

# SECADO COMBINADO DE FRUTAS: DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA Y MICROONDAS

Tesis doctoral presentada por  
Natalia Wais

ante la  
Facultad de Ingeniería de la  
Universidad Nacional de La Plata  
para acceder al grado académico de  
DOCTOR EN INGENIERIA



Dirección de tesis:

Director: Dr. Rodolfo H. Mascheroni

Co-director: Dra. Miriam E. Agnelli

La Plata, Febrero 2011



# SECADO COMBINADO DE FRUTAS: DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA Y MICROONDAS

## Resumen

La deshidratación osmótica (DO) es una técnica extensamente estudiada que permite modificar la composición de los alimentos a partir de la remoción de agua y de la incorporación de sólidos. Por esta razón, constituye una herramienta más que interesante desde el punto de vista de la formulación y desarrollo de nuevos productos.

En este sentido, dependiendo de la cantidad de agua que se desee extraer del alimento y de la clase de soluto que se desee incorporar, es muy amplio el espectro de productos que se pueden diseñar utilizando esta técnica. La DO permite incorporar -a la estructura del producto- sólidos con funciones nutricionales, organolépticas y de conservación, entre otros.

No obstante, la reducción de la actividad acuosa ( $a_w$ ) al final de la DO no es suficiente para impedir la proliferación microbiológica. Este es el aspecto que marca la necesidad de sumar una etapa posterior de secado para complementar a la DO (y alcanzar aquella  $a_w$  que impida el desarrollo de microorganismos) y que, en consecuencia, define a la DO como pretratamiento de un proceso (combinado) de preservación.

Los beneficios de incorporar a la DO como etapa de procesamiento, además de los mencionados en el campo de la formulación y desarrollo, residen en que la calidad de los productos es superior a los obtenidos cuando no se la incluye como operación previa a otros métodos de deshidratación convencionales, como el secado por aire caliente.

En este trabajo, se estudió el secado combinado de frutas (manzana), considerando a la deshidratación osmótica como pretratamiento del secado por microondas (MO).

Este secado aparece como una técnica con mucho potencial de aplicación, que ha sido estudiada como complemento de los métodos tradicionales, pero poco en forma individual o unitaria.

En síntesis:

- Se ha seleccionado a la DO debido a la versatilidad que ofrece para el diseño de nuevos productos (recordando la clase de sólidos que se pueden utilizar) y a los

antecedentes relevados que dan cuenta de la mejora de la calidad que se obtiene al utilizarla como pretratamiento en procesos combinados.

- Se ha elegido al secado por MO como etapa final de secado considerando que guarda, como técnica unitaria de secado, un potencial aún no explorado.

Un poco más en detalle, las variables seleccionadas del proceso de DO fueron la naturaleza del soluto deshidratante, la concentración del medio y el tiempo de contacto fruta-solución (todas ellas determinan la calidad y cantidad de solutos a impregnar en el alimento y, en consecuencia, la clase de alimento a obtener).

Adicionalmente, las variables estudiadas en el secado por microondas fueron la potencia, el tiempo y la asistencia con aire caliente.

En todos los casos, el punto final del proceso global fue determinado por la actividad de agua del producto (menor o igual a 0.5) y el efecto de los diferentes procesos globales sobre la calidad de los productos finales fue evaluado a través del color, de la textura y de observaciones macro y microscópicas.

Como resultado, se pudo comprobar que los productos obtenidos al final de la DO tuvieron un valor de  $a_w \geq 0.9$  y que cuanto mayor fue la duración de la DO, mayor la concentración del medio deshidratante y menor el tamaño molecular del soluto usado, mayor fue la cantidad de agua removida del alimento.

Con respecto a la calidad, en términos macroscópicos, se pudo ver que la DO promueve modificaciones en el color del alimento (aún tratamientos cortos -1 hora-) y que la magnitud del cambio depende de la pérdida de agua, de la ganancia de sólidos que haya experimentado el alimento, así como de la naturaleza del soluto incorporado. Del mismo modo, con respecto a la textura, se advierte que la DO provoca el ablandamiento y el aumento de la adhesividad del alimento (mayor cuanto mayor han sido la pérdida de agua y la cantidad de sólidos incorporados, respectivamente).

En el nivel microscópico, se ha comprobado que la DO conduce a la pérdida de turgencia de las células y al cambio del arreglo de los espacios intercelulares.

Por otro lado, del secado por microondas se concluye que (en líneas generales) la duración de esta etapa es menor cuanto mayor es la potencia utilizada y mayor ha sido la duración de la DO y que, siempre es conveniente incorporar una etapa de osmodeshidratación en post de obtener menor deterioro del color.

Además, como resultado de la combinación de las variables de la DO y de las variables del secado por MO, se obtuvieron dos clases de productos de características distintivas y novedosas en el campo del desarrollo de alimentos:

- Productos macizos, con cierto patrón alveolar uniforme. En términos coloquiales, su aspecto es similar al de una esponja. Estos productos se obtienen al utilizar potencias bajas de secado por MO luego de un proceso de DO.
- Productos huecos, de paredes delgadas. Resultan de la utilización de potencias de secado medias o altas (a mayor potencia, mayor deterioro de la calidad de estos productos).

Habiendo identificado el potencial innovador de estos productos en el campo del desarrollo, se propuso y estudió la oportunidad de optimizar la calidad de los productos y la duración de los procesos, mediante la asistencia a las MO con el secado por aire caliente (SAC). Este es justamente, el uso contrario habitualmente dado al secado por MO (MO se ha estudiado como técnica de asistencia al SAC).

De este estudio se concluyó que si el objetivo es obtener los productos macizos, es conveniente asistir a la combinación DO-MO con aire caliente, ya que esta asistencia consigue productos de mejor color que los obtenidos solo con DO-MO y etapas más cortas de secado (duración de la etapa MO-SAC < duración de la etapa MO).

Sin embargo, si el propósito es obtener los productos huecos, la adición del SAC no implica ningún beneficio.

En último lugar, se estudió cuán factible es la integración de estos productos en otros de formulación más compleja -como por ejemplo un cereal de desayuno- mediante la rehidratación en leche. Se vio que todos se comportan de manera similar y que es factible su incorporación en alimentos de este tipo.

Asimismo, es válido decir que el ánimo de esta tesis ha sido desarrollar procesos globales a partir de la combinación de la DO y de las MO por las ya explicadas promisorias características de cada una, identificar las principales variables de estos procesos combinados y evaluar su impacto sobre la calidad del producto final.

No obstante, el enfoque integral se basó en el estudio profundo de cada una de las etapas unitarias, en la identificación de las variables clave propias y de su impacto sobre el proceso

acoplado y el global. Es decir, se reconocieron las variables de importancia de cada proceso unitario (las propias de la DO y las propias del secado por MO), pero no por esto se asumió que un proceso global óptimo es el que surge de la combinación de las etapas unitarias óptimas, sino que es aquel que permite obtener un producto diferente y comercialmente aceptable.

En este sentido, se analizaron todos los arreglos operativos posibles y en efecto, se dedujo que frente a la premisa de obtener alimentos de estas características, es, en ciertos casos, necesario sacrificar las oportunidades de optimización que cada etapa admite individualmente.

Por último, los procesos globales analizados ofrecen aún múltiples posibilidades de rediseño, adaptándolos al tipo de alimento que se desee obtener y el campo de aplicación resultante es muy amplio. Tanto más amplio cuando se piensa en la gran cantidad de frutas que podrían adaptarse a estos procesos combinados, en la impronta característica del secado por MO y en variedad de solutos que se pueden incorporar al alimento a través de la DO a fin de obtener alimentos funcionales, de sabores diferentes a los conocidos o de características distintivas para ser incorporados dentro de productos más complejos.

En esta tesis se han analizado múltiples procesos combinados sobre la base de un alimento de manzana y la incorporación de solutos endulzantes como modificadores del sabor característico de la manzana fresca. Queda aquí entonces, claramente identificado el alcance conseguido en este trabajo y asimismo, quedan planteadas las oportunidades que ofrece este campo de desarrollo de alimentos.

# ÍNDICE GENERAL

<b>1 Presentación del tema y objetivos</b> .....	1
1.1 Objetivo general.....	5
1.2 Objetivos específicos.....	5
<b>2 Deshidratación osmótica</b> .....	7
2.1 Introducción.....	7
2.2 Materiales y métodos.....	17
2.2.1 Material crudo y preparación de las muestras.....	17
2.2.2 Agentes osmóticos.....	18
2.2.3 Diseño experimental de DO.....	21
2.2.4 Análisis de color.....	27
2.2.5 Evaluación de propiedades mecánicas.....	28
2.2.6 Observaciones microscópicas.....	29
2.2.7 Observaciones macroscópicas.....	29
2.3 Resultados y discusión.....	30
2.3.1 Transferencia de materia.....	30
2.3.2 Cinética de cambio de color.....	37
2.3.3 Variación de propiedades mecánicas.....	41
2.3.4 Composición calórica de los productos DO.....	46
2.3.5 Análisis microscópico de los productos DO.....	47
2.4 Conclusiones.....	55
<b>3 Diseño operativo del secado combinado</b> .....	57
3.1 Introducción.....	57
3.2 Materiales y métodos.....	60
3.2.1 Material osmodeshidratado y preparación de las muestras.....	60
3.2.2 Obtención de las curvas operativas de secado mediante microondas.....	60
3.3 Resultados y discusión.....	63
3.4 Conclusiones.....	67
<b>4 Proceso combinado: deshidratación osmótica y secado por microondas</b> .....	69
4.1 Introducción.....	69
4.2 Materiales y métodos.....	76
4.3 Resultados y discusión.....	78

4.3.1 Transferencia de materia.....	78
4.3.2 Cinética de variación de color durante el proceso combinado.....	102
4.3.3 Variación de las propiedades mecánicas del proceso combinado.....	112
4.3.4 Composición calórica de los productos al final del proceso combinado....	119
4.3.5 Observaciones macroscópicas de los productos finales.....	121
4.4 Conclusiones.....	128
<b>5 Proceso combinado: deshidratación osmótica y secado por microondas</b>	
<b>asistido por aire caliente.....</b>	<b>130</b>
5.1 Introducción.....	130
5.2 Materiales y métodos.....	131
5.2.1 Análisis complementarios.....	132
5.3 Resultados y discusión.....	133
5.3.1 Transferencia de materia.....	133
5.3.2 Cinética de variación de color durante los procesos combinados.....	138
5.3.3 Variación de textura de los procesos combinados.....	140
5.3.4 Análisis de caracterización de los productos “target”.....	144
5.4 Conclusiones.....	155
<b>6 Conclusiones generales.....</b>	<b>156</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>162</b>
<b>Apéndice A: Especificaciones técnicas de los solutos deshidratantes.....</b>	<b>172</b>
<b>Apéndice B: Análisis de varianza de la rehidratación.....</b>	<b>174</b>
<b>Apéndice C: Errores típicos.....</b>	<b>186</b>

# **SECADO COMBINADO DE FRUTAS: DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA Y MICROONDAS**

## **CAPÍTULO 1**

### **PRESENTACIÓN DEL TEMA Y OBJETIVOS**

El porcentaje de agua presente en los alimentos es muy variado y en los frescos, particularmente frutas y verduras, supera el 80%, por lo que exhiben alta actividad metabólica, susceptibilidad a los ataques de microorganismos y al desencadenamiento de procesos de naturaleza química que actúan en detrimento de su calidad. Estas características y la corta vida útil inherente, representan el mayor obstáculo para la comercialización de los productos frutihortícolas frescos. Por ende, la estabilidad y las características físico-químicas, la seguridad microbiológica y los aspectos organolépticos de las frutas y las verduras están determinados por su constituyente principal: el agua.

La disponibilidad de agua para los eventos mencionados en una matriz sólida o en una solución se expresa a través de su actividad acuosa ( $a_w$ ): medida del potencial termodinámico del agua en el sistema bajo análisis. El valor de actividad acuosa ilustra el grado de interacción de la molécula de agua con las moléculas de los demás constituyentes del alimento, resultando la magnitud de esta vinculación propia de cada sistema y de cada situación de proceso. De este modo, una disminución del  $a_w$  de un alimento se conseguirá forzando la eliminación del agua de su estructura o bien, adicionando sustancias que interaccionen con el agua, reduciendo su disponibilidad.

La deshidratación o secado es una de las técnicas más ampliamente utilizadas para conservar alimentos, que consiste en la reducción del contenido acuoso, intentando disminuir o detener la proliferación microbiológica, así como la ocurrencia de reacciones de deterioro. Así, la deshidratación permite prolongar la vida útil de alimentos, al mismo tiempo que ofrece la posibilidad de desarrollar nuevos productos de acuerdo con la tecnología utilizada y/o componentes agregados.

Los alimentos deshidratados reúnen ciertas ventajas técnicas y económicas sobre los frescos además de una mayor vida útil (y consecuente disponibilidad durante todo el año), por ejemplo, tienen menor peso (ventaja que permitiría reducir los costos de envasado y logística), son fácilmente incorporables a procesos productivos automatizados y definitivamente, ofrecen mayor diversidad y flexibilidad en el desarrollo de nuevos productos.

Sin embargo, la deshidratación de alimentos no es utilizada tan extensamente como se pretendería, ya que la eliminación de agua de la estructura tiene asociados ciertos cambios que comprometen la calidad. Esto se debe a que los procesos más comunes de secado están diseñados a partir de las altas temperaturas y/o largos tiempos de secado.

Por dicha razón, en la búsqueda de mínimas pérdidas de la calidad y aún, de mejoras a la misma, se han desarrollado nuevas técnicas de deshidratación o secado.

Mediante las nuevas técnicas se pueden alcanzar un amplio rango de contenido de agua y de sólidos en el producto final, con el objetivo de preparar ingredientes de fruta con propiedades funcionales apropiados para sistemas alimenticios específicos (Riva et al., 2005).

Considerando la evolución en las diferentes tecnologías, se pueden clasificar los métodos de deshidratación en cuatro grupos o generaciones, tal como lo describieron Vega-Mercado et al. (2001):

- *Primera generación:* incluye métodos antiguos como el secado al sol y el ahumado (específicamente para carnes), y el secado en lecho fluidizado para alimentos particulados. A esta misma categoría se suma el secado por convección forzada; que en la mayoría de los casos utiliza (como medio deshidratante) aire caliente que fluye a través del producto dispuesto en bandejas o cintas de transporte, removiendo el agua desde la superficie del alimento. Esta técnica es apropiada para materiales sólidos como granos, frutas y vegetales de relativamente bajo valor (comercial). Generalmente se utiliza en procesos continuos.
- *Segunda generación:* reúne los métodos de secado para purés o pastas y mezclas líquidas con el fin de obtener productos en polvo o en escamas. Estas técnicas son secado por spray y secado en tambores rotativos.
- *Tercera generación:* comprende dos métodos desarrollados para minimizar los daños estructurales y las pérdidas de componentes de sabor y aroma (*flavor*). Uno es la

liofilización (congelación seguida de sublimación, *freeze-drying*) y el otro la deshidratación osmótica. Este último consiste en la inmersión del alimento en una solución hipertónica (azúcares, sal, alcoholes), donde además de la remoción de agua impulsada por la presión osmótica ejercida por el medio, el alimento se enriquece en los solutos propios de la solución deshidratante. Los niveles térmicos de operación promedian la temperatura ambiente, minimizándose los daños térmicos, y la ausencia de aire en el sistema evita reacciones de oxidación y deterioro. Sin embargo, este método no permite reducir la actividad acuosa lo suficiente como para obtener un producto estable microbiológica y químicamente.

- *Cuarta generación:* incluye técnicas de deshidratación que se fundamentan exclusivamente en las características fisicoquímicas del alimento a procesar. Se reconocen entre ellas la tecnología de microondas y la de radio-frecuencias (RF). Contrariamente a lo que ocurre en los métodos de secado convencionales, en los que la transferencia de energía (desde el ambiente) por conducción, convección o radiación depende de la capacidad del material para transferir calor, en los procesos que utilizan energía electromagnética, el calentamiento ocurre desde el interior del alimento y por ello es más efectivo, ya que no depende de un gradiente de temperatura.

La tecnología de las microondas estriba en la respuesta de las moléculas polares del material frente a un campo magnético variable, que rotan y se desplazan lateralmente millones de veces por segundo tratando de alinearse con las líneas de fuerza del campo. Esta interacción genera calor en el material y se inicia el proceso de deshidratación a velocidades muy superiores a las obtenidas en los métodos tradicionales de secado. La disminución de los tiempos de procesamiento es una de las principales ventajas del secado por microondas y en la actualidad, se están implementando diversas aplicaciones a nivel industrial para secado de pasta, de alimentos fluidos viscosos, horneado, concentración, precocción y cocción, pasteurización e inactivación enzimática (escaldado o blanqueado).

Por otro lado, el método de secado más utilizado en frutas y verduras es el secado por aire caliente (por convección forzada). Esta técnica se basa en el desarrollo de un gradiente interno de humedad, por lo que para reducir los largos tiempos de proceso (más aún cuando se buscan valores bajos de actividad de agua) se hacen necesarias temperaturas altas (60-80 °C). Estas condiciones operativas generan en los alimentos deterioro en el plano organoléptico (color, aroma, sabor y textura) y pérdida de nutrientes, además de una baja

capacidad de rehidratación. Adicionalmente, un aspecto importante en los procesos es el energético: el secado convencional es poco eficiente.

Si bien existen otras técnicas que pueden preservar la calidad de los alimentos, como liofilización y secado por vacío, éstas son costosas en relación al valor comercial de los productos resultantes. Entonces, el uso de las microondas aparece como una posibilidad concreta y auspiciosa en el campo de la deshidratación: los tiempos de proceso son cortos, las pérdidas de calidad son mínimas y la eficiencia energética es alta.

Desde el advenimiento de las microondas como método de secado, son muy pocos los trabajos (en cuanto a frutas y verduras) que las proponen como etapa final de un secado combinado o como reemplazo del secado tradicional por convección forzada. Principalmente, las microondas se usaron como asistencia al secado convencional, y no como tecnología central.

Por otra parte, también se pueden combinar dos o más métodos de secado con objetivos operacionales, tales como reducción de tiempos de tratamiento y superficie instalada, u objetivos inherentes al alimento, como minimización de pérdidas de calidad, modificación o diseño de productos con características y propiedades funcionales específicas, distintas a las originales. En este sentido, incorporar la deshidratación osmótica como pretratamiento en pos de obtener productos modificados funcionalmente, implica multiplicar las posibilidades de desarrollo. Más aún, la deshidratación osmótica induce cambios en las propiedades termofísicas (debido a la incorporación de solutos) que pueden ser beneficiosos en un proceso ulterior, como en el caso de las microondas, donde la presencia de azúcares permite aumentar la eficiencia de absorción de energía (es decir, menor consumo energético).

Finalmente, aunque la deshidratación es una técnica antigua y muy estudiada, los continuos avances tecnológicos en diferentes áreas permiten mejorar la calidad productos existentes, fieles a su concepción y aún más, desarrollar nuevos, siempre en el intento por satisfacer la creciente demanda de productos novedosos y funcionales. Es por esto que resulta necesario el diseño de nuevos procesos de deshidratación, teniendo en cuenta los nuevos horizontes y desafíos en materia de alimentos.

## **1.1 OBJETIVO GENERAL**

El objetivo general de esta tesis consistió en diseñar un proceso de deshidratación por métodos combinados usando deshidratación osmótica (DO) y secado por microondas (MO) que permita desarrollar un alimento sobre base de frutas, organolépticamente aceptable y seguro microbiológicamente.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Los objetivos específicos de este trabajo se listan a continuación:

- 1- Estudiar experimentalmente el proceso de deshidratación osmótica, mediante el análisis macroscópico de transferencia de materia, evaluando el comportamiento del producto en el tiempo y ante la utilización de medios deshidratantes de diferente composición y concentración.
- 2- Analizar los atributos de calidad (color y propiedades mecánicas) y estructura microscópica, así como los aspectos fisicoquímicos de los productos osmodeshidratados en función de las variables operativas mencionadas.
- 3- Definir qué atributos fisicoquímicos deben tener los productos finales de este trabajo, de modo que cumplan con dos requisitos básicos: estabilidad frente al ataque de microorganismos y calidad aceptable. Definir cuál de estos atributos es crítico, es decir cuál de ellos determinará el final del proceso global.
- 4- Estudiar la evolución –macroscópica- de una etapa de secado posterior a la deshidratación osmótica que permita reducir el contenido de agua hasta niveles microbiológicos confiables.
- 5- Analizar los efectos del secado por microondas sobre los productos osmodeshidratados, en términos organolépticos, mediante análisis de color y propiedades mecánicas; y en aspectos microbiológicos, a través de parámetros fisicoquímicos: actividad acuosa y humedad.

- 6- Estudiar el proceso combinado (deshidratación osmótica-microondas) y analizar qué posibilidades ofrece en términos de desarrollo y formulación de productos.
  
- 7- Evaluar dichos procesos combinados DO-MO óptimos y analizar cuáles son las oportunidades de mejora que podrían sumarse a ellos en post de obtener productos de aún mejor calidad y/o procesos de menor duración. Conjuntamente, analizar la calidad y performance de estos productos finales.

## CAPÍTULO 2

# DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA

### 2.1 INTRODUCCIÓN

La deshidratación osmótica (DO) es una técnica que permite remover el agua de un alimento (frutas o vegetales) por inmersión en una solución de baja actividad acuosa. Esta solución, llamada solución osmótica (SO), generalmente está compuesta por azúcares y/o sales.

Una vez el alimento y la SO se ponen en contacto, se establecen dos flujos de materia simultáneos y en contracorriente:

- Flujo de agua desde el producto hacia la solución osmótica, generalmente acompañado de sustancias propias de la fruta, como azúcares, vitaminas o pigmentos.
- Flujo de los solutos de la SO, en sentido opuesto al flujo de agua, que se incorporan al tejido del alimento.

