date 20-ago-2012.

### Trabajos completos presentados en Congresos, Conferencias y Jornadas

2009-4-15- Ferrari, C.C., Arballo, J.R., Mascheroni, R.H. (2009). Modelado de la transferencia de masa durante el proceso de deshidratación osmótica de peras con soluciones de sacarosa y sorbitol. *Ciencia y Tecnología de los Alimentos: Avances en Ingeniería y Tecnología*, (3) 97-

106. ISBN: 978-987-25617-0-3. Trabajos completos presentados al III Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos Córdoba, Argentina.

2009-8-23- Arballo, J.R., Campañone, L.A., Mascheroni, R.H. (2009). Modeling of Microwave drying of fruits. 8th World Congress of Chemical Engineering, WCCE8, Montréal, Quebec, Canada, 23-27 de Agosto 2009. Proceedings of 4th Inter-American Drying Conference, pag 48-54 (I-9).

2009-8-23- Ferrari, C.C., Arballo, J.R., Mascheroni, R.H. (2009). Mass transfer and texture variation during osmotic dehydration of pears. 8th World Congress of Chemical Engineering, WCCE8, Montreal, Quebec, Canada, 23-27 de Agosto 2009. Proceedings of 4th Inter-American Drying Conference, pag 610–616 (IV-17).

2009-10-7- Arballo, J.R., Campañone, L.A., Mascheroni, R.H. (2009). Aplicación de Microondas para la deshidratación de productos frutihortícolas. XII Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, CYTAL 2009, 7-9 de octubre 2009, Concordia, Entre Ríos. Publicado en versión digital (13-8) ISBN 978-987-22165-3-5.

2009-10-7- Bambicha, R.R., Arballo, J.R., Mascheroni, R.H., Agnelli, M.E. (2009). Coeficientes efectivos de Difusión durante la deshidratación osmótica de calabacita (*C. Moschata*) en soluciones de sacarosa. XII Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, CYTAL 2009, Concordia, Entre Ríos. Publicado en versión digital (13-1) ISBN 978-987-22165-3-5.

2009-12-14- Arballo, J.R., Campañone, L.A., Mascheroni, R.H. (2009). Modelado Matemático del Proceso de Deshidratación Osmótica combinado con la aplicación de Microondas como etapa final. II Congreso de Matemática Aplicada, Computacional e Industrial, MACI 2009, Rosario, Santa Fe. Publicado en versión digital: CD volumen 2 – MACI, 2 (2009), pag. 483-486.

2010-10-26- Arballo, J.R., Campañone, L.A., Mascheroni, R.H. (2010). Aplicación de Métodos Combinados para la Deshidratación de Peras mediante Deshidratación Osmótica y Microondas. VI Congreso Argentino de Ingeniería Química, CAIQ 2010, 26-29 de Octubre, Mar del Plata, Buenos Aires. Publicado en versión digital: paper nro. 1034.

2010-10-26- Arballo, J.R., Ferrari, C.C., Hubinger, M.D., Mascheroni, R.H. (2010). Modelado de la Transferencia de Masa y Optimización del Proceso de Deshidratación e Impregnación de Cubos de Melón con Pulsos de Vacío. VI Congreso Argentino de Ingeniería Química, CAIQ

2010, 26-29 de Octubre, Mar del Plata, Buenos Aires. Publicado en versión digital: paper nro. 1122.

2010-11-15- Arballo, J.R., Campañone, L.A., Mascheroni, R.H. (2010). Numerical simulation of fruits drying by combined methods: osmotic dehydration and microwaves. XXXI Iberian-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, CILANCE 2010, IX Argentinean Congress on Computational Mechanics and II South American Congress on Computational Mechanics, MECOM 2010, Buenos Aires, Argentina. Publicado en versión digital: paper nro. 595.

2011-5-18- Rodríguez, M.M., Arballo, J.R., Campañone, L.A., Cocconi, M., Mascheroni, R.H. & Pagano, A.M. (2011). Herramientas matemáticas aplicadas en el estudio de la deshidratación osmótica de pelones. VII EMCI Internacional & XVI EMCI Nacional (Congreso de Enseñanza Matemática en Carreras de Ingeniería), 18-20 Mayo, Olavarría, Buenos Aires, Argentina. Publicado en versión digital, ISBN 978-950-658-252-4.

2011-5-22- Arballo, J.R., Campañone, L.A. & Mascheroni, R.H. (2011). A simple model to predict the mass and heat transfer during the combined osmotic-microwave drying of fruits. 11th International Congress on Engineering and Food, ICEF11, May 22-26th, Athens, Greece. Digital version of Full-Paper Proceedings, paper-ID: MCF981.

2012-3-28- Rodríguez, M.M., Arballo, J.R., Campañone, L.A., Pagano, A.M. & Mascheroni, R.H. (2012). Determinación de los coeficientes efectivos de difusión mediante solución analítica y solución numérica en la deshidratación osmótica de pelones. III Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CLICAP 2012), 28-30 Marzo 2012, San Rafael, Mendoza, Argentina. Publicado en versión digital (09TCA), ISBN: 978-987-575-106-4.

2012-11-25- Rodriguez M.M., Arballo J.R., Campañane L.A., Pagano, A.M. & Mascheroni R.H. (2012). Multiple-optimization of the impregnation and dehydration of stone fruits. 7<sup>th</sup> International CIGR Technical Symposium “Innovating the food value chain”, incorporating: 2<sup>nd</sup> International Conference on Postharvest Technology & Quality Management, “Postharvest Africa 2012”, 25-28 de November 2012, Stellenbosch University, South Africa. Digital version of Fullpaper Proceedings, paper-ID: 4 (S12A) (Programme and Abstracts book, pages 110-111).

### **Resúmenes presentados en Congresos**

2009-3-18- Arballo, J.R., Garcia, L.C., Ferrari, C.C., Hubinger, M.D., Mascheroni, R.H. (2009). Deshidratación osmótica de melón con pulsos de vacío. II Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CLICAP09), 18-20 de Marzo 2009, San Rafael, Mendoza, Argentina. Publicado en Acta del congreso, CD, 37A, ISBN: 978-987-575-079-1.