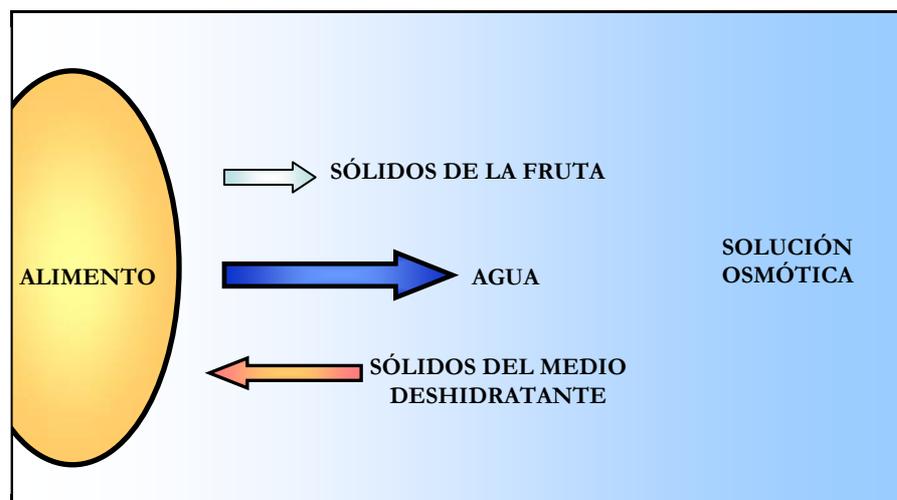


Figura 2.1: Representación de la transferencia de materia durante la DO.

La fuerza impulsora para que se produzca la migración de agua desde el alimento es provista por la diferencia de potencial químico ( $\mu$ ) del agua en el alimento y en el medio deshidratante. El potencial químico del agua se relaciona con la actividad acuosa ( $a_w$ ) por medio de la presión osmótica ( $\pi$ ) según:

$$\mu = \mu^0 + RT \ln a_w$$

$$\pi = \frac{RT}{\bar{V}} \ln \frac{1}{a_w}$$

Donde  $\mu^0$  es el potencial químico de referencia del agua (a la temperatura de análisis) y  $\bar{V}$  es el volumen molar parcial del agua.

Es decir que, si el medio tiene una  $a_w$  más baja que la del alimento (y en consecuencia ejerce una presión osmótica mayor), el potencial químico del agua en el producto será mayor que en la solución y de este modo el agua fluirá espontáneamente desde el alimento hacia la solución deshidratante. La salida de agua a través de la membrana celular del alimento tendrá lugar hasta que los potenciales químicos del agua a ambos lados de la membrana alcancen el equilibrio.

Por su lado, los sólidos de la SO que ingresan al tejido vegetal, pueden ubicarse en los espacios extracelulares o bien, pueden atravesar la pared celular y acumularse entre la pared y la membrana celular, donde forman una solución hipertónica que también promueve la salida del agua celular a través de la membrana (Spiazzi & Mascheroni, 1997).

Originalmente, se consideró que el transporte de agua en la DO ocurría solamente por ósmosis (de allí el nombre de la técnica) debido a que el agua fluye a través de las membranas vegetales semipermeables o selectivas (Dixon & Jen, 1977; Giangiacomo et al., 1987). Sin embargo, estudios posteriores demostraron que ciertos productos *sin* membranas selectivas (como geles o alimentos congelados) responden a la DO de igual forma que un tejido vegetal fresco. Así, se confirmó que el transporte de materia durante la DO ocurre *principalmente* por difusión (Saurel et al., 1994), y aún más, diversos autores han propuesto que la difusión no es el único mecanismo involucrado en el transporte de materia durante la DO, sino que coexiste con mecanismos hidrodinámicos que se establecen en los poros respondiendo a la presión capilar (Chafer et al., 2001; Mizrahi et al., 2001; Chiralt & Fito, 2003; Derossi et al., 2008). En cuanto al transporte de sólidos, se asume que ocurre exclusivamente por difusión.

A partir de lo expuesto, no es posible describir a la deshidratación osmótica como un proceso de *difusión molecular puro*, principalmente debido a la complejidad del tejido vegetal, al flujo volumétrico y a los cambios en la estructura celular (entre ellos el encogimiento) que tienen lugar durante la DO (Yao & Le Maguer, 1997).

Otra característica distintiva de la DO es el desarrollo de una “costra” de solutos de 2 ó 3 mm de espesor, que juega un rol importante en el control de la transferencia de materia a nivel superficial: promueve la salida de agua y se opone tanto a la incorporación de nuevos sólidos desde la SO como a la salida de sólidos solubles del producto hacia el medio (Saurel et al, 1994). Asimismo, puede influir en el comportamiento del alimento durante su almacenamiento o durante un secado posterior (Karathanos et al., 1995). Como consecuencia de los mecanismos de transporte descritos, en el transcurso de la DO se forma un frente de deshidratación que se mueve desde la superficie del alimento (en contacto con el medio deshidratante) hacia el interior (Rastogi et al., 2000).

La cantidad de agua removida puede superar el 50% del peso inicial de la fruta, dependiendo de diversos factores operativos. Sin embargo, más allá del grado de deshidratación, la DO no permite obtener un producto seguro microbiológicamente, ya que la actividad acuosa alcanzada no es lo suficientemente baja como para inhibir la proliferación de microorganismos. Esto define a la deshidratación osmótica como un método de deshidratación parcial y plantea la necesidad de sumar un proceso adicional - por ejemplo secado por aire caliente - para conseguir un producto estable a largo plazo. En consecuencia, la DO debe practicarse como “pretratamiento” de otros métodos de preservación (Rastogi et al., 2002).

Ya sea como proceso unitario o como etapa de pretratamiento, la técnica ha sido ampliamente estudiada y se reportaron numerosas ventajas de su implementación en ambos escenarios. En 1973, Ponting demostró que el uso de soluciones deshidratantes azucaradas tiene dos efectos que promueven una mejora en la calidad del producto tratado: se inhibe efectivamente la polifenoloxidasas (agente de pardeamiento oxidativo enzimático) y se previene la pérdida de componentes volátiles durante la deshidratación. Simultáneamente, durante la DO, se incrementa la relación azúcar/ácidos de la fruta y se modifican en menor medida las propiedades mecánicas y la estabilidad de los pigmentos durante el almacenamiento, con respecto a la fruta fresca (Raoult-Wack, 1994).

De los procesos integrados en los que la DO es la etapa inicial, la combinación de la deshidratación osmótica y el secado por aire caliente (DO-SAC) ha sido la más investigada, particularmente debido a que el SAC es el método de secado más difundido a nivel mundial

en la deshidratación de vegetales. En este contexto, la DO se acopló al SAC para reducir los efectos de encogimiento y decoloración propios de los productos secados.

Diversos autores reportaron que los alimentos tratados con DO previo al SAC, respecto de los que sólo fueron secados, presentan menor pérdida de color, menor encogimiento, menor colapso estructural (menor cuanto mayor es la incorporación de sólidos), mantienen mejor su firmeza, exhiben mejores características de rehidratación y conservan en mayor medida sus nutrientes; además, bajo ciertas condiciones, la aplicación de una etapa previa de DO exige menores tiempos de SAC para obtener un producto de humedad deseada (Lerici et al., 1985; Kim & Toledo, 1987; Torreggiani, 1993; Monsalve-Gonzalez et al., 1993; Bolin & Huxsoll, 1993; Alvarez et al., 1995; Lenart, 1996; Sankat et al., 1996; Simal et al., 1997; Nieto et al., 1998; Ramaswamy & Nsonzy, 1998; Reppa et al., 1999; Sereno et al., 2001; Lewicki et al., 2001; Mandala et al., 2005; Riva et al., 2005; Giraldo et al., 2006).

Por otro lado, la DO como etapa previa a la congelación (dehidrocongelación), previene el pardeamiento enzimático y reduce el colapso estructural y el exudado durante el descongelado. En conjunto, ciertos sólidos agregados a la solución deshidratante pueden actuar como agentes crioprotectores (especialmente los sólidos de alto peso molecular), disminuyendo el stress intermembranas e inhibiendo la desnaturalización proteica de las membranas celulares (Tregunno & Goff, 1996; Marani et al., 2006).

La combinación de la DO y del secado por microondas (DO-MO) es un campo de estudio más reciente que los mencionados. En este aspecto, se comprobó que la implementación de la DO como pretratamiento, acorta los tiempos de secado, los productos se secan de manera más homogénea (considerando que se trata de un calentamiento volumétrico) y presentan mejores características de color, textura (propiedades mecánicas) y rehidratación que los que no han sido pretratados (Nijhuis et al., 1996; Maskan, 2000b; Prothon et al., 2001; Torringa et al., 2001).

En líneas generales (independientemente de la técnica de deshidratación posterior), los alimentos deshidratados y con una etapa preliminar de DO, exhiben mejores características nutricionales, sensoriales y funcionales que los obtenidos sin DO (Torreggiani, 1993). Además, en términos energéticos, la DO se reconoce como un proceso de deshidratación eficiente, ya que la remoción de agua ocurre sin cambio de fase (Bolin et al., 1983).

Si bien la DO ha sido estudiada extensamente a pequeña escala, su industrialización se vio otrora frenada por la producción y manejo de grandes volúmenes de solución deshidratante. Para superar este aspecto negativo, se diseñaron diferentes estrategias para reutilizar la SO, reconcentrándola por agregado de los azúcares o sales originales (Raoult-

Wack, 1994), por evaporación o por aplicación de tecnología de membranas: filtración y ósmosis (Romero Barranco et al., 2001; Gekas et al., 1998; Warczok et al., 2007). Además, recordando que durante la DO se transfieren compuestos volátiles, pigmentos y sustancias precursoras del sabor desde la fruta hacia la solución, es posible emplear la SO como aditivo natural en la industria de alimentos, cosmética o farmacéutica (Osorio et al., 2007). Las principales variables del proceso de DO son: tiempo de contacto fruta-solución, temperatura, concentración y composición (peso molecular) del medio deshidratante, velocidad de agitación, relación másica alimento/solución y forma y tamaño del alimento. Bajo ciertas condiciones se observó que:

- La velocidad de difusión del agua se incrementa cuanto mayor es el tiempo de contacto fruta-solución y más elevada es la temperatura (Ponting et al., 1966; Borginwar & Srinivasan, 1977; Lenart & Flink, 1984; Salvatori et al., 1998). Prácticamente la misma influencia tienen estas variables sobre la velocidad de ingreso de sólidos.
- Cuanto mayor es la concentración de la SO (60-70 °Brix) y mayor es el peso molecular de los agentes deshidratantes utilizados, se consigue mayor remoción de agua, mientras que la incorporación de sólidos se ve favorecida por solutos de bajo peso molecular disueltos en soluciones de baja concentración. Alternativamente, este último proceso se denomina “impregnación” (Hawkes & Flink, 1978; Islam & Flink, 1982; Derossi et al., 2008; Rastogi & Raghavarao, 1995).
- Se promueve más la deshidratación cuando se agita la solución, restableciendo la fuerza impulsora alrededor de la muestra que pudo disminuir por la dilución con el agua saliente (Mavroudis et al., 1996).
- Para asegurar una fuerza impulsora constante durante todo el proceso, se requiere una relación, peso/peso, fruta/SO  $\approx$  4-6 (Borginwar & Srinivasan, 1977; Lenart & Flink, 1984).
- La pérdida de peso y la ganancia de sólidos aumentan cuando aumenta la relación área de contacto/longitud característica (Lerici et al., 1985).

Existen otros factores que afectan la dinámica del proceso y que están estrechamente relacionados con la fruta como la compacticidad del tejido vegetal, su contenido inicial de agua, su actividad enzimática, la presencia de aire en sus espacios intercelulares y la composición de los jugos interiores de la célula, así como la permeabilidad de las membranas.

Por lo tanto, en función de las características deseadas del producto final, de su aplicación, y dependiendo de la etapa posterior de secado, es posible diseñar un proceso específico de DO mediante la combinación de las variables operativas mencionadas.

Si bien uno de los objetivos principales de la deshidratación osmótica es prolongar la vida útil del alimento por remoción de agua, el diseño de un sistema de DO que permita alcanzar esta meta no es suficiente para concebir un “proceso óptimo”. De hecho, la calidad del producto es un aspecto igualmente importante a cuidar durante el planteo y desarrollo del proceso ya que, habitualmente, los procesos más eficientes en términos energéticos y/o de transferencia de materia, evolucionan a expensas de la calidad del alimento. Consecuentemente, el desarrollo de un producto en particular dependerá de una solución de compromiso entre la transferencia de materia y la calidad deseados.

Los cambios fisicoquímicos del alimento que tienen lugar durante la DO no solo modifican su composición nutricional, sino también sus características sensoriales. Dichos cambios se manifiestan a través de variaciones en el color y en las propiedades mecánicas del alimento procesado.

El color es uno de los atributos más importantes evaluado por los consumidores y el más estrechamente vinculado con la aceptabilidad del producto y la intención de compra. En términos generales, es deseable que el color de la fruta remita al de su estado fresco como sinónimo de mínimo procesamiento y, en consecuencia, mayor conservación de sus propiedades nutricionales y sensoriales.

Ciertos factores como el pH, la acidez, la variedad y el estado fisiológico del alimento, la temperatura y la duración del tratamiento, pueden influir sobre el color (Abers & Wrolstad, 1979; Skedre, 1985; García-Viguera et al., 1999).

Las reacciones más comunes que afectan al color de frutas y sus derivados durante la DO son: la degradación de pigmentos (especialmente carotenoides y clorofila), la oxidación de ácido ascórbico y las reacciones de pardeamiento enzimático (Barreiro et al., 1997; Lozano & Ibarz, 1997; Lee & Coates, 1999).

El pardeamiento enzimático o *browning enzimático*, aunque deseable en procesos como fermentación de té o cacao, es una reacción indeseable en el procesamiento de frutas, ya que en su avance tiene lugar la síntesis de compuestos coloreados, que confieren a la fruta un aspecto diferente del de su estado fresco. En esta reacción los compuestos fenólicos son oxidados por acción (principalmente) de la enzima polifenoloxidasas a *o*-quinonas, que luego polimerizan para formar pigmentos marrones u oscuros: melaninas. Diferentes trabajos en manzana, pera y ananá, demostraron que las peroxidasas también pueden contribuir al pardeamiento enzimático (Valentines et al., 2005). Esta reacción se desarrolla por la liberación de las enzimas al medio celular antes de ser inactivadas, por ejemplo en operaciones de pelado, cepillado, cortado o cualquier otra que cause disrupción celular.

Los recursos de los que se vale la industria de alimentos para minimizar los efectos de este *browning* son la exclusión de oxígeno, la aplicación de ácidos, la inactivación por calor (escaldado) y el agregado de agentes inhibidores como sulfitos.

Por otro lado, la disrupción celular no sólo permite la salida de enzimas al medio, sino que otras sustancias (como ácidos) también son liberadas ante la ruptura de la vacuola central, cambiando el pH del medio, alterando las velocidades de diversas reacciones pH-dependientes y con ello, promoviendo la formación o degradación de sustancias que aportan al color del tejido (Haard & Chism, 1996).

El cambio de color puede ser medido y usado indirectamente para estimar el grado de avance de reacciones como las descritas; este procedimiento es más sencillo y rápido que un análisis químico (Maskan, 2000a). La medición instrumental del color se realiza mediante equipos específicos como los colorímetros tri-estímulo, que realizan la evaluación del color basados en todo el espectro visible, permitiendo obtener el perfil cromático real del producto. El sistema CIE *L a b* (o CIELAB) es un estándar internacional adoptado para medir color, que fue desarrollado por la *Commission Internationale de l'Eclairage* en 1976 (Yam & Papadakis, 2004). Este modelo permite explicar cómo el ojo humano percibe el color mediante el uso de tres parámetros que se ubican en tres ejes cartesianos (Figura 2.2). Los parámetros son:

- *L*, que describe la luminosidad (o el oscurecimiento) y cuyo valor oscila entre 0 y 100 (entre negro y blanco, respectivamente).

- $a$ , que representa la componente rojo-verde del color (o el enrojecimiento), toma valores positivos para variaciones hacia el rojo y negativos para corrimientos hacia el verde.
- $b$ , que describe la componente amarilla-azul (o el amarillamiento), adquiere valores positivos para variaciones hacia el amarillo y negativos para cambios hacia el azul.

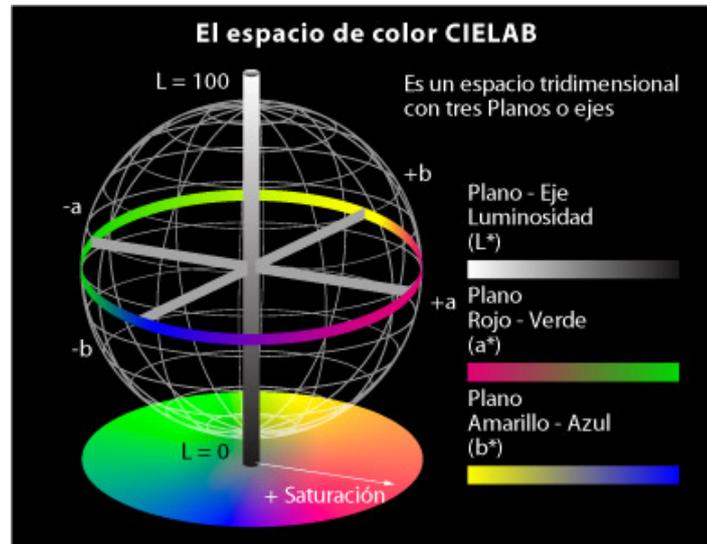


Figura 2.2: Representación del sistema tridimensional CIELab.

Estos índices han demostrado ampliamente ser versátiles para describir los cambios de color y proveer información útil para el control de calidad en frutas y productos derivados tales como jarabe de uvas (Skedre, 1985), pasas de uva sultanas (Aguilera et al., 1987), pulpa concentrada de fruta (Lozano & Ibarz, 1997), rodajas de manzana (Feng & Tang, 1998), puré de pera (Ibarz et al., 1999) y banana (Maskan, 2000a).

Generalmente  $L$  y  $a$  están correlacionados con los cambios de color en las frutas (oscurecimiento) provocados por el pardeamiento enzimático (Mastrocola & Lerici, 1991).

Por otro lado, durante la DO y como consecuencia de la remoción de agua, se perturban las propiedades físicas, estructurales y mecánicas del alimento, que se manifiestan a través del encogimiento, la modificación de la porosidad y la resistencia a la deformación (Lozano et al., 1983; Lazarides & Mavroudis, 1996; Mayor & Sereno, 2004). Estos cambios macroscópicos obedecen a alteraciones microscópicas extensamente estudiadas, que permiten explicar el comportamiento de las frutas frente a un proceso de deshidratación.

Un enfoque interesante sobre las modificaciones estructurales de las frutas durante la deshidratación es el realizado por Mayor et al. (2007). Tal como describen estos autores, en un vegetal fresco las células son turgentes y el tejido tiene cierta resistencia a la

deformación. La turgencia celular se debe a la presión hidrostática interna -normalmente entre 1 y 8 atmósferas- que ejercen la vacuola y el citoplasma sobre la membrana plasmática y la pared celular; la resistencia corresponde a la rigidez que la celulosa confiere a la pared celular y la resistencia a la deformación está asociada al contenido de pectinas y hemicelulosa en la laminilla media (que conecta entre sí a las células), ambas son responsables de la plasticidad y determinan hasta qué punto las células pueden deformarse (Figura 2.3a).

Analizando una vez más el comportamiento de los tejidos vegetales frente a la DO: asociados a la salida de agua, tienen lugar el encogimiento de la vacuola y del citoplasma y la consecuente separación de la laminilla media de la pared celular. Este fenómeno se denomina plasmólisis (Figura 2.3b) y es la causa de daño celular más comúnmente reconocida durante los procesos de deshidratación (Rastogi et al., 2000).

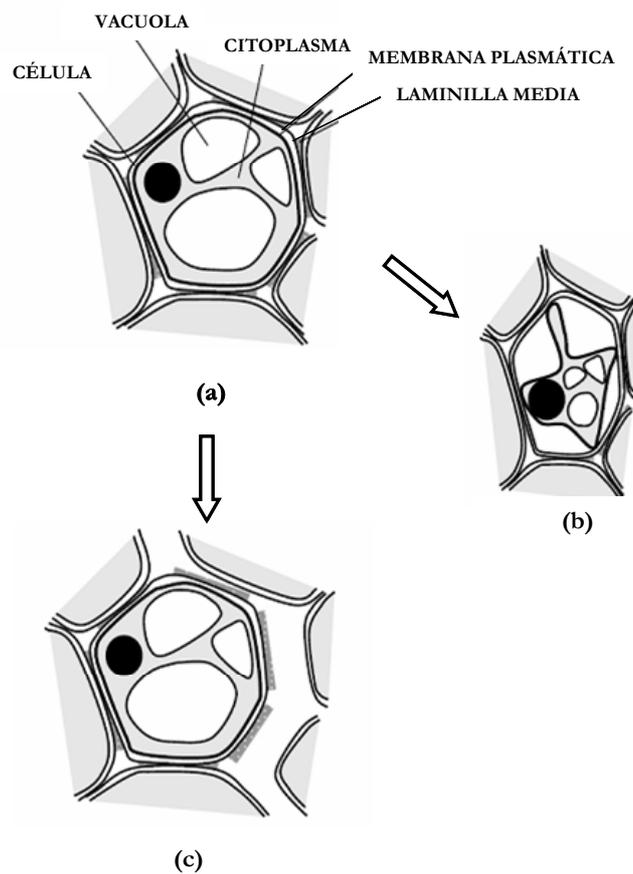
Otro evento que puede ocurrir durante la DO es la pérdida de contacto entre células (Figura 2.3c), generalmente atribuido a la degradación de los componentes de la laminilla media. Este evento conduce a modificaciones en las propiedades mecánicas del producto, así como en la porosidad debido a la formación/generación de espacios intercelulares. Conjuntamente, se han registrado alteraciones de la pared celular, cambios en la permeabilidad de las membranas y lisis de membranas celulares (Nieto et al., 1998; Alzamora et al., 2000; Martínez et al., 2007).

Sumadas a la influencia de la pared celular, de la membrana celular, de la laminilla media y de la presión de turgencia de las frutas, otros factores como el tamaño y la forma celular, el volumen del espacio intercelular, la presencia de gránulos de almidón y la composición química celular, también afectan a la textura y las propiedades mecánicas (Ilker & Szczeniak, 1990).

Particularmente en estudios realizados sobre deshidratación osmótica de manzana, se observó:

- Menor encogimiento cuanto mayor fue la ganancia de sólidos (Barat et al., 1998).
- Plasmólisis de las células superficiales en un corto tiempo de DO, mientras las células interiores aún permanecían turgentes y por ende, las capas celulares superficiales se percibieron más blandas que las interiores. Este fenómeno plantea el desarrollo de un gradiente de presión de turgencia durante la DO, responsable de la deformación estructural (Monsalve-González et al., 1993; Salvatori et al., 1998).

- Muerte celular en las capas superficiales para tratamientos de DO prolongados (Ferrando & Spiess, 2001; Mavroudis et al., 2004).
- Aumento de la permeabilidad de las membranas celulares: cambiando de parcial a totalmente permeable, lo que condujo a transformaciones significativas de la arquitectura del tejido y en definitiva, a productos menos crujientes y menos jugosos (Rastogi et al., 2002).
- Disminución de la porosidad durante el transcurso de la DO, debido a una reducción de los espacios intercelulares, lentamente ocupados por la solución osmótica (Martínez et al., 2007; Nieto et al., 2003).



**Figura 2.3:** Representación de los cambios en el tejido vegetal frente a la DO (Mayor et al., 2007).

En conclusión, el análisis de textura y de las propiedades mecánicas permite interpretar las modificaciones que un proceso de deshidratación produce sobre la morfología celular y,

consecuentemente, sobre la estructura del alimento (Torreggiani et al., 1998; Forni et al., 1986). A su vez, el entendimiento de las propiedades físicas del alimento permite predecir y controlar su respuesta durante el tratamiento.

Por lo expuesto hasta aquí, la DO por sí misma es útil para formular una extensa cantidad de productos dependiendo de las condiciones operativas elegidas, pero las posibilidades aumentan aún más al considerar la etapa posterior de secado y componer, finalmente, el método de secado combinado. La naturaleza del método ulterior a la DO permitirá perfeccionar y personalizar aún más el diseño y desarrollo del producto buscado en función de sus propiedades nutricionales, sensoriales y funcionales (Torreggiani, 1993).

El objetivo de este capítulo fue estudiar (macroscópicamente) la transferencia de materia durante la deshidratación osmótica de manzana, bajo diferentes configuraciones de proceso, esto es, analizando la influencia de ciertas variables operativas (tiempo de contacto fruta-solución, composición y concentración del medio deshidratante) sobre los aspectos fisicoquímicos y de calidad del producto intermedio obtenido. Para caracterizar y describir el transporte de materia se consideraron la pérdida de agua y la ganancia de sólidos. En tanto que los atributos de calidad analizados fueron el color, las propiedades mecánicas y la actividad acuosa, complementados con análisis de imágenes a nivel macroscópico y microscópico (a través de microscopía electrónica de barrido ambiental, ESEM).

## 2.2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.2.1 Material crudo y preparación de las muestras

Se utilizaron manzanas (*Malus pumila*) variedad Granny Smith (88% p/p de humedad en base húmeda; contenido de sólidos solubles: 12 °Brix).

Se eligió esta variedad (de tamaño mediano-grande) por su disponibilidad durante todo el año, por su calidad prácticamente constante y por su extensa aplicación comercial. El origen de esta fruta es el sur de Argentina (región de valles de Río Negro y Neuquén); la marca comercial utilizada fue *Moño Azul*. La empresa productora las almacena en cámaras frigoríficas desde su cosecha hasta su comercialización.

Las manzanas adquiridas para este trabajo, se mantuvieron en cámara a 10 °C hasta su uso. Se cortaron en cubos de 15 mm de lado utilizando como herramienta de corte una prensa semi-mecánica. Los cortes se realizaron en dirección paralela al eje principal, sin incorporar piel ni semillas.

### 2.2.2 Agentes osmóticos

Tal como se describió anteriormente, las propiedades de la solución deshidratante afectan fuertemente la eficiencia de la DO. De hecho, un factor importante a tener en cuenta al momento de elegir el agente osmótico es su influencia sobre la relación pérdida de agua/ganancia de sólidos y, en consecuencia, su tendencia a promover o reducir la impregnación (Sacchetti et al., 2001).

En líneas generales, la solución osmótica debe tener una actividad acuosa baja, sabor aceptable y compatible con el alimento deshidratado y con la dieta humana. Habitualmente se usan soluciones de azúcares (sacarosa, glucosa, fructosa, jarabe de maíz, sorbitol) para el procesamiento de frutas y soluciones de sales (NaCl, CaCl<sub>2</sub>) para vegetales, carne y pescado. Además, la selección de un agente osmótico particular depende de su costo, su peso molecular y las características del producto a deshidratar (Osorio et al., 2007).

En este trabajo se utilizaron tres agentes deshidratantes, que difieren básicamente en su peso molecular (PM) y poder edulcorante (Figura 2.4), además de su costo y las posibilidades de formulación que ofrecen: sacarosa, xilitol y jarabe de maíz de alto peso molecular.

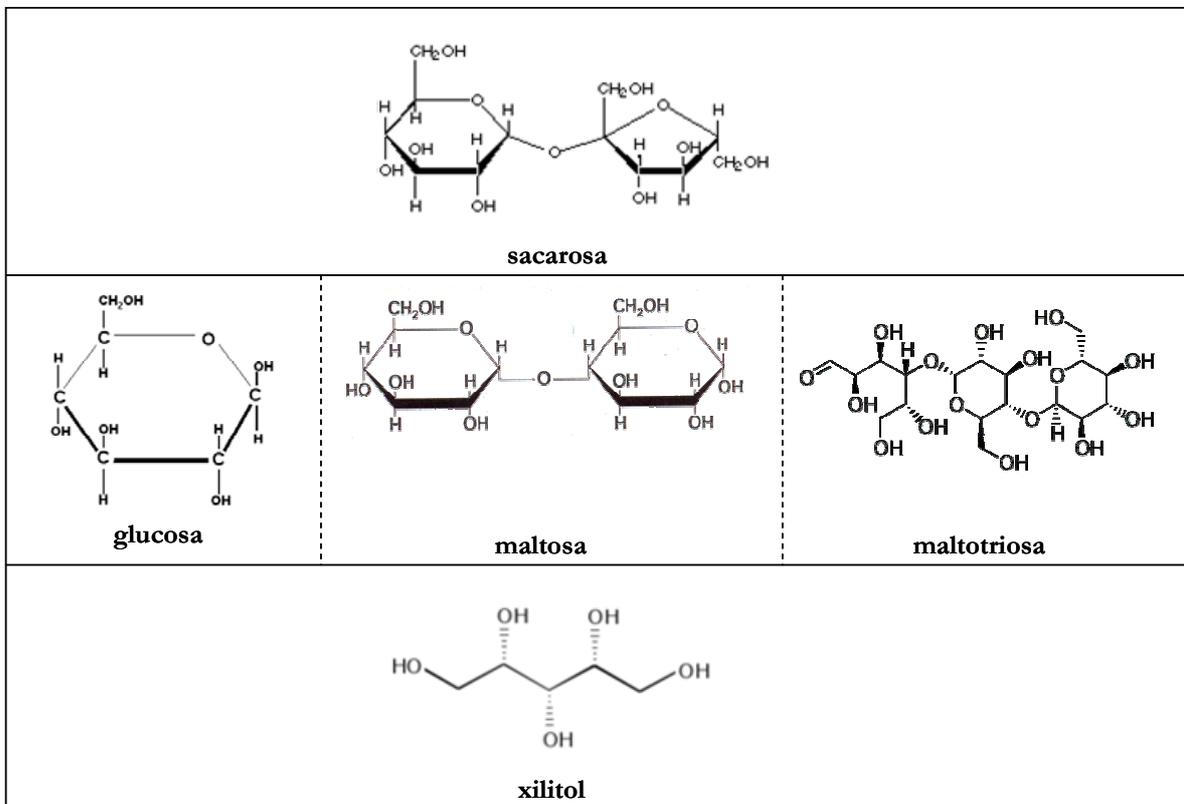


Figura 2.4 Estructura química de los agentes osmóticos.

- Sacarosa: es el edulcorante natural por excelencia, este disacárido representa el 60-80% de los edulcorantes y el 30% de los carbohidratos de la dieta humana. Es muy utilizada industrialmente por sus propiedades físicas de caramelización, higroscopicidad relativamente baja y su estabilidad en muchos procesos alimenticios. También es un preservador efectivo contra mohos como resultado de la presión osmótica en soluciones de alta concentración. El dulzor que proporciona a los alimentos es considerado un índice de referencia para el aportado por otros edulcorantes, ya que no desarrolla sabor residual. El peso molecular de la sacarosa es 342 g/mol.

Se utilizó azúcar común tipo A, marca Ledesma, cuya especificación técnica se adjunta en el Apéndice A.

- Xilitol: es un polialcohol obtenido por hidrogenación de la xilosa. Los polialcoholes o polioles son carbohidratos derivatizados, sólo contienen hidroxilos como grupos funcionales, que los hace higroscópicos, altamente solubles en agua, y que en soluciones de alta concentración, presentan viscosidad relativamente baja. En la industria alimenticia son usados como agentes de regulación de viscosidad, de retención de humedad (humectantes), de reducción de actividad acuosa, y de control de cristalización. También se utilizan para conservar y promover ciertas propiedades mecánicas y de rehidratación y como vehículos de aroma y sabor.

En su forma no hidratada aportan una sensación de frescura debido a su calor negativo de disolución (propiedad aprovechada en la formulación de caramelos y pasta dental). En general, los polialcoholes presentan sabor dulce y un poder endulzante menor o, en pocos casos, igual al de la sacarosa (Tabla 2.1).

Un aspecto distintivo de estos edulcorantes es su reducido aporte calórico: a diferencia del resto de los carbohidratos cuyo aporte calórico es 4 kcal/g, los polioles aportan entre 1.6 y 3 kcal/g, debido a que no son completamente hidrolizados y metabolizados en el intestino delgado. Esta propiedad refuerza el posicionamiento de los polioles en la formulación de alimentos reducidos en calorías y de alimentos destinados al control de la ingesta de glucosa, es decir, para el control de la diabetes.

Particularmente el xilitol, tiene un poder endulzante similar al de la sacarosa y aporta 2.4 kcal/g. Además, debido a la ausencia de grupos aldehídos, es menos reactivo que los azúcares y presenta una gran estabilidad al calentamiento y a la reacción con un gran número de sustancias químicas como bases o ácidos diluidos, esto hace que no participe en reacciones de pardeamiento (FDA, 2005).

Con respecto a su comportamiento durante la DO, se puede inferir que será diferente al de los otros dos agentes deshidratantes debido a que su peso molecular es menor de la mitad del de la sacarosa (152 g/mol). Se utilizó xilitol marca Xylisorb (Roquette, Francia) cuya especificación técnica se adjunta en el Apéndice A.

- Jarabe de maíz de alto peso molecular: está compuesto por glucosa (16%), maltosa (12%), maltotriosa (10%) y azúcares de alto peso molecular (62%). Es decir que todos sus azúcares tienen un PM superior al del xilitol y todos, salvo la glucosa, tienen un peso molecular mayor al de la sacarosa. Debido a esta distribución de tamaños moleculares, su comportamiento durante la DO será diferente de los solutos restantes. Diversos autores han estudiado el comportamiento de los jarabes de maíz como agentes osmóticos y dieron cuenta de la presión osmótica que promueven (Lerici et al., 1985; Biswal y Bozorgmehr, 1992). Estos jarabes son de amplio uso en la fabricación industrial de caramelos, dulce de leche y golosinas en general. El jarabe empleado en esta tesis fue Globe ® 1024 de Productos de Maíz (especificación técnica en el Apéndice A).

**Tabla 2.1.** Características de polioles y azúcares comúnmente usados en la industria alimenticia (Lindsay, 1996).

Sustancia	Poder endulzante relativo (poder endulzante sacarosa = 1)	Valor energético (kcal/g)
<b>Polioles</b>		
Manitol	0,6	1,6
Lactitol	0,3	2,0
Isomaltol	0,4 - 0,6	2,0
<b>Xilitol</b>	<b>1</b>	<b>2,4</b>
Sorbitol	0,5	2,6
Maltitol	0,8	3,0
<b>Azúcares</b>		
Xilosa	0,7	4,0
Glucosa	0,5 - 0,8	4,0
Fructosa	1,2 - 1,5	4,0
Lactosa	0,2	4,0
<b>Sacarosa</b>	<b>1</b>	<b>4,0</b>

### 2.2.3 Diseño experimental de DO

El equipo de DO consistió en un agitador, compuesto por una cámara termostaticada cuya base puede moverse en forma orbital -“shaker”- (Figura 2.5). La manzana previamente cortada y pesada se colocó dentro de una jaula plástica maleable (de la que se sujetaron pesas para evitar la flotación) y esta jaula fue sumergida dentro de un recipiente plástico (Erlenmeyers, capacidad: 2 litros) cargado con la solución deshidratante a la temperatura de trabajo. La boca de los recipientes se cubrió con papel metálico para evitar la contaminación y, aunque mucho menos probable, la pérdida de componentes volátiles.



**Figura 2.5** Agitador orbital para efectuar la DO.

La DO se realizó a 30 °C (temperatura constante y controlada) y la agitación se mantuvo en 110 rpm. La relación másica solución/fruta en todos los casos fue 20:1.

Se eligieron cuatro soluciones deshidratantes, a partir de los tres agentes osmóticos descritos, Tabla 2.2.

**Tabla 2.2.** Soluciones osmóticas utilizadas.

Agente osmótico	Concentración (°Brix)	Denominación
AAPM	69	AAPM69
Sacarosa	69	SAC69
Sacarosa	47	SAC47
Xilitol	47	XIL47

Con este diseño experimental fue posible analizar las siguientes variables operativas inherentes a las SO formuladas:

- Concentración de la solución: comparando las soluciones de sacarosa de 47 y 69 °Brix.
- Tamaño molecular del soluto: comparando las soluciones de sacarosa y AAPM de 69 °Brix, y las soluciones de xilitol y sacarosa de 47 °Brix.

Diferentes conjuntos de cubos de manzana (acondicionados como se señaló en el inciso 2.2.1) de peso inicial conocido, se sometieron a DO, considerando diferentes tiempos de contacto manzana-solución ( $t_{DO}$ ): 1, 2, 4, 12 y 24 horas. En cada  $t_{DO}$  se extrajeron las muestras y se enjuagaron con agua (a temperatura ambiente, cinco veces en forma intermitente). Luego, se secaron suavemente con papel absorbente y se registró el peso del producto osmodeshidratado durante ese tiempo de DO.

A partir de aquí, dos parámetros primarios como la pérdida de peso ( $WR_{DO}$ ) y el contenido de sólidos totales ( $TS_{DO}$ ) durante la DO, fueron usados para calcular otros parámetros que describen la evolución temporal de la transferencia de materia durante la DO, como la pérdida de agua ( $WL_{DO}$ ) y la ganancia de sólidos ( $SG_{DO}$ ). Conjuntamente, se calcularon la humedad en base húmeda y en base seca. Las ecuaciones se presentan a continuación:

1. Pérdida de peso durante la DO ( $WR_{DO}$ ):

$$WR_{DO}(\%) = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} \times 100 \quad (2.1)$$

Donde  $m_i$  es masa de la muestra fresca y  $m_f$  es la masa de la muestra ya osmodeshidratada (muestra DO), ambas se expresadas en gramos.

2. Contenido de Sólidos totales ( $TS_{DO}$ ):

$$TS_{DO}(\%) = \left( \frac{m_s}{m_0} \right) \times 100 \quad (2.2)$$

Donde  $m_0$  es el peso de la muestra húmeda (fresca o DO) y  $m_s$  es el peso de la muestra seca (ambas expresadas en gramos). Para obtener  $m_s$ , una fracción de peso conocido ( $m_0$ ) se secó hasta peso constante en estufa de vacío (Gallenkamp, Reino Unido) a 60 °C, (AOAC, 1995). Para determinar los sólidos totales, las muestras se pesaron en una balanza de precisión 0.0001 g (OHAUS Adventurer, USA).

3. Pérdida de agua durante la DO ( $WL_{DO}$ ):

$$WL_{DO}(\%) = \left[ \left( 1 - \frac{TS_0}{100} \right) - \left( 1 - \frac{TS_{DO}}{100} \right) \times \left( 1 - \frac{WR_{DO}}{100} \right) \right] \times 100 \quad (2.3)$$

Expresada como los gramos de agua que pierde la muestra por cada 100 gramos de muestra fresca y donde  $TS_0$  es el contenido de sólidos totales de la manzana fresca.

4. Ganancia de sólidos durante la DO ( $SG_{DO}$ ):

$$SG_{DO}(\%) = \left[ \left( 1 - \frac{WR_{DO}}{100} \right) \times \frac{TS_{DO}}{100} - \frac{TS_0}{100} \right] \times 100 \quad (2.4)$$

Expresada como los gramos de sólidos que ingresan al tejido por cada 100 gramos de muestra fresca.

5. Humedad en base húmeda ( $Hbh$ ):

$$Hbh = \frac{m_0 - m_s}{m_0} \quad (2.5)$$

Correspondiente a los gramos de agua/gramos de muestra inicial.

6. Humedad en base seca ( $Hbs$ ):

$$Hbs = \frac{m_0 - m_s}{m_s} \quad (2.6)$$

Expresada en términos de gramos de agua/gramos de muestra seca.

Se realizaron dos ensayos de DO para cada tiempo de contacto. A su vez, en cada uno de estos ensayos,  $TS_{DO}$  también se determinó por duplicado y el valor promedio se utilizó para calcular  $WL_{DO}$  y  $SG_{DO}$ .

$Hbb$  y  $Hbs$  se calcularon por duplicado a partir de cada valor de  $TS_{DO}$  y se informó su promedio.

Además se determinó la actividad acuosa ( $a_w$ ) utilizando un psicrómetro (Acqualab 3.0, Decagon Devices Inc., Pullman, WA), que fue calibrado con solución saturada de NaCl (Chirife & Resnik, 1984).

Con este objetivo una fracción de muestra (fresca o DO) compuesta de varios cubos tomados al azar, se cortó en pequeños fragmentos utilizando un escalpelo, se mezclaron los fragmentos y dividieron en tres grupos. De cada uno de estos grupos se midió  $a_w$ . Por lo tanto, para cada tiempo de DO -y para la manzana fresca- la actividad acuosa se midió por triplicado y se informó su promedio.

Este diseño experimental de la DO se ilustra con más detalle en la Figura 2.6.

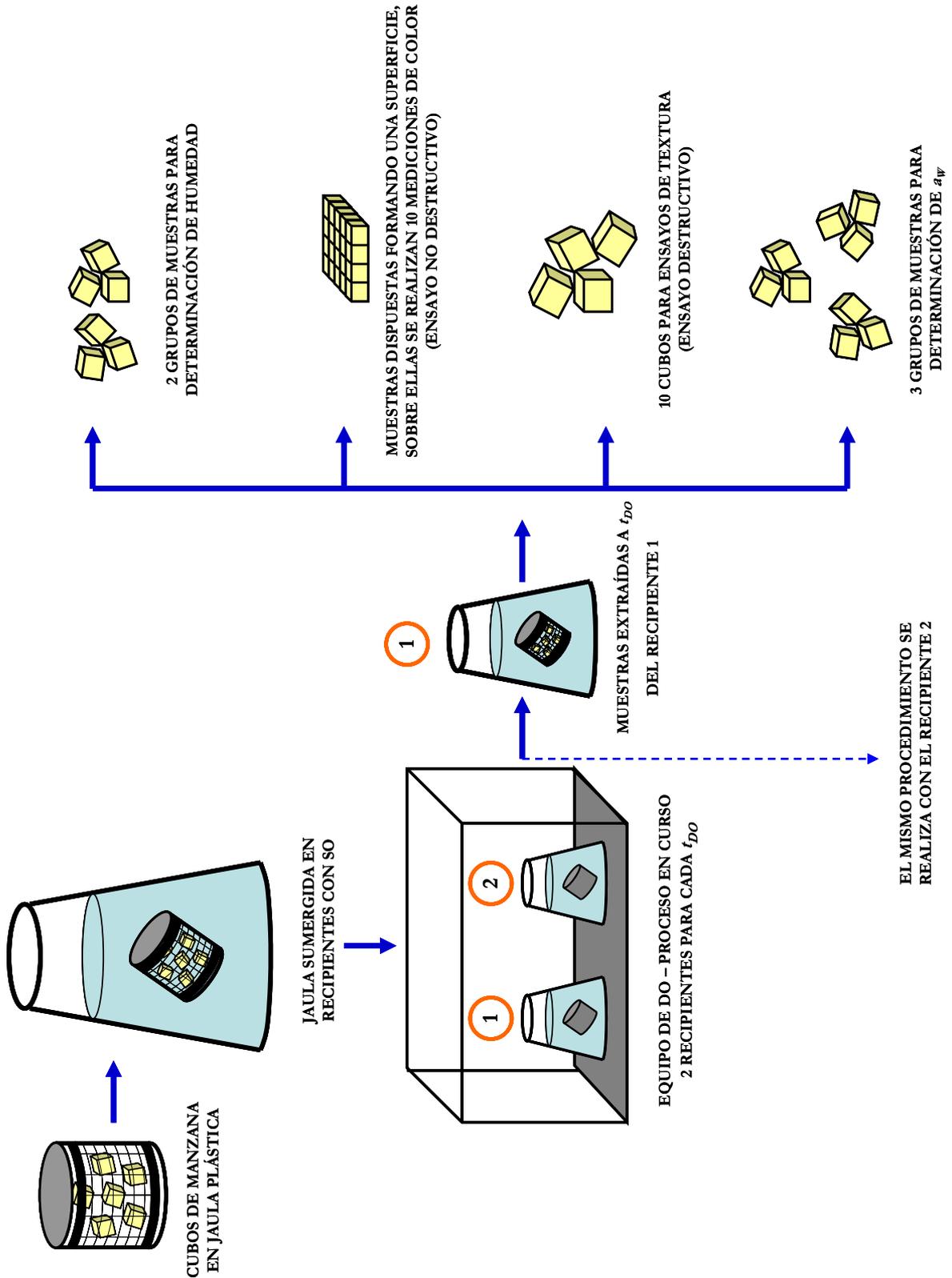


Figura 2.6 Diseño experimental de DO.

### 2.2.4 Análisis de color

Las mediciones se realizaron con un colorímetro Minolta CR300 (Japón). El sistema seleccionado para representar los valores fue el CIE  $L^*a^*b^*$ .

Las muestras (fresca y DO) se dispusieron formando una superficie sobre la que se midió color. Sobre cada superficie formada se efectuaron 10 mediciones y los cálculos posteriores se realizaron considerando el promedio de las mismas.

A partir de estos valores promedio obtenidos se calcularon las diferencias de color entre la manzana fresca y las deshidratadas osmóticamente durante un  $t_{DO}$  definido.

1. Variación de la luminosidad u oscurecimiento ( $\Delta L^*_{DO}$ ):

$$\Delta L^*_{DO} = L_{DO} - L_0 \quad (2.7)$$

2. Enrojecimiento ( $\Delta a^*_{DO}$ ):

$$\Delta a^*_{DO} = a_{DO} - a_0 \quad (2.8)$$

3. Amarillamiento ( $\Delta b^*_{DO}$ ):

$$\Delta b^*_{DO} = b_{DO} - b_0 \quad (2.9)$$

$L_{DO}$ ,  $a_{DO}$  y  $b_{DO}$  corresponden a la muestra DO (valor promedio de las 10 mediciones de color sobre la muestra DO) y  $L_0$ ,  $a_0$  y  $b_0$  corresponden a la manzana fresca (valor promedio de las 10 mediciones de color sobre la manzana fresca).

Finalmente, la variación total de color ( $\Delta E^*$ ) se calculó componiendo los tres parámetros anteriores, según:

$$\Delta E^*_{DO} = \sqrt{\Delta a^*_{DO}{}^2 + \Delta b^*_{DO}{}^2 + \Delta L^*_{DO}{}^2} \quad (2.10)$$

### 2.2.5 Evaluación de propiedades mecánicas

El estudio de las propiedades mecánicas se realizó mediante ensayos de compresión en dos ciclos, utilizando un texturómetro Stable Microsystems *TXT-2a* (Reino Unido).

Para configurar los ensayos, se trabajó con una celda de compresión de 5 kg y una probeta individual acrílica de 1 cm de diámetro, en tanto que la velocidad adquirida por el cabezal fue 5 cm/min.

A partir de cada ensayo se obtuvieron los valores de las siguientes propiedades mecánicas (Rosenthal, 1999):

- Dureza ( $D$ ): es la fuerza requerida para comprimir un sólido entre los molares.
- Adhesividad ( $A$ ): es el trabajo necesario para remover el alimento que ha quedado adherido a la boca (generalmente al paladar) durante el proceso normal de ingestión.
- Cohesividad ( $C$ ): representa la capacidad del alimento para deformarse antes de su ruptura en un ensayo de compresión.

Los valores informados están normalizados usando como valor de referencia al correspondiente a la manzana fresca, según:

$$X^*_{DO} = \frac{X_{DO}}{X_F} \quad (2.11)$$

Donde  $X^*_{DO}$  es el valor de la propiedad normalizado referido a la manzana fresca,  $X_{DO}$  es el valor de la propiedad correspondiente a un  $t_{DO}$  determinado y  $X_F$  es el valor de la propiedad correspondiente a la manzana fresca.

$X_F$  y  $X_{DO}$  son un promedio de diez mediciones realizadas sobre la muestra patrón (fruta fresca) y diez sobre el producto tratado para cada tiempo de DO. Vale aclarar que cada medición se realizó sobre un cubo (Ver Figura 2.6).

### **2.2.6 Observaciones microscópicas**

La respuesta de la estructura al tratamiento de DO fue observada a partir ensayos de microscopía electrónica de barrido ambiental (ESEM). Este método permite ver con detalle la estructura del tejido vegetal, sin necesidad de preparación previa. Los cubos de manzana se observaron directamente con un microscopio Philips ESEM modelo XL30 (Países Bajos). Se tomaron micrografías de las capas ubicadas entre los 2 y los 3 mm de la superficie.

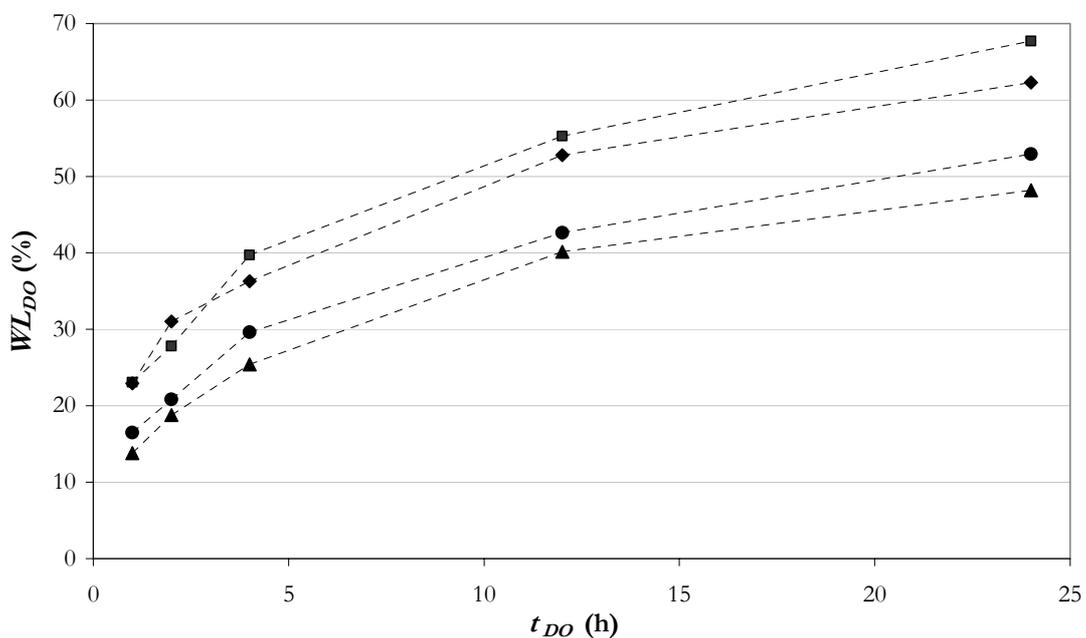
### **2.2.7 Observaciones macroscópicas**

A efectos de complementar el análisis, se registraron imágenes a nivel macroscópico, de las muestras correspondientes a diferentes tiempos de DO, utilizando una cámara fotográfica digital (Canon PowerShot G9, Japón).

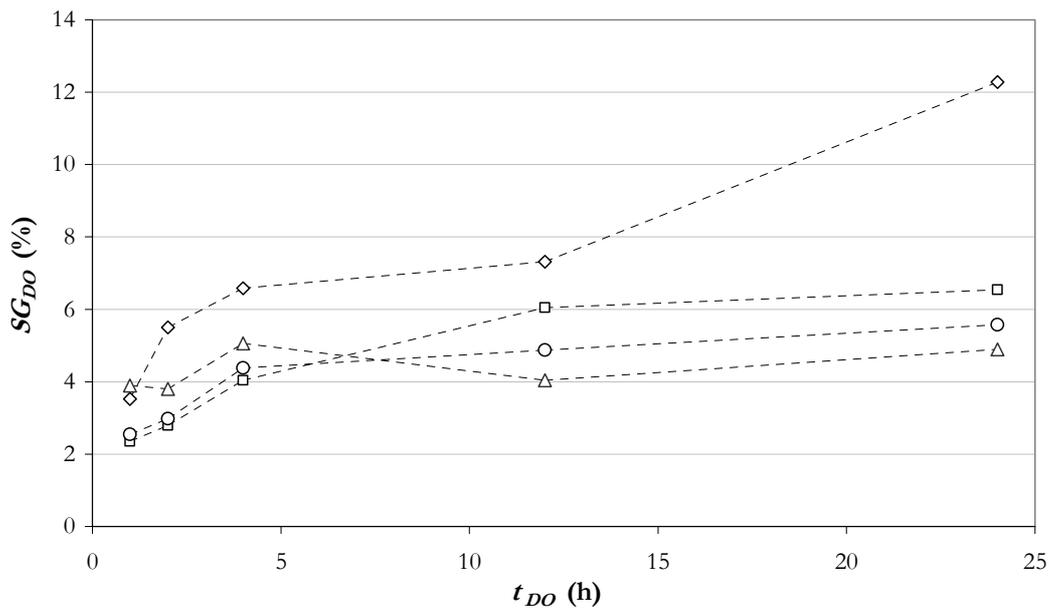
## 2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 2.3.1 Transferencia de materia

La evolución de la DO a través de los parámetros  $WL_{DO}$  y  $SG_{DO}$  (en base porcentual) se muestra en las Figuras 2.7 a y 2.7 b, respectivamente. Independientemente del agente osmótico, se observa que la magnitud del flujo de agua fue significativamente mayor que la del flujo de sólidos y que aumentó con el tiempo de contacto fruta-solución. Además se distingue que la velocidad de salida del agua fue mayor durante las primeras horas de DO y disminuyó hacia el final del proceso, aunque no alcanzó el equilibrio en el período de tiempo analizado (24 horas).



**Figura 2.7 (a)**  $WL_{DO}$ (%) en función del tiempo de DO ( $t_{DO}$ ) para los diferentes agentes osmóticos: SAC69 (■), XIL47 (◆), SAC47 (●) y AAPM69 (▲).



**Figura 2.7 (b)**  $SG_{DO}(\%)$  en función del tiempo de DO ( $t_{DO}$ ) para los diferentes agentes osmóticos: SAC69 ( $\square$ ), XIL47 ( $\diamond$ ), SAC47 ( $\circ$ ) y AAPM69 ( $\triangle$ ).

Como ya se mencionó, además de la duración de la DO, la concentración de la solución osmótica también fue una variable de análisis y para ello se recurrió a la comparación de los procesos llevados a cabo con las soluciones de sacarosa de 47 y 69 °Brix.

Bajo esta perspectiva, se observó que para todo  $t_{DO}$ , la solución más concentrada (SAC69) removió mayor cantidad de agua que la menos concentrada (SAC47): aproximadamente 28% mayor durante todo el proceso.

Conjuntamente, la ganancia de sólidos también fue mayor frente a mayor concentración del medio. Esta diferencia quedó establecida a partir de las 4 horas de DO, para tiempos menores ambas soluciones promovieron el mismo comportamiento de las muestras.

Por otro lado, para evaluar la influencia del “tamaño molecular” sobre la DO se recurrió a dos pares de soluciones:

- A. sacarosa y xilitol de 47 °Brix.
- B. sacarosa y AAPM de 69 °Brix.

Así, se comprobó que frente a una misma concentración los solutos más pequeños promovieron los  $WL_{DO}$  de mayor magnitud, estos son los casos de XIL47 en el primer par

(al menos un 17% más que SAC47 para todo tiempo de DO) y de SAC69 en el segundo (al menos un 37% más que AAPM durante todo el proceso).

Con respecto a la ganancia de sólidos:

- A. Par SAC47 - XIL47: durante todo el proceso, el xilitol consiguió incorporarse a la estructura del alimento en mayor cantidad y más velozmente que la sacarosa. Para  $t_{DO} \geq 12$  h se registraron las mayores diferencias entre ambos solutos ya que la velocidad de ingreso de sacarosa fue la menor de todo el tratamiento (tendiendo a un valor constante), y la de xilitol fue una de las mayores.
  
- B. Par SAC69 - AAPM69: durante las primeras horas se registró un mayor flujo de sólidos para la solución AAPM69. Cabe recordar que si bien en promedio el peso molecular de la solución es mayor que el de la sacarosa, esta solución está compuesta por un 16% de glucosa, cuyo tamaño molecular es aproximadamente la mitad del de la sacarosa y que, en consecuencia tendría mayor habilidad para difundir en la fruta. Este hecho se vio claramente en esas primeras horas de DO, en tanto que este comportamiento se revirtió para  $t_{DO} \geq 4$  h.

A excepción de la solución AAPM69, se pudo comprobar un aumento de  $SG_{DO}$  con el  $t_{DO}$ . La ganancia de sólidos para la solución AAPM69 merece un análisis particular ya que se registró un aumento de hasta las 4 horas y posteriormente un valor prácticamente constante. En este caso se puede suponer que los sólidos incorporados a la superficie del alimento permanecen allí imposibilitados de difundir hacia el interior de la muestra debido a su tamaño molecular y de este modo, bloquean el ingreso de nuevos solutos, constituyendo una “superficie saturada”. Por lo tanto, se comprueba que la formación de una capa concentrada de solutos en el alimento al comenzar el proceso, se opondría a una futura incorporación de sólidos, pero permitiría el desarrollo de un pronunciado gradiente de concentración dentro del alimento que promovería la transferencia de agua desde el centro del producto hacia el exterior. Además la salida del agua provocaría una marcada reducción de volumen y el gradiente interno decrecería volviéndose desfavorable para la difusión de solutos (Raoult-Wack et al., 1991).

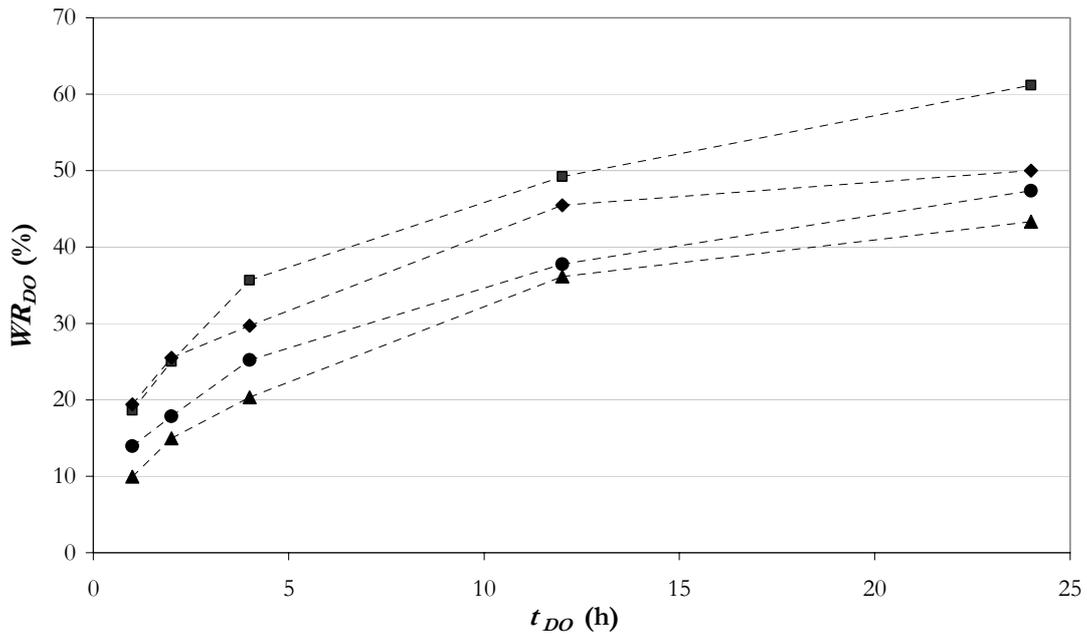
Además, diversos autores han comprobado que las características del tejido vegetal, como tortuosidad y diámetro de espacios intercelulares, influyen sobre la difusividad efectiva y esta resistencia es mayor cuando se incrementa el peso molecular del soluto. Estos efectos

se acentúan a medida que los productos deshidratados se encogen (Muhr & Blanshard, 1982). Conjuntamente, Isse & Shubert (1991) demostraron que la resistencia a la difusión causada por un encogimiento de la pared celular es mucho más notoria a medida que aumenta el peso molecular: comprobaron que la difusividad de la sacarosa disminuye más que la de la glucosa frente al encogimiento debido a la deshidratación ( $PM_{\text{GLUCOSA}}/PM_{\text{SACAROSA}} \approx 0,5$ ).

Posiblemente la acumulación inicial de sólidos en las capas superficiales del alimento también ocurra para el resto de las soluciones, sólo que se podría esperar una pronta difusión hacia el interior a medida que los gradientes de concentración, constituidos en fuerza impulsora de la DO, así lo permitieran. Marani (2007) demostró que los perfiles de concentración obtenidos con AAPM son más planos que los obtenidos con la solución de sacarosa (ambas soluciones con la misma concentración: 47 °Brix), indicando la mayor facilidad de la sacarosa para difundir.

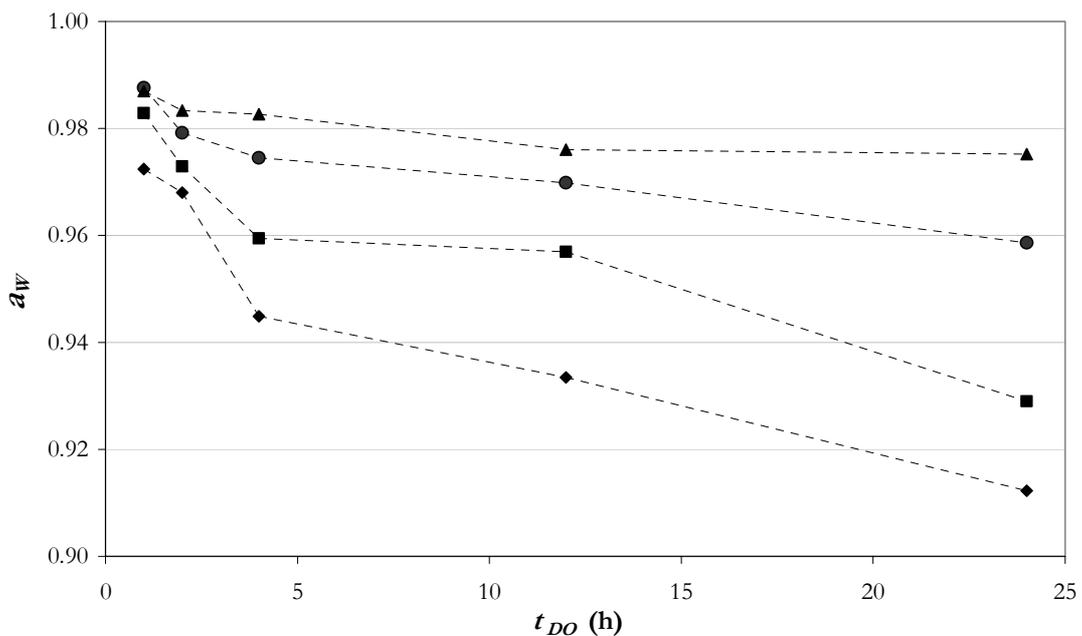
Además de este hecho, es necesario traer a colación una observación experimental: para  $t_{DO} \geq 12$  h se encontraron fragmentos de fruta sobrenadando en la solución de AAPM. Sería razonable suponer una desintegración superficial a tiempos largos de DO, si se tiene en cuenta el gran tamaño molecular de este soluto, el cual, para incorporarse en el tejido del alimento debería forzar la estructura dando lugar a capas superficiales más “seltas” o “abiertas”. A estas tensiones ejercidas por el soluto, deben sumarse las ejercidas por el agua en su propósito de salir hacia el medio.

En la Figura 2.8 se presenta la evolución de la reducción de peso durante la DO. Este parámetro es consecuencia de la remoción de agua y ganancia de sólidos y es la causa de la reducción de volumen y deformación durante la DO, características que no se cuantifican en este trabajo pero que han sido reiteradamente estudiadas por diversos autores (Yao & Le Maguer, 1997; Lozano et al., 1983; Nieto et al., 2003; Spiazzi & Mascheroni, 1997; Marani, 2007).

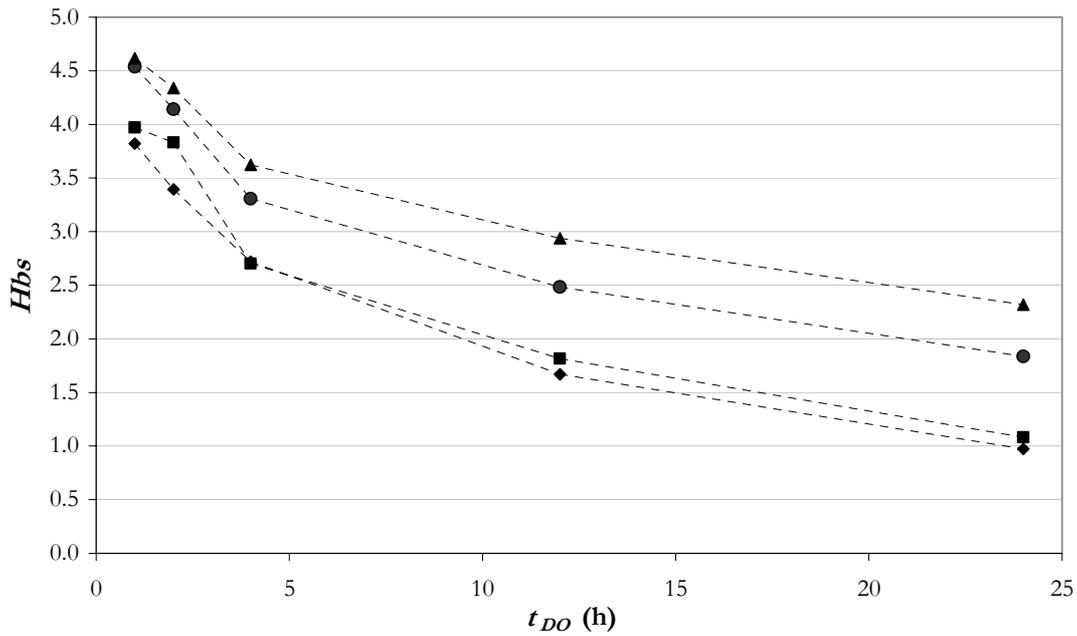


**Figura 2.8**  $WR_{DO}$ (%) en función del tiempo de DO ( $t_{DO}$ ) para los diferentes agentes osmóticos. SAC69 (■), XIL47 (◆), SAC47 (●) y AAPM69 (▲).

Los contenidos de agua y de sólidos determinan específicamente la actividad acuosa del alimento y obviamente su humedad. En la Figuras 2.9 y 2.10 se muestra la evolución de  $a_w$  y de la humedad en base seca ( $Hbs$ ), respectivamente, en función del  $t_{DO}$ .



**Figura 2.9**  $a_w$  en función del tiempo de DO ( $t_{DO}$ ) para los diferentes agentes osmóticos: SAC69 (■), XIL47 (◆), SAC47 (●), y AAPM69 (▲).



**Figura 2.10**  $Hbs$  en función del tiempo de DO ( $t_{DO}$ ) para los diferentes agentes osmóticos. SAC69 (■), XIL47 (◆), SAC47 (●), y AAPM69 (▲).

Se comprobó que tanto la actividad acuosa como la humedad en base seca disminuyeron a lo largo del proceso. Los descensos más marcados se registraron dentro de las primeras 4 horas y luego se tornaron más lentos, coincidiendo con el comportamiento de la pérdida de agua.

También se puede observar que  $a_w$  y  $Hbs$  no sólo dependieron de  $WL_{DO}$  sino también de la cantidad molar y de la naturaleza (estructura química) de los sólidos incorporados.

Puntualmente, analizando la DO con la solución XIL47, se ve que no es el caso en el que se consiguió la mayor eliminación de agua y sin embargo, sí es el caso en el que se obtuvieron la menor actividad acuosa y la menor humedad en base seca para cualquier  $t_{DO}$ , coincidentemente con la mayor incorporación de sólidos.

Aquí, no sólo es importante considerar la cantidad porcentual o másica de xilitol incorporado, sino la cantidad de moléculas. Por ejemplo, comparando al xilitol con la sacarosa y cotejando molécula a molécula, ambos solutos tendrían similar capacidad para formar puentes de hidrógeno con el agua del alimento, pero el xilitol incorporó el doble de moléculas y por lo tanto dispone del doble de grupos hidroxilos ávidos de asociación química con el agua. En consecuencia, frente a los mismos valores de  $SG_{DO}$  (igual cantidad de gramos de sólidos incorporados), el xilitol se ligaría a mayor cantidad de moléculas de

agua y por lo tanto, se comprobaría una depresión mayor de  $a_w$  que en el caso de la sacarosa.

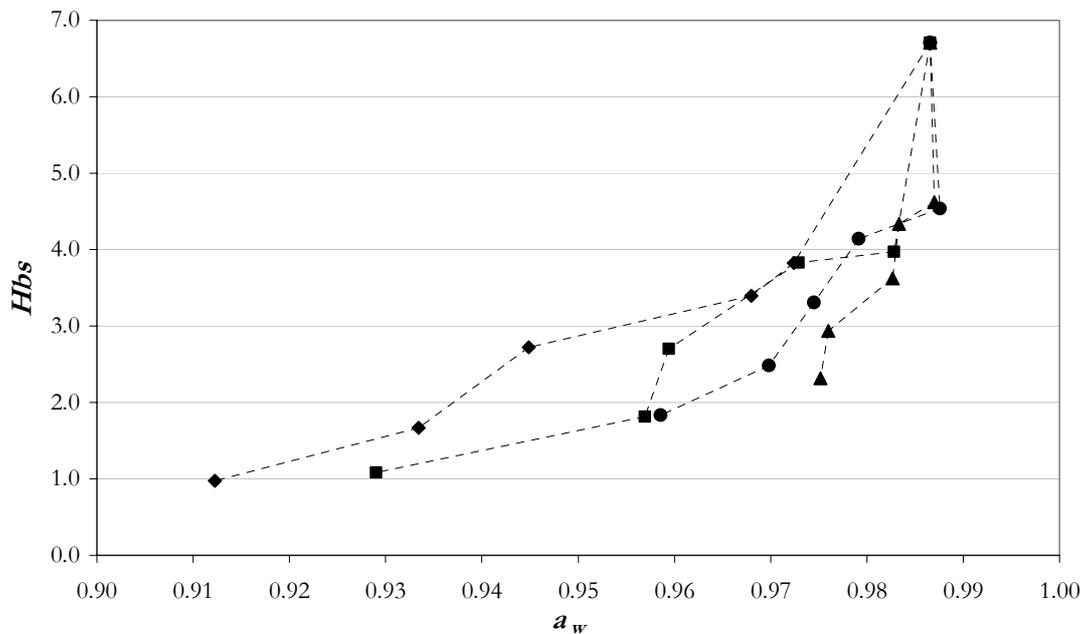
De acuerdo con lo expuesto, se deduce que, si bien la pérdida de agua es el flujo de mayor magnitud establecido durante la DO, la naturaleza de los sólidos incorporados no resulta menos importante en su rol de agente depresor de la actividad acuosa.

Por otro lado, la relación entre la actividad acuosa y la humedad (en base seca) se muestra en la Figura 2.11, donde se ve que la solución AAPM69 promovió las menores pérdidas de agua y disminución de  $a_w$ , seguida de SAC47.

Del mismo modo, comparando XIL47 y SAC69 en la segunda mitad del proceso ( $t_{DO} \geq 12$  h), para valores similares de  $Hbs$  se obtuvieron productos con menor actividad acuosa cuando se usó XIL47. Del mismo modo, se puede distinguir que con esta solución se obtuvieron las mayores disminuciones en ambas propiedades para tiempos cortos, reforzando los resultados anteriores.

Además, en términos de transferencia de materia, el mismo producto (igual  $a_w$ ,  $Hbs$  y tipo de soluto incorporado) que se consiguió utilizando SA69 durante 12 h se podría obtener con SAC47, pero esto demandaría un proceso dos veces más largo (los valores de  $WL_{DO}$  y  $SG_{DO}$  conseguidos son similares para SA69-12 h y SAC47-24 h).

Esta observación marca la relevancia de la concentración de la solución en la eficiencia del tratamiento.



**Figura 2.11** Relación  $a_w - Hbs$  para los diferentes agentes osmóticos. SAC69 (■), XIL47 (◆), SAC47 (●) y AAPM69 (▲).

También se confirma a partir de las Figuras 2.9 y 2.11 que la deshidratación osmótica no permitió reducir la actividad acuosa del alimento por debajo de 0.9. Constituye esta una desventaja del tratamiento en el propósito de obtener alimentos de vida útil prolongada.

### 2.3.2 Cinética de cambio de color

Como ya se ha mencionado, la evolución de la DO se analizó a través de la pérdida de agua y de la ganancia de sólidos (y alternativamente en función de la pérdida de peso), por ello, es interesante no sólo evaluar cómo se modifica el aspecto de los productos, sino también conocer la relación entre ambos flujos de materia y el color de los productos.

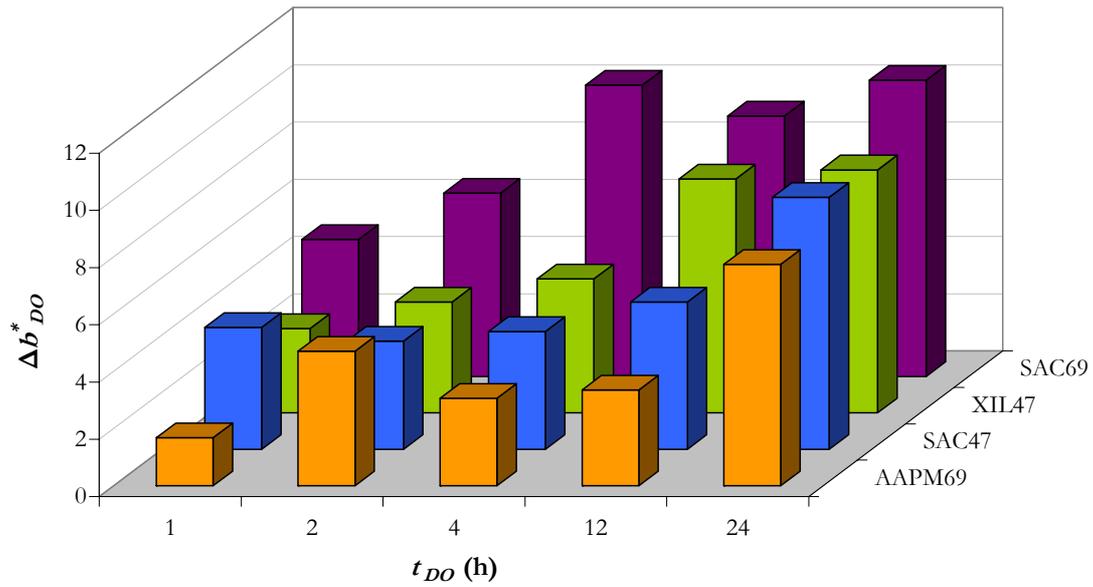
Es decir que mediante el análisis de color se pretendió comprender la influencia de  $WL_{DO}$ ,  $SG_{DO}$  (o  $WR_{DO}$ ) sobre los índices  $L$ ,  $a$  y  $b$ .

En todos los casos, las muestras respondieron al tratamiento perdiendo luminosidad, enrojeciéndose y tornándose más amarillas.

Haciendo foco sobre el amarillamiento, se registró un aumento de esta componente con el avance de la DO y, en líneas generales, los menores valores de  $\Delta b^*_{DO}$  se obtuvieron con AAPM69, algo mayores con SAC47, luego con XIL47 y los más altos con SAC69 (Figura 2.12). De acuerdo con esta última observación, se puede deducir que el amarillamiento fue directamente proporcional a la pérdida de agua:  $\Delta b^*_{DO}$  aumentó con  $WL_{DO}$ ; independientemente de la naturaleza del soluto, aquel que generó la mayor pérdida de agua, generó el mayor amarillamiento.

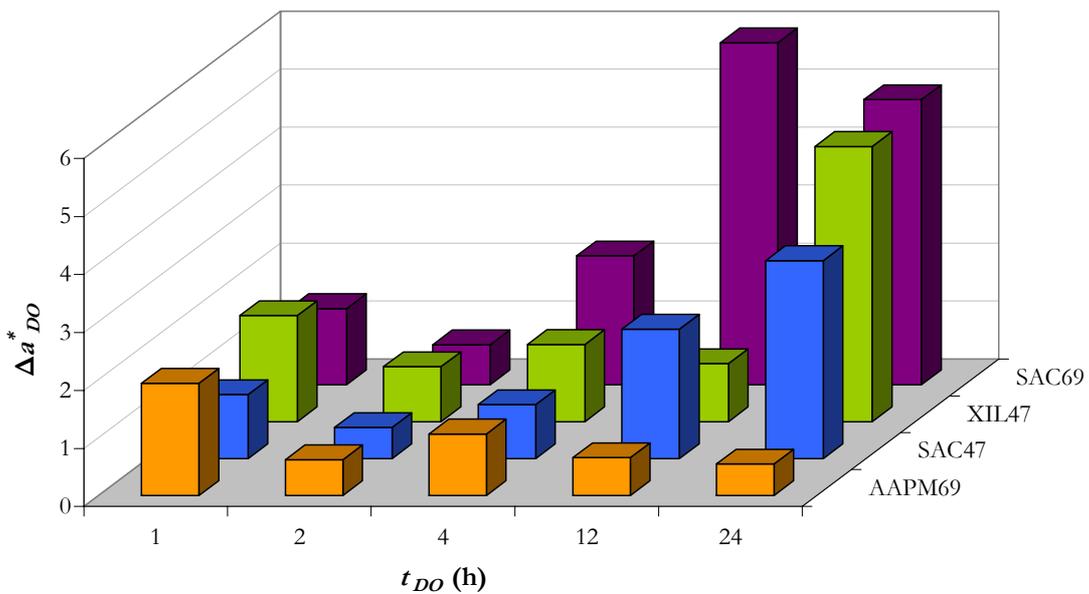
Vale preguntarse en este momento ¿cuál es la influencia del soluto (o de la ganancia de sólidos) sobre el amarillamiento? En este aspecto, es necesario tener en cuenta el carácter no reactivo del xilitol frente a sustancias oxidantes, por lo cual, no contribuiría al cambio de color. Sin embargo, en la práctica, las muestras tratadas con xilitol, sufren amarillamiento.

De aquí, es factible proponer que el amarillamiento desarrollado durante la DO fue el resultado de reacciones de pardeamiento dependientes de la pérdida de agua e independientes del soluto incorporado. Se puede construir una hipótesis para explicar esta observación, considerando que a mayor  $WL_{DO}$  aumentó la cantidad de células plasmolizadas (a nivel superficial particularmente) y, en consecuencia, fue mayor la cantidad de sustancias liberadas de los compartimientos celulares, capaces de desencadenar reacciones que contribuyeron al amarillamiento.



**Figura 2.12** Amarillamiento durante la DO ( $\Delta b^*_{DO}$ ) de manzana tratada con diferentes soluciones deshidratantes.

El enrojecimiento en cambio, no presentó una relación clara con la duración de la DO ni con la naturaleza del agente osmótico, no obstante (y a excepción de la solución de AAPM) se puede sospechar un aumento para  $t_{DO}$  crecientes (Figura 2.13).



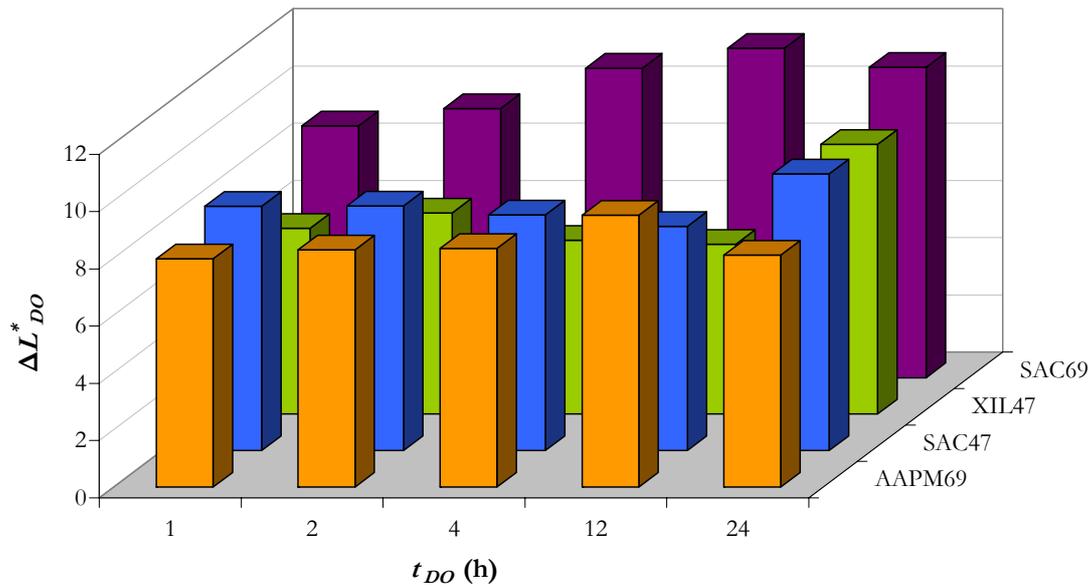
**Figura 2.13** Enrojecimiento durante la DO ( $\Delta a^*_{DO}$ ) de manzana tratada con diferentes soluciones deshidratantes.

Simultáneamente, en la Figura 2.14 se puede ver que el oscurecimiento fue significativo (respecto del amarillamiento y enrojecimiento) desde las primeras horas de DO y es posible asumir una tendencia levemente creciente con el avance del tratamiento. No obstante, es oportuno describir las ligeras disminuciones de  $\Delta L_{DO}^*$  observadas en AAPM69 y SAC69 para  $t_{DO} = 24$  h, que responderían a un fenómeno superficial: para tiempos largos de DO las células superficiales se suponen totalmente plasmolizadas y es coherente entonces, suponer una superficie más lisa aquí que en las muestras deshidratadas menos tiempo. Claramente, una superficie llana y sin irregularidades como la correspondiente a  $t_{DO} \approx 24$  h, reflejaría mayor cantidad de luz que una rugosa con imperfecciones. En consecuencia, la manzana que ha sufrido un tratamiento prolongado, desarrolla una superficie más lisa y refleja más la luz, sin embargo, no es menos oscura que las que han sido osmodeshidratadas por menos tiempo.

Este mismo efecto, propio de la superficie sobre la que se mide color, fue descrito por otros autores en trabajos vinculados con el horneado de productos de panadería (Shibukawa et al., 1989; Broyart et al., 1998; Purlis & Salvadori, 2007, 2009).

Asimismo, es posible deducir que el oscurecimiento no depende solo de  $WL_{DO}$ , por ejemplo reparando en SAC47 y AAPM69, si el oscurecimiento fuera indiferente al soluto, sería esperable que SAC47 promoviera mayores oscurecimientos que AAPM69 porque ha impulsado mayores  $WL_{DO}$  durante todo el proceso, sin embargo ambos solutos condujeron a valores de oscurecimiento similares para todo  $t_{DO}$ .

Por lo tanto, la pérdida de la luminosidad estaría afectada por la eliminación de agua, la ganancia de sólidos y la naturaleza de los solutos.



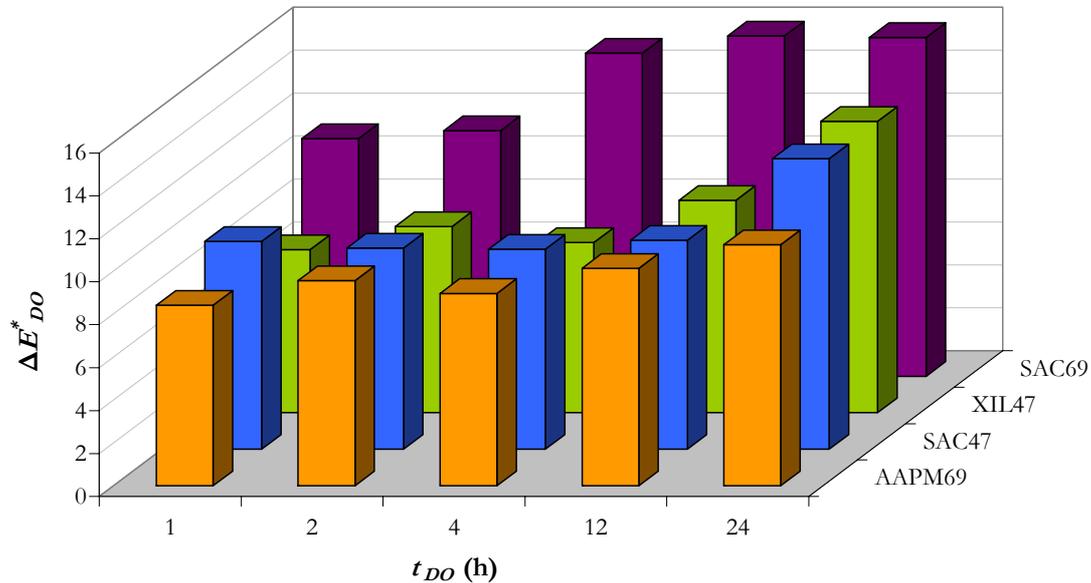
**Figura 2.14** Oscurecimiento durante la DO ( $\Delta L^*_{DO}$ ) de manzana tratada con diferentes soluciones deshidratantes.

Teniendo en cuenta que los menores oscurecimientos se obtienen al utilizar xilitol, y asumiendo que este es un soluto “inerte” para las reacciones de pardeamiento o bien, un inhibidor de las mismas, entonces, el  $\Delta L^*$  registrado ( $\Delta L^*_{XII}$ ) sería propio únicamente de las reacciones de la matriz del alimento. Si se considera, por ejemplo al oscurecimiento obtenido con SAC47, se puede definir que  $(\Delta L^*_{SAC47} - \Delta L^*_{XII47})$  es la fracción del oscurecimiento total debido al soluto: sacarosa. Esta diferencia sería tanto mayor cuanto mayor sea la concentración de sacarosa en el alimento, es decir que  $(\Delta L^*_{SAC69} - \Delta L^*_{XII47}) > (\Delta L^*_{SAC47} - \Delta L^*_{XII47})$ .

Finalmente, combinando la evolución de los tres parámetros descriptos, la variación total de color aumentó levemente con el tiempo de DO, prácticamente copiando el comportamiento de la luminosidad (Figura 2.15).

Vale recordar que los sólidos incorporados a la fruta durante la DO producen el desplazamiento del oxígeno ocluido en la estructura y en consecuencia, disminuyen las posibilidades de pardeamiento enzimático (Kim & Toledo, 1987). Sin embargo, este efecto se ve minimizado por la plasmólisis que provee de sustancias celulares favorables para el pardeamiento no enzimático. Esto puede observarse al comparar los resultados de las soluciones SAC47 y SAC69 donde, aunque SAC69 es la que consiguió incorporarse más al

tejido, no es la que promovió los menores cambios de color, sin embargo, si es la que generó la mayor remoción de agua y presumiblemente el mayor deterioro a nivel celular.



**Figura 2.15** Variación Total de Color durante la DO ( $\Delta E^*_{DO}$ ) de manzana tratada con diferentes soluciones deshidratantes

### 2.3.3 Variación de propiedades mecánicas

La dureza fue una de las propiedades mecánicas más sensible a la deshidratación, tal como se muestra en la Figura 2.16; el ablandamiento se registró desde las primeras horas de la DO y en líneas generales, aumentó con el  $t_{DO}$ .

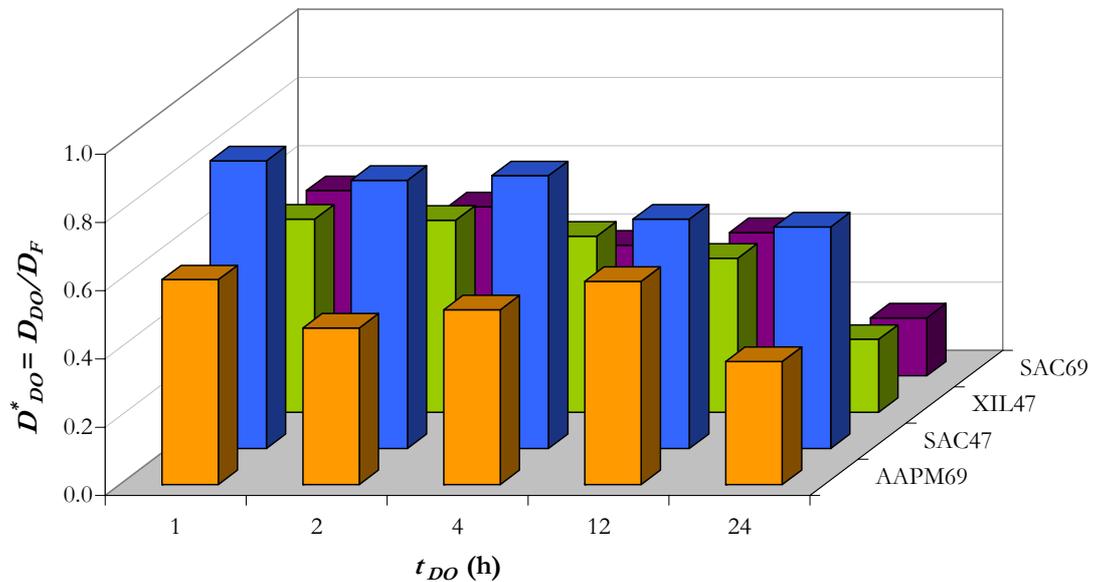
Los ablandamientos más significativos correspondieron a las soluciones que promovieron las mayores remociones de agua: SAC69 y XIL47. En ambos escenarios y hacia el final del proceso, las manzanas DO presentaron una dureza 80% menor que la correspondiente al estado fresco.

Analizando ahora la relación entre la dureza y la magnitud de  $WL_{DO}$ , se ve que no existe una dependencia directa entre la pérdida de agua y la pérdida de la dureza. Si así hubiera sido, se habrían registrado ablandamientos similares entre dos soluciones que promovieron  $WL_{DO}$  similares como SAC47 y AAPM69. Sin embargo, esto no fue lo ocurrido, sino que las muestras tratadas con SAC47 sufrieron un ablandamiento menor que las tratadas con AAPM69, posiblemente debido a que la sacarosa incorporada al tejido, habría contribuido a

“reforzar” la estructura. Por otro lado, se puede inferir que el mayor tamaño molecular (promedio) de la solución de AAPM generó un daño mayor al tejido en su intento por difundir hacia el interior de la muestra, resultando un producto más blando que el obtenido con SAC47.

Retomando la comparación entre SAC47-24 h y SAC69-12 h, ambos productos experimentaron la misma ganancia de sólidos y la misma pérdida de agua, sin embargo el producto tratado con SAC69 fue significativamente más blando que el correspondiente a SAC47-24 h. Es decir que, no sólo la cantidad de agua removida o la cantidad de sólidos (reforzadores o no) incorporados afectan a la dureza, sino que también lo haría la velocidad de remoción de agua.

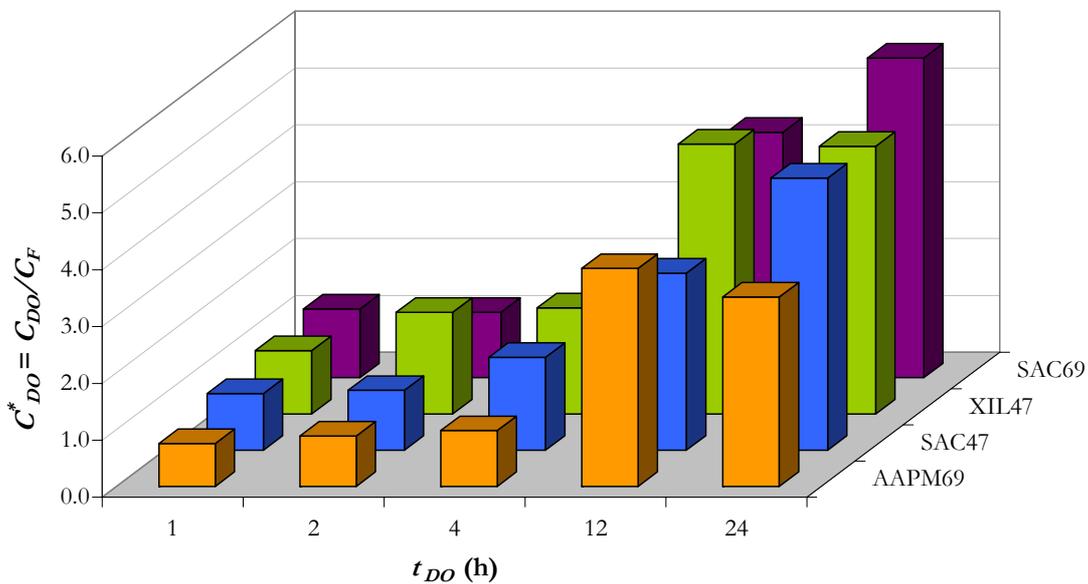
La pérdida de dureza registrada durante la DO se atribuye a cambios en los componentes y en el espesor de la pared celular, en el tamaño y forma de las células, en el volumen de los espacios intercelulares y en la pérdida de turgencia (Jackman et al., 1992; Sajnin et al., 1999). Es decir que,  $WL_{DO}$ ,  $SG_{DO}$  y la velocidad de salida de agua, modifican puntualmente todas esas características estructurales.



**Figura 2.16** Variación de la Dureza durante la DO ( $D^*_{DO}$ ) de manzana tratada con diferentes soluciones deshidratantes.

Por otro lado, con el avance de la DO se obtuvieron productos cada vez más cohesivos y, en líneas generales, más aún que la manzana fresca.

Es decir que, a medida que las muestras pierden agua, aumentan su capacidad para deformarse (sin romperse) ante una fuerza de compresión (Figura 2.17). La cohesividad no sólo dependió de  $WL_{DO}$  sino también de  $SG_{DO}$ . Por ejemplo, entre las dos soluciones de sacarosa, la más concentrada, que más sólidos incorporó al alimento, produjo las muestras más cohesivas. El xilitol y las soluciones de sacarosa promovieron los mayores valores de cohesividad y sobre todo, el incremento más significativo tuvo lugar entre las 12 y las 24 h, cuando se registraron los mayores valores de  $SG_{DO}$ .



**Figura 2.17** Variación de la Cohesividad durante la DO ( $C^*_{DO}$ ) de manzana tratada con diferentes soluciones deshidratantes.

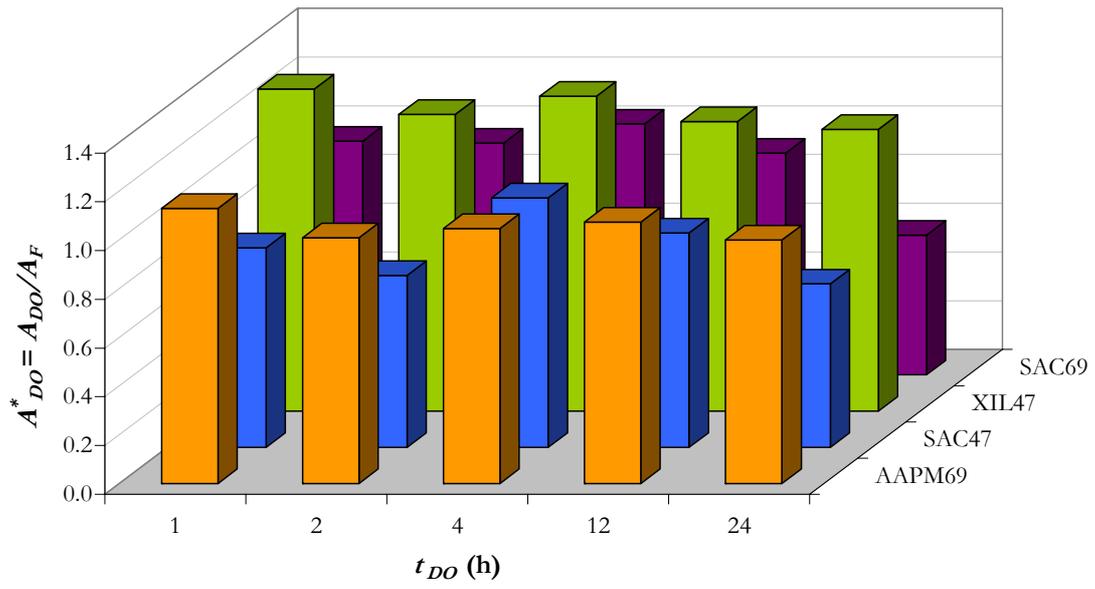
Si bien la dureza y la cohesividad analizadas describen cambios en todo el volumen de la muestra, la adhesividad, por el contrario, es una propiedad inherente a la superficie del producto. Desde este punto de vista, es coherente proponer que la presencia de los solutos y agua en la superficie -y, en definitiva de SO- promueven una adhesividad mayor. En nuestro caso, los diferentes solutos condujeron a respuestas variadas en términos de adhesividad (Figura 2.18):

- Con las dos soluciones de sacarosa se obtuvieron muestras cada vez más adhesivas hasta las 4 h. A partir de aquí, perdieron adhesividad a medida que avanzó el  $t_{DO}$ .
- La manzana DO con xilitol y con AAPM resultó más adhesiva que la manzana fresca, independientemente de la duración de la DO.

Ambos comportamientos pueden explicarse considerando el contenido de agua y de sólidos a nivel superficial.

En el análisis de las soluciones SAC, es apropiado recordar que la velocidad de incorporación de la sacarosa fue constante hasta las 4 h de DO y que luego disminuyó (mucho más marcadamente para SAC47 inclusive). Por esta razón, un contenido cada vez mayor de sólidos en superficie habría promovido los respectivos aumentos de la adhesividad. A partir de aquí, los sólidos se incorporaron más lentamente, pero el flujo de agua continuaba siendo aún intenso y, por lo tanto, la superficie aún con menor contenido acuoso, lo que habría provocado la pérdida de adhesividad. Es decir que, en la segunda mitad del proceso (aunque se suponga que los sólidos están presentes) se necesitaría más agua en superficie para recuperar los valores de adhesividad correspondientes a tiempos menores.

En el caso del xilitol y de la solución de alto peso molecular, durante todo el tratamiento se habría mantenido una proporción conveniente sólidos-agua que condujo al desarrollo de una adhesividad prácticamente constante en el tiempo.



**Figura 2.18** Variación de la Adhesividad durante la DO ( $A^*_{DO}$ ) de manzana tratada con diferentes soluciones deshidratantes.

### 2.3.4 Composición calórica de los productos DO

El enriquecimiento en los sólidos y la pérdida de agua modifican la composición calórica de los productos DO. En este trabajo se utilizó xilitol, que, como edulcorante nutritivo posee menor aporte energético que los endulzantes convencionales (como sacarosa, fructosa o dextrosa). La contribución calórica de la sacarosa al igual que la del resto de los componentes de la solución de AAPM, se considera 4 kcal/g, en tanto que la del xilitol, 2.4 kcal/g (ANMAT, 2004); ver Tabla 2.1.

A medida que evoluciona la DO, el alimento se volvió más “concentrado”: perdió agua y ganó solutos de la SO, por lo que es esperable un aumento en su aporte energético.

En la Figura 2.19 se muestran las calorías aportadas por los productos al final de la DO. En todos los casos se observa que cuanto más prolongado fue el tratamiento, más calóricos resultaron los productos. Simultáneamente, para procesos de hasta 4 h, no se observaron diferencias entre los solutos empleados. Sin embargo, para tiempos mayores de 4 h, siempre se consiguieron los productos más calóricos al trabajar con SAC69 y los menos, al hacerlo con AAPM69.

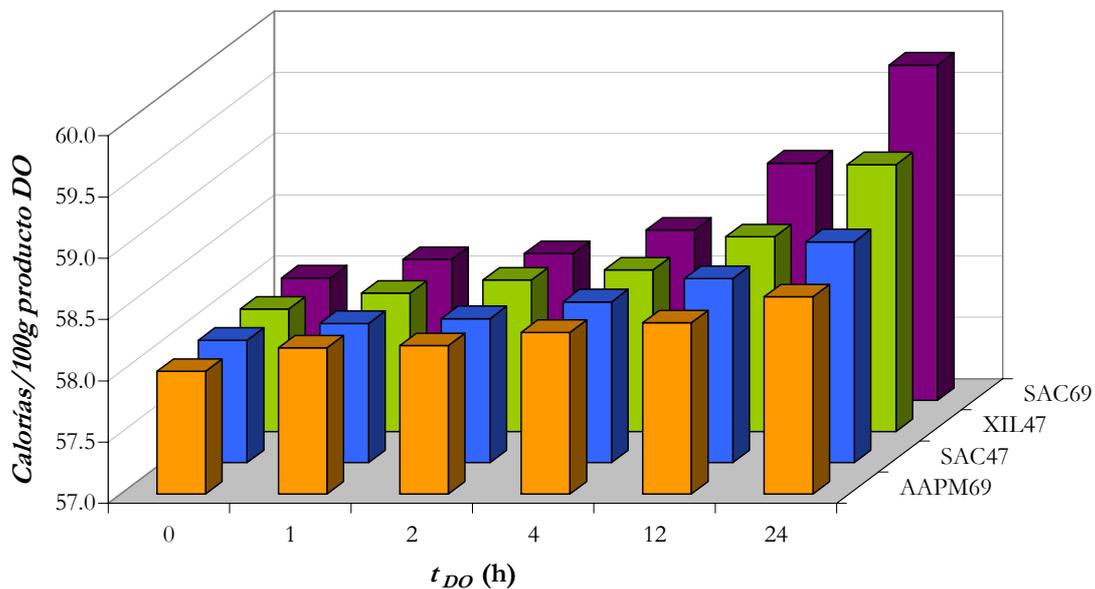


Figura 2.19 Composición calórica de los productos DO.

### 2.3.5 Análisis microscópico de los productos DO

Se realizaron observaciones microscópicas de los productos tratados con las soluciones de SAC47, SAC69 y AAPM69.

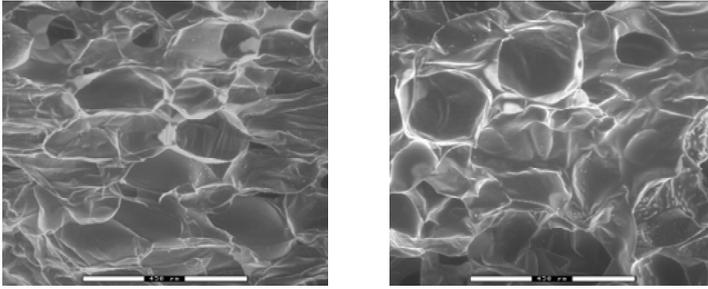
En las micrografías se ve que las células de la manzana fresca aparecen turgentes (pared celular lisa, tensa) y los espacios intercelulares son pequeños y de forma irregular.

Ya a la primera hora de DO con SAC47 (Figuras 2.20 a 2.25) se produjeron cambios en el tejido: las células se encogieron y su pared apareció menos tensa, con algunos pliegues. Además, se ve la incipiente formación de canales atribuible al encogimiento celular.

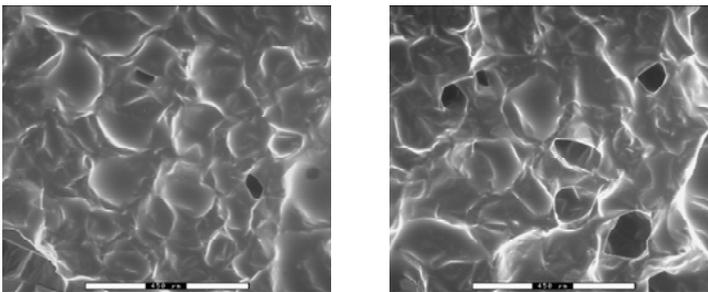
A las 2 horas de DO, apareció una recuperación de la forma celular y una aparente mayor turgencia, en tanto que los espacios intercelulares aumentaron su tamaño, formando canales más definidos. A partir de aquí, se observó un colapso general, en el que los límites celulares ya no son perceptibles y donde los “canales” formados a las dos horas, tienden a desaparecer, indicando una estructura menos porosa.

La observación realizada para  $t_{DO}=2$  h fue descrita por otros autores que atribuyeron esta recuperación celular a un “flujo de agua inverso”: cuando el tejido vegetal se coloca en un medio de alta presión osmótica, la salida de agua espontánea produce la pérdida de turgencia de las células y la plasmólisis. Al mismo tiempo, los solutos celulares que no pueden ser metabolizados se concentran progresivamente.

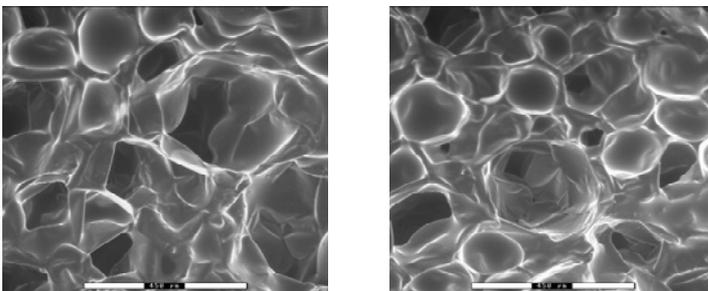
Cuando la concentración de estos solutos dentro de las células es mayor que en el medio intercelular, es decir que el potencial químico del agua es mayor fuera de la célula que en el interior, ocurre el ingreso de agua hacia el interior celular, entonces se recupera la turgencia. Este sería el mecanismo homeostático responsable de la recuperación celular, sin embargo para ello se requiere que las células conserven la funcionalidad de sus membranas. Esto sería aplicable solamente para tiempos cortos de DO, en los que la plasmólisis no ha sido letal para las células (Nieto et al., 2003; Martínez et al., 2007; Barat et al., 1998; Bray et al., 2000; Keurentjes et al., 1992; Lewicki & Porzecka-Pawlak, 2005). A partir de las 4 h, se observa un colapso creciente de la estructura.



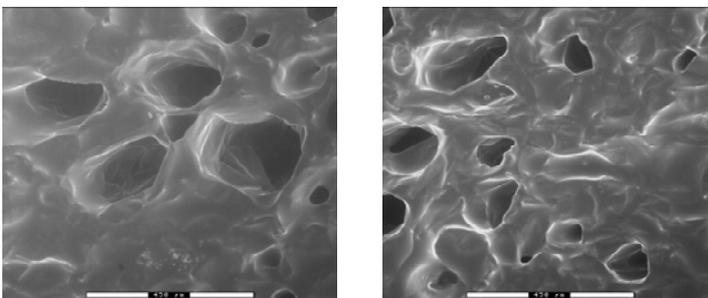
**Figura 2.20** Micrografías correspondientes a manzana fresca. Aumento 100x.



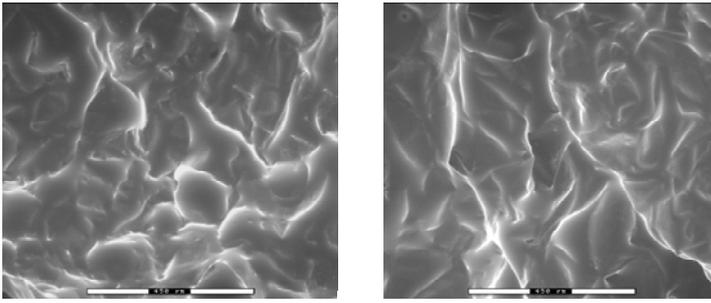
**Figura 2.21** Micrografías correspondientes a manzana DO 1 h con SAC47. Aumento 100x.



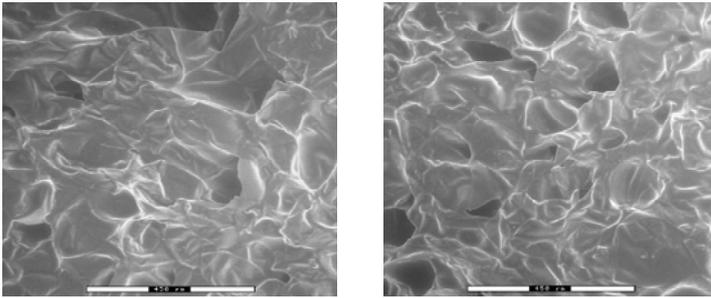
**Figura 2.22** Micrografías correspondientes a manzana DO 2 h con SAC47. Aumento 100x.



**Figura 2.23** Micrografías correspondientes a manzana DO 4 h con SAC47. Aumento 100x.

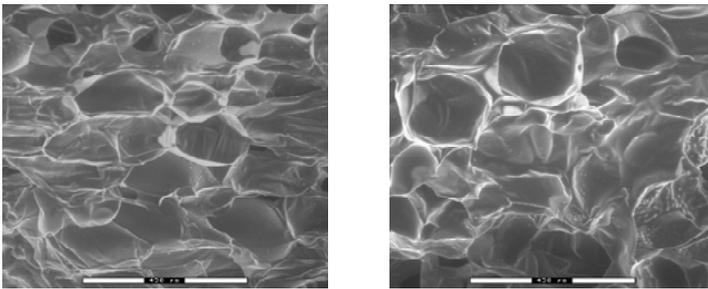


**Figura 2.24** Micrografías correspondientes a manzana DO 12 h con SAC47. Aumento 100x.

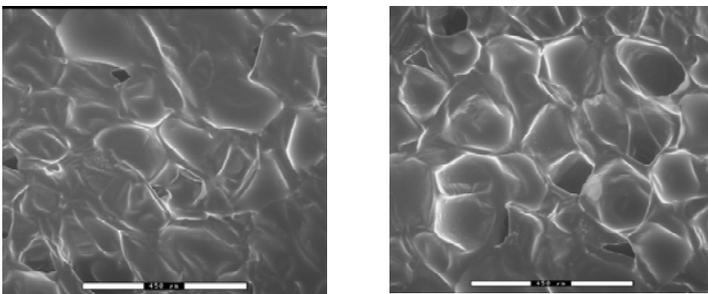


**Figura 2.25** Micrografías correspondientes a manzana DO 24 h con SAC47. Aumento 100x.

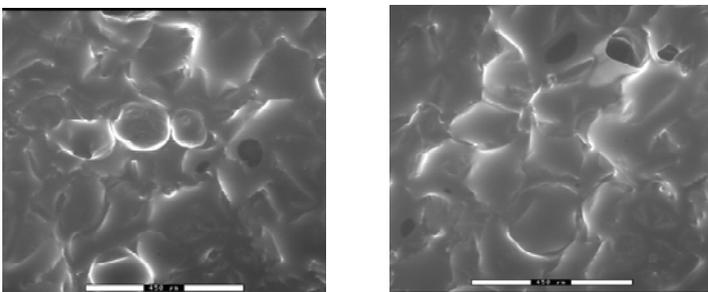
En el caso de AAPM69 (Figuras 2.26 a 2.31) esta recuperación de la turgencia se observó a las 4h de DO, indicando que la acumulación de sólidos en la células fue más tardía que en caso de SAC47. Al mismo tiempo se vio para tiempos largos (12 y 24 h) que los espacios intercelulares generados tienen un tamaño importante en la estructura ya colapsada. Probablemente este sea un indicio del impacto del tamaño molecular del soluto DO sobre la estructura de la manzana.



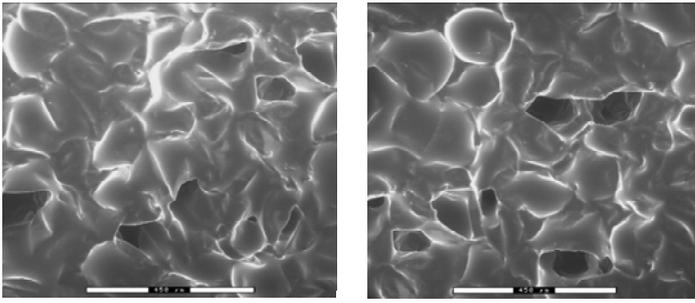
**Figura 2.26** Micrografías correspondientes a manzana fresca. Aumento 100x.



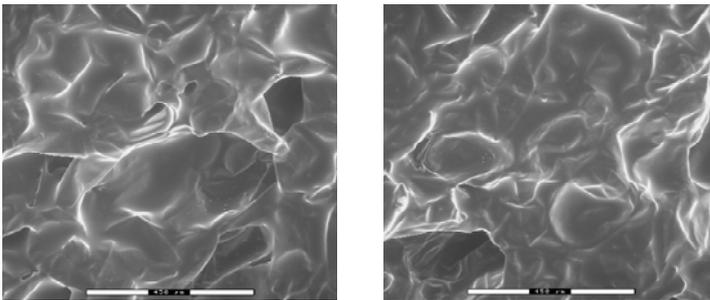
**Figura 2.27** Micrografías correspondientes a manzana DO 1 h con AAPM69. Aumento 100x.



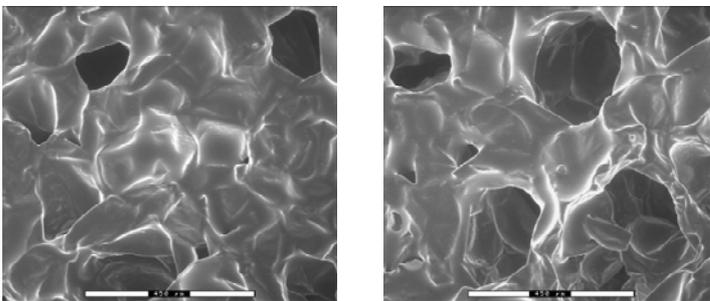
**Figura 2.28** Micrografías correspondientes a manzana DO 2 h con AAPM69. Aumento 100x.



**Figura 2.29** Micrografías correspondientes a manzana DO 4 h con AAPM69. Aumento 100x.

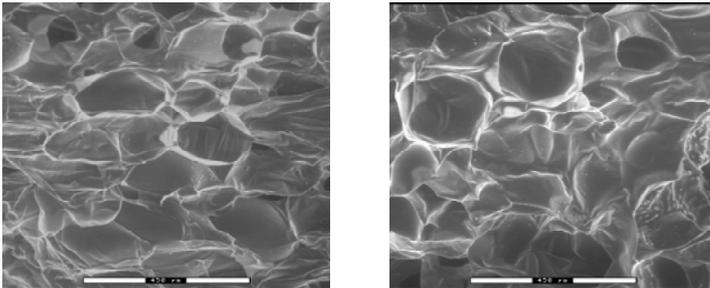


**Figura 2.30** Micrografías correspondientes a manzana DO 12 h con AAPM69. Aumento 100x.

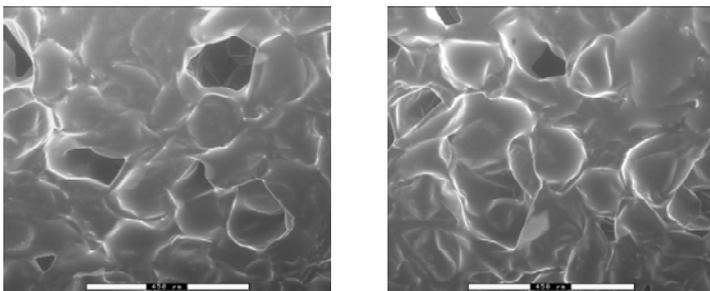


**Figura 2.31** Micrografías correspondientes a manzana DO 24 h con AAPM69. Aumento 100x.

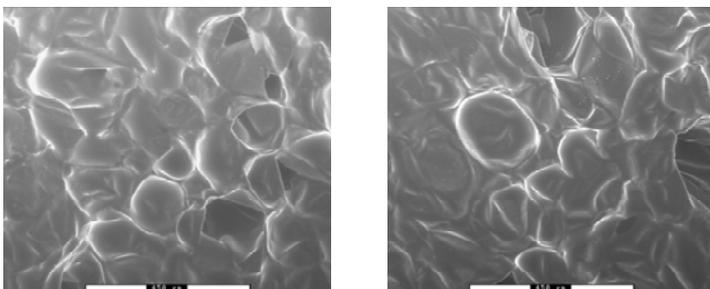
En el caso de la SAC69 (Figuras 2.32 a 2.37) no apareció en ninguna secuencia de micrografías una recuperación celular, sino que se observa el colapso progresivo, más pronunciado que en los dos casos anteriores. Los espacios intercelulares van desapareciendo en el curso de la DO y ya no se percibe el arreglo celular inicial, por lo que la porosidad habría disminuido más notoriamente que en los casos anteriores.



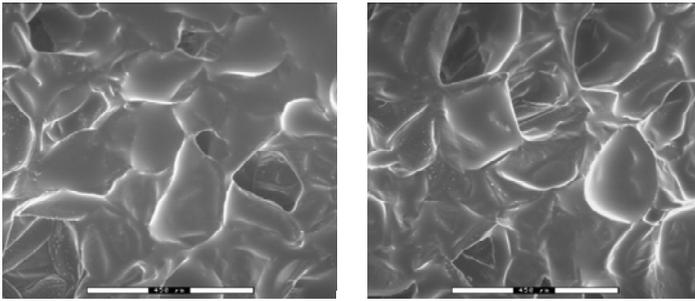
**Figura 2.32** Micrografías correspondientes a manzana fresca. Aumento 100x.



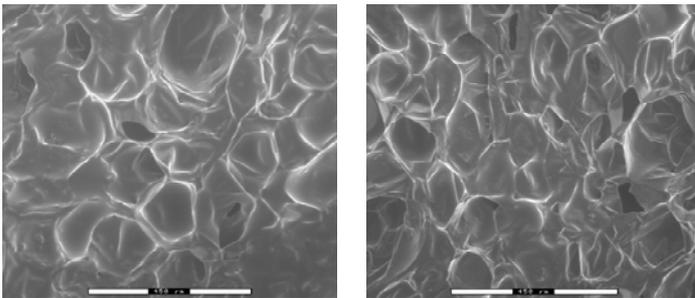
**Figura 2.33** Micrografías correspondientes a manzana DO 1 h con SAC69. Aumento 100x.



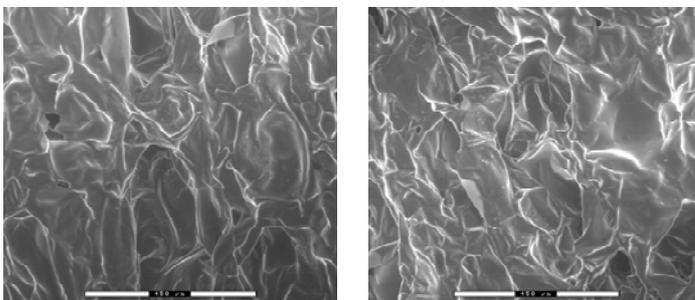
**Figura 2.34** Micrografías correspondientes a manzana DO 2 h con SAC69. Aumento 100x.



**Figura 2.35** Micrografías correspondientes a manzana DO 4 h con SAC69. Aumento 100x.



**Figura 2.36** Micrografías correspondientes a manzana DO 12 h con SAC69. Aumento 100x.



**Figura 2.37** Micrografías correspondientes a manzana DO 24 h con SAC69. Aumento 100x.

En este punto, cabe analizar la relación entre la información extraída del análisis de las propiedades mecánicas y el microscópico:

- Para SAC47, la velocidad de salida de agua y de incorporación de sólidos son máximas entre las 0 y las 4h de DO. Ambos flujos determinarían que en un corto tiempo, las células resultarían pobres en agua y ricas en sus sólidos originales. Debido a esta distribución de sólidos, se produciría un flujo inverso de agua hacia las células. Esto ocurre a las 2 h. Para tiempos superiores a las 2 h, los sólidos superficiales habrían empezado a difundir hacia el centro de las piezas pero esta velocidad sería aún menor que la de la incorporación superficial, dando lugar a una superficie saturada de sólidos, responsable del pico de adhesividad observado empíricamente. A partir de las 4 h, la adhesividad disminuye levemente sugiriendo un ingreso progresivo de sólidos hacia el interior, cada vez más dificultado por la deformación de la estructura, en tanto que el análisis microscópico revela esta desorganización estructural.
- La misma hipótesis puede plantearse para AAPM69, solo que a tiempos mayores: la recuperación celular tendría lugar a las 4 h y la máxima acumulación de sólidos en superficie a las 12 h de DO. Durante la segunda mitad del proceso ocurriría la difusión de los solutos en el tejido de la fruta, promoviendo cambios severos en la arquitectura celular. Una observación coincidente con lo expuesto fue el hallazgo de fragmentos de fruta desprendidos para  $t_{DO} \geq 12$  h al trabajar con esta solución y las observaciones microscópicas dan cuenta de ello.

## 2.4 CONCLUSIONES

La deshidratación osmótica permitió remover mayor cantidad de agua de la estructura del alimento cuanto mayor fue el tiempo de contacto fruta-solución (aunque no se haya alcanzado el equilibrio para los tiempos analizados), mayor la concentración de la solución osmótica y menor el tamaño del soluto deshidratante.

Vale aquí recordar que la relación solución:fruta es lo suficientemente alta como para asegurar una concentración constante del medio durante todo el proceso y que esta concentración de agua en la solución osmótica fue muy inferior a la presente en el alimento, por lo que la fuerza impulsora de la DO no se anuló en ningún momento. A esto se debe agregar el efecto de los sólidos que difundieron en contracorriente y se acumularon en la superficie del alimento y habrían conseguido incorporarse a la estructura de la manzana a tiempos mayores, formando una “costra” con baja humedad. Esta capa constituiría una barrera adicional a la transferencia de solutos, reforzando la fuerza impulsora de la DO.

Con respecto a la estabilidad de los productos obtenidos, aunque los valores de  $WL$  estuvieron cercanos al 70% (al final del proceso) la actividad acuosa no se redujo por debajo de 0.9. Este hecho es una desventaja del tratamiento frente al propósito de obtener alimentos de vida útil prolongada, aspecto que fue tratado en la introducción de este capítulo y pone de manifiesto la necesidad de implementar una etapa posterior de deshidratación que permita reducir aún más este coeficiente. La  $a_w$  no sólo dependería de  $WL$  sino también de la cantidad y naturaleza de sólidos incorporados, es decir, de su capacidad para interactuar con las moléculas de agua aún presentes en el alimento. También se comprobó que el xilitol presenta el mejor desempeño como agente higroscópico: permite desarrollar los productos con mayor contenido de agua y menor actividad acuosa.

En cuanto al color del producto DO, se pudo ver que se modifica desde el inicio del tratamiento y que, el oscurecimiento y la variación total de color dependen de la pérdida de agua, de la ganancia de sólidos y de la naturaleza del soluto incorporado. En tanto que, conociendo  $WL$ , se puede deducir directamente cómo se va a afectar el amarillamiento y esto daría cuenta de la incidencia de la deshidratación sobre la estructura celular, independientemente del soluto utilizado.

En conjunto, considerando que el xilitol no es susceptible a las reacciones de pardeamiento, las variaciones de color que se observen al utilizarlo como agente osmótico, serán propias de la fruta e independientes del soluto incorporado, respondiendo al mayor o menor daño celular causado por el proceso.

Con respecto a las propiedades mecánicas, se obtuvieron productos más blandos cuanto mayor fue la pérdida de agua y en algunos casos el sólido incorporado actúa como “soporte”, reforzando la estructura cuando la pérdida de agua no es tan significativa como para impedirlo (surge esta conclusión al comparar las dos soluciones de sacarosa). La cohesividad evoluciona en forma contraria a la dureza: aumenta para cualquier  $t_{DO}$  y además, cuanto mayor es la cantidad de sólidos incorporada, más cohesivo es el producto. Es decir que, la pérdida de agua promueve disminución de la dureza y aumento de la cohesividad.

Por su lado, la adhesividad aparece como una propiedad directamente ligada a la concentración superficial de sólidos: cuanta mayor cantidad de sólidos se ubican en la superficie se obtienen productos más adhesivos o pegajosos.

Con respecto al valor energético, aunque el xilitol aporta el 40% de las calorías que aportan los otros endulzantes estudiados, no es el que permite obtener los productos con menor densidad calórica (calorías/g de producto).

Esto indica que frente al objetivo de desarrollar productos reducidos en calorías, la selección del soluto es importante, por cuanto deben ser balanceadas sus propiedades para deprimir la actividad acuosa y para preservar la calidad del alimento (color y propiedades mecánicas), además de su eficiencia para remover agua.

Los análisis a nivel microscópico dan cuenta del impacto de la DO a nivel celular: las células van perdiendo la turgencia, los espacios intercelulares tienden a disminuir su tamaño aunque aparecen algunos otros (más aislados) inclusive de mayor tamaño que los presentes en la fruta fresca.

## CAPÍTULO 3

# DISEÑO OPERATIVO DEL SECADO COMBINADO

### 3.1 INTRODUCCIÓN

Como se señaló en los capítulos 1 y 2, la deshidratación osmótica no permite reducir la actividad acuosa ( $a_w$ ) a valores que impidan o retrasen significativamente el crecimiento microbiano y por ello se la define como pretratamiento (se obtienen productos con  $a_w \geq 0.9$ ). Por lo tanto, si la meta de un proceso productivo es la obtención de alimentos con bajo  $a_w$ , en el que la DO es la etapa inicial, queda planteada la necesidad de acoplar una segunda etapa que permita obtener el valor de actividad acuosa deseado y esto da lugar a un “proceso combinado”.

Habitualmente, la reducción de la actividad acuosa se realiza por remoción de agua, por adición de solutos (sales o azúcares) que se asocian a la molécula de agua o bien por congelación, dejando menos agua “disponible” para reacciones de deterioro. El valor de  $a_w$  se debe seleccionar en función del tipo de alimento, de su microflora característica, de las aplicaciones y de las condiciones de almacenamiento finales (Christian, 1980).

En este trabajo, se fijó a la actividad acuosa como el parámetro crítico del proceso combinado, es decir que, independientemente del diseño el proceso global (mediante la manipulación de las variables operativas de ambas etapas individuales), todos los productos finales tuvieron la misma  $a_w$ .

Asimismo, la  $a_w$  debe reducirse al mínimo valor necesario para inhibir el desarrollo de microorganismos y preservar lo máximo posible la calidad del producto, teniendo en cuenta que reducciones de actividad acuosa a valores inferiores a los necesarios para el crecimiento microbiológico, promoverían otro tipo de reacciones como por ejemplo, pardeamiento enzimático, no enzimático (reacción de Maillard) u oxidación de vitaminas (dependiendo del rango de  $a_w$  de trabajo).

En el caso de las frutas (materia prima de este trabajo), contienen ácidos orgánicos en cantidades generalmente suficientes para producir un  $\text{pH} \leq 4.6$ , este valor y la naturaleza de los ácidos orgánicos presentes son la mayor influencia en la selección de la microflora. Los microorganismos que pueden tolerar este pH son predominantemente hongos y levaduras, que habitualmente crecen a  $a_w \geq 0.8$ . (Silliker et al., 1980). Sin embargo, dentro de estos microorganismos, cabe mencionar a los xerófilos y osmófilos, que pueden crecer a valores menores: los primeros pueden crecer a  $a_w \geq 0.65$  y los segundos a  $a_w \geq 0.60$ . (Fennema, 1996). Como conclusión parcial de lo discutido, se podría inferir que una reducción de la actividad acuosa a valores de 0.6 sería suficiente para impedir el desarrollo de los microorganismos descriptos.

Ahora bien, enfocando nuestro análisis a las reacciones de deterioro de origen no microbiológico, en líneas generales, la máxima velocidad de la reacción de Maillard se encuentra para valores de actividad acuosa entre 0.6 y 0.8, en tanto que, las de origen enzimático y las de oxidación, presentan un crecimiento rápido para valores de  $a_w$  mayores a 0.4.

Las frutas deshidratadas (productos de la misma “clase” que los que se obtuvieron en este trabajo) se encuentran dentro del grupo de alimentos cuya  $a_w$  está comprendida entre 0.6 y 0.8, junto con cereales, harinas, mermeladas y jaleas, nueces y algunos quesos duros. En este rango de actividad acuosa no pueden crecer bacterias patógenas, mientras que sí, como se describió más arriba, puede tener lugar la proliferación de hongos (generalmente impedida en procedimientos industrializados, mediante el agregado de sustancias químicas como benzoato o sorbato -preservadores-).

Considerando la discusión anterior, y que los productos a base de manzana desarrollados en este trabajo fueron sometidos a tratamientos térmicos en diferentes etapas, sumado al bajo pH nominal de esta fruta, se estableció que la actividad acuosa del producto final quede circunscripta en un rango entre 0.50 y 0.55, con un valor objetivo de 0.5. Más aún, este rango coincide con el nivel de actividad acuosa de diferentes productos industriales presentes en el mercado que incluyen manzana deshidratada, cuya  $a_w$  se encuentra entre 0.33 y 0.59 (Tabla 3.1).

**Tabla 3.1** Información de productos comerciales que incluyen manzana deshidratada.

<b>Producto</b>	<b>Nombre comercial</b>	<b>Elaborador</b>	$a_w$	<i>H<sub>bs</sub></i> (kg agua/kg sólidos)	<b>Observaciones</b>
Alimento a base de copos de maíz, avena y arroz, azúcar, frutas y miel	Kellnes Müslix® tradicional	Kellog's	0.47	0.18	Cubos de manzana de color similar al cereal, con cáscara.
Alimento a base de Best Bran, almohaditas crujientes y crespines de cereal	Granola: Frutas y Fibra (ciruela, durazno y manzana)	3 Arroyos	0.33	0.11	Cubos de manzana con cáscara, de color similar a la manzana fresca.
Barra de cereales con manzana, reducida en calorías, azúcares y grasa	Cereal Mix Light	Arcor	0.49	0.09	Manzana muy integrada a la barra, los valores corresponden al producto completo.
Barra de cereales con manzana reducida 25% en calorías	Ser Pausa	Bagley	0.5	0.14	Los valores correspondientes a la manzana y al cereal por separado, son similares.
Barra de cereal crocante con manzana	Cerealitas	Kraft Foods	0.36	0.04	Manzana muy integrada a la barra, los valores corresponden al producto completo.
Alimento a base de cereales, manzana, damasco, pasas de uva y semillas de sésamo	Barras de cereales	Bell's	0.59	0.11	Manzana muy integrada a la barra, los valores corresponden al producto completo.

Por lo tanto, como se verá más adelante, la etapa última de deshidratación se llevó a cabo hasta obtener un alimento con dicha actividad acuosa, independientemente de los atributos de calidad. Es decir que, alcanzar tal valor de  $a_w$  fue condición necesaria y suficiente para obtener un producto microbiológicamente estable y, por ende, para finalizar el proceso de secado.

No obstante, el monitoreo de la actividad acuosa carece de fines prácticos durante el proceso de secado, ya que no existe una forma de medición continua, rápida y no

destruictiva. En este sentido, las curvas de equilibrio  $a_w$ - $Hbs$  permiten relacionar la actividad acuosa de un producto con su contenido de humedad (a una temperatura determinada y constante). Pero, nuevamente, la determinación de la humedad por métodos confiables requiere de la interrupción del proceso.

Ahora bien, sabiendo que en el secado la transferencia de materia consiste únicamente en la eliminación de agua y la consecuente pérdida de peso de la fruta ( $WL_s$ ), se puede decir que a cada valor de  $WL_s$  le corresponderá un valor de humedad (de equilibrio), y este valor de humedad estará unívocamente relacionado con un valor de  $a_w$ . Por lo tanto, se puede utilizar a la pérdida de peso como variable de monitoreo de la etapa de secado, resultando un proceso continuo, confiable y no destructivo.

En función de lo expuesto el objetivo de este capítulo fue comprender el comportamiento que tendrá este producto intermedio (el producto DO) en la etapa final de secado, y así determinar el punto final del proceso global mediante un parámetro práctico: la pérdida de peso.

Para ello se construyeron las curvas  $WL_s$ - $a_w$  correspondientes a la manzana DO bajo las condiciones planteadas en el capítulo anterior.

## 3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.2.1 Material osmodeshidratado y preparación de las muestras

Los ensayos de DO se realizaron por duplicado bajo las mismas condiciones y el mismo procedimiento experimental descritos en el Capítulo 2 (temperatura de DO, agentes osmóticos, concentración de las soluciones deshidratantes, tiempos de contacto fruta-solución, velocidad de agitación de la solución, relación fruta:solución).

Sobre una porción de cada lote deshidratado se determinaron la actividad acuosa y humedad (por triplicado) y los parámetros de monitoreo de la DO: pérdida de agua ( $WL_{DO}$ ) y ganancia de sólidos ( $SG_{DO}$ ). El sobrante se utilizó para realizar las curvas de secado correspondientes. El diseño experimental se muestra en la Figura 3.1.

### 3.2.2 Obtención de las curvas operativas de secado mediante microondas

La técnica seleccionada para extraer agua en la etapa siguiente de la DO fue la del secado por microondas, esta elección se hizo particularmente teniendo en cuenta que es la técnica de secado que se utilizará como etapa complementaria a la DO. De esta forma, los productos osmodeshidratados (durante diferentes tiempos) se secaron por microondas a

una potencia baja (160 W). Los cubos de manzana fueron dispuestos formando un anillo sobre una tarima plástica cilíndrica (de 10 cm de altura y 22 cm de diámetro) que encajaba sobre el plato giratorio del equipo de microondas. La cantidad de muestra por experiencia fue 23.50 +/- 1.10 g.

El equipo utilizado para este secado fue un horno de microondas doméstico (origen China, sin modificaciones), de marca Whirpool, modelo JT 359, cuyas dimensiones interiores son: alto 32,1 cm; ancho 52,9 cm y profundidad 45 cm. Este horno tiene la capacidad de funcionar combinando microondas con aire caliente (capacidad utilizada para el secado combinado analizado en esta tesis, descrito en el Capítulo 5).

Para la construcción de las curvas se establecieron intervalos de pérdida de peso entre 5% y 10% (por ejemplo, 5, 10, 15, etc., hasta 90%), una vez alcanzado el valor establecido, se detenía el proceso de secado y las muestras se dejaron enfriar en un recipiente cerrado a temperatura ambiente durante 30 minutos. La pérdida de peso se estableció por pesada directa utilizando una balanza de precisión 0.1 g (Denver Instruments XE-4100). Transcurrido este tiempo, todas las muestras se cortaron en pequeños trozos (para obtener un conjunto) y se realizaron tres mediciones de  $a_w$  y tres de humedad. Luego se informó el promedio de ambos parámetros calculados.

Este procedimiento se repitió para la manzana fresca y para cada producto correspondiente a los diferentes tiempos de DO (Ver Figura 3.1).

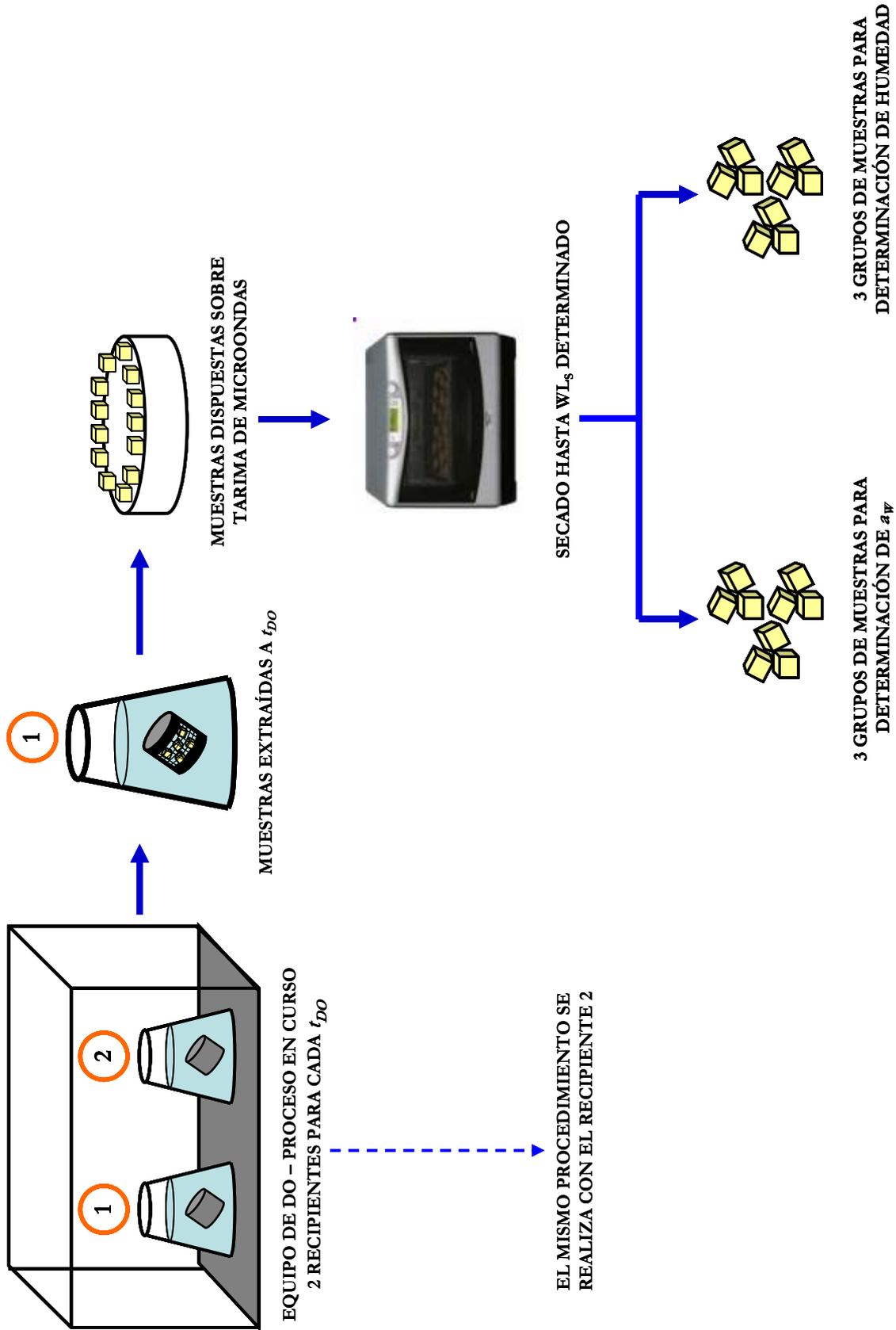


Figura 3.1 Diseño experimental para la obtención de curvas de secado.

### 3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tal como se vio en el Capítulo 2, independientemente del agente deshidratante utilizado, cuanto mayor es el tiempo de contacto fruta-solución, mayor es la cantidad de agua que se remueve del alimento (al menos durante el tiempo de DO analizado en este trabajo). Por lo tanto, cuanto más prolongada haya sido la DO, menor será la cantidad de agua a remover en una etapa de secado posterior para obtener el producto una actividad acuosa deseada.

Recordando que la operación de secado tiene como objetivo reducir el valor de  $a_w$ , este índice se podría usar para determinar la eficiencia del secado.

En este trabajo se propone introducir el concepto de *deshidratación efectiva*, entendiéndose que un proceso de secado es más efectivo cuando consigue la mayor reducción del  $a_w$  con menor pérdida de agua.

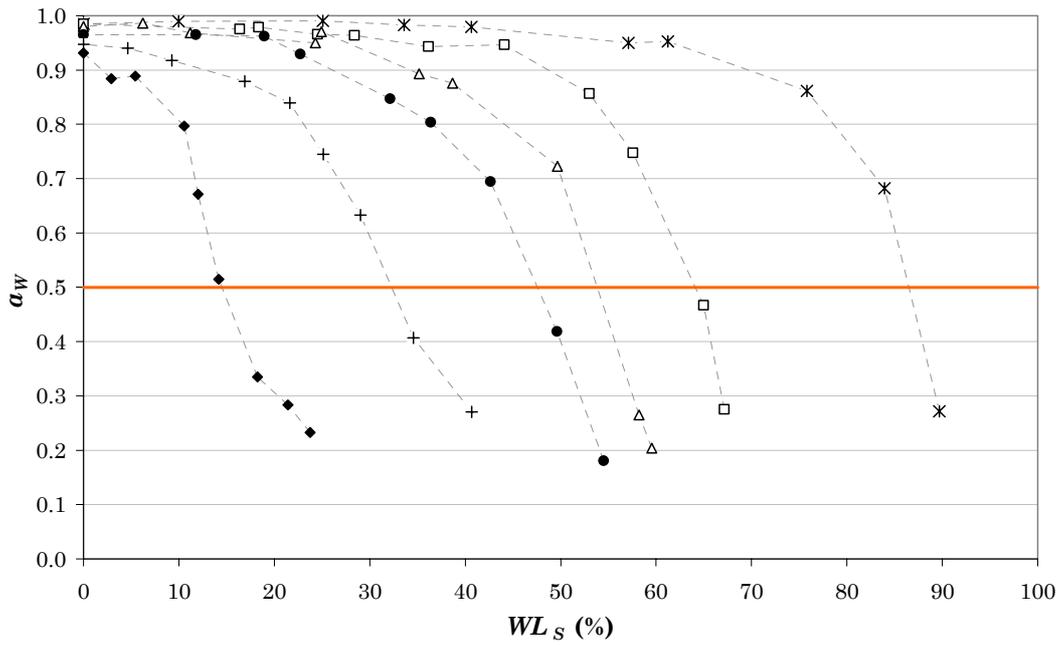
En la Fig. 3.2 se puede observar la respuesta de la actividad acuosa frente a la pérdida de agua durante la etapa de secado para el caso de la manzana deshidratada con solución de sacarosa de 69 °Brix.

Las curvas que describen esta relación ( $a_w - WL_s$ ), y que en este trabajo son consideradas y denominadas “Curvas operativas de secado”, son de tipo exponencial negativa y en ellas se pueden encontrar dos fases (Zhang et al., 2006):

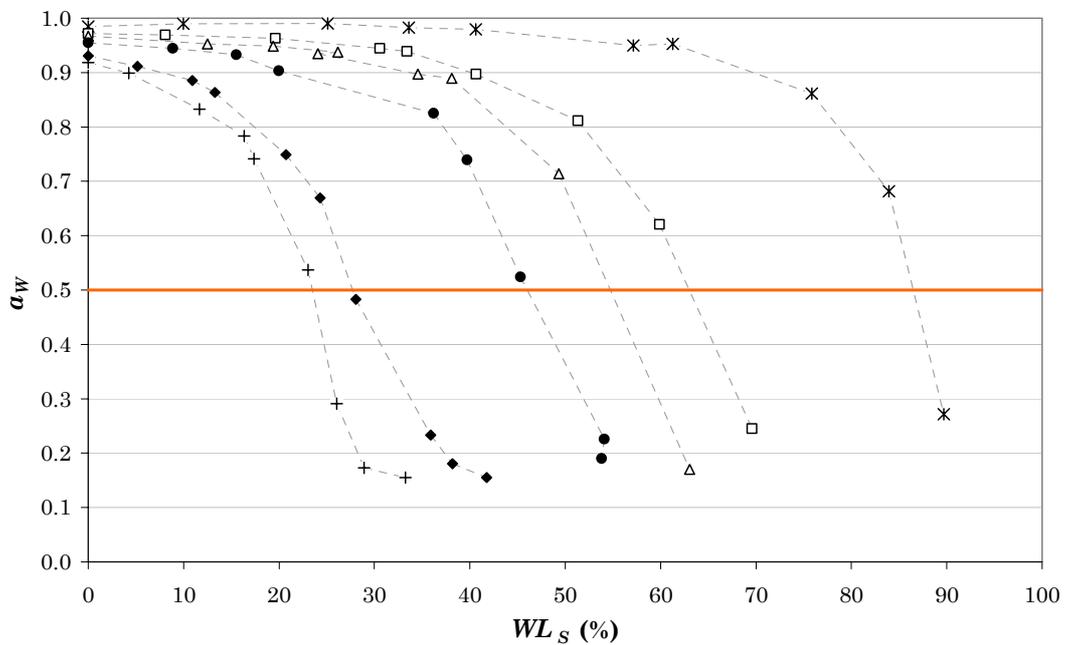
- Una primera *fase estacionaria* o *no efectiva* en la que el producto pierde agua pero no modifica significativamente su actividad acuosa.
- Y una segunda fase que se podría reconocer como *no estacionaria* o *efectiva* en la que se reconoce una relación de dependencia entre la actividad acuosa y la pérdida de agua.

Según esta curva operativa de secado ( $WL_s - a_w$ ), cuanto mayor fue el tiempo de contacto fruta-solución durante la etapa de DO más breve fue la fase estacionaria durante el secado o en otras palabras, cuanto mayor fue el  $t_{DO}$ , se necesitó menor pérdida de agua durante la etapa de secado para ingresar en la fase efectiva y, por lo tanto, comenzar a reducir la actividad acuosa.

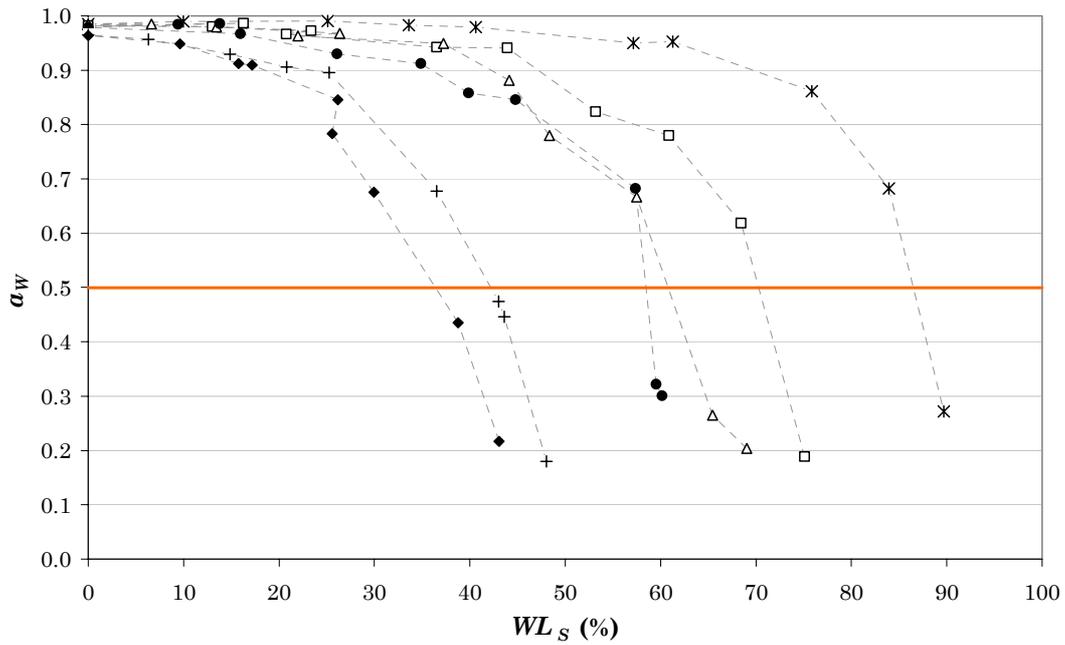
Lo mismo se puede observar para XIL47 (Figura 3.3), SAC47 (Figura 3.4) y AAPM69 (Figura 3.5).



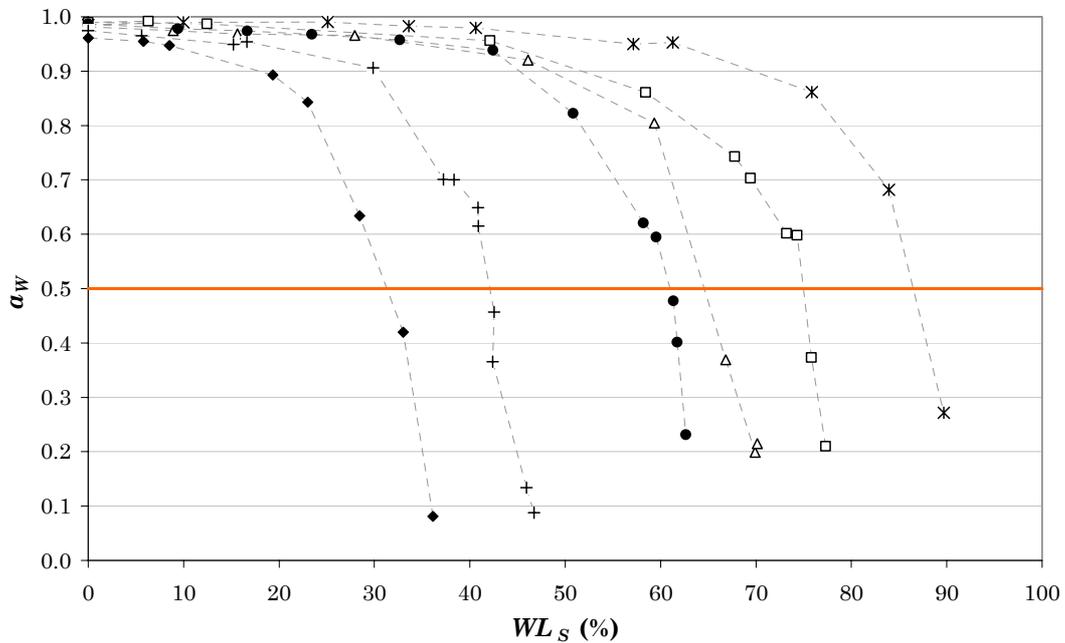
**Figura 3.2** Actividad acuosa en función de la pérdida de agua durante la etapa de secado a diferentes tiempos de DO, usando solución SAC69. (\* 0 h; (□) 1 h; (△) 2 h; (●) 4 h; (+) 12 h; (◆) 24 h. (Las líneas punteadas sólo son guía del ojo).



**Figura 3.3** Actividad acuosa en función de la pérdida de agua durante la etapa de secado a diferentes tiempos de DO, usando solución XIL47. (\* 0 h; (□) 1 h; (△) 2 h; (●) 4 h; (+) 12 h; (◆) 24 h. (Las líneas punteadas sólo son guía del ojo).

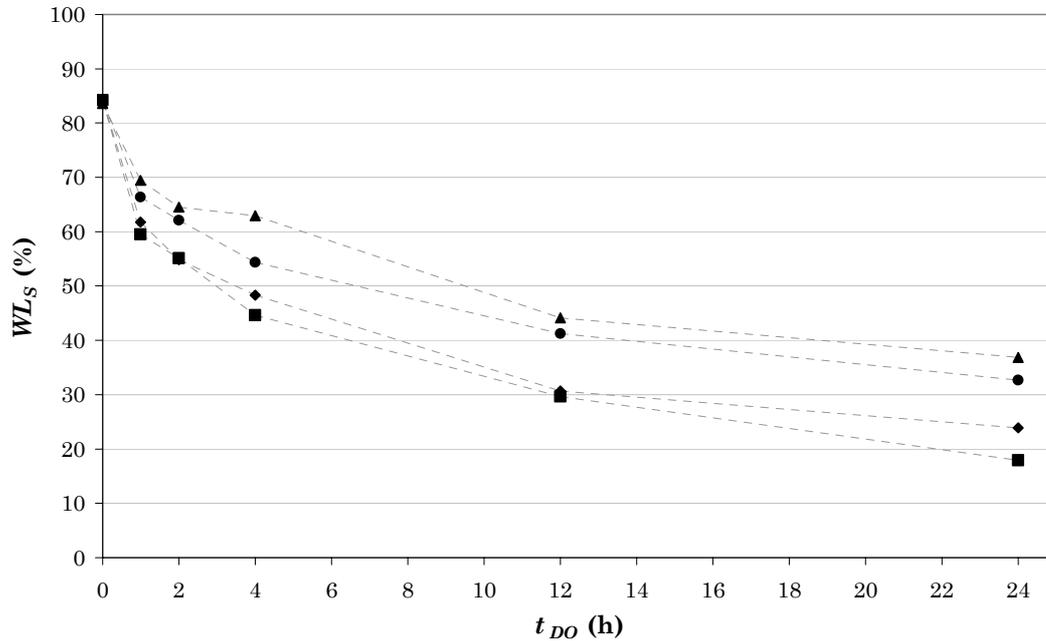


**Figura 3.4** Actividad acuosa en función de la pérdida de agua durante la etapa de secado a diferentes tiempos de DO, usando solución SAC47. (\* ) 0 h; (□ ) 1 h; (△ ) 2 h; (● ) 4 h; (+) 12 h; (◆) 24 h. (Las líneas punteadas sólo son guía del ojo).



**Figura 3.5** Actividad acuosa en función de la pérdida de agua durante la etapa de secado a diferentes tiempos de DO, usando solución AAPM69. (\* ) 0 h; (□ ) 1 h; (△ ) 2 h; (● ) 4 h; (+) 12 h; (◆) 24 h. (Las líneas punteadas sólo son guía del ojo).

En la Figura 3.6 se muestran los diferentes valores de  $WL_S$  obtenidos al final del proceso de secado, es decir, es el valor de  $WL_S$  correspondiente a  $a_w = 0.5$ .



**Figura 3.6**  $WL_S(\%)$  correspondiente a  $a_w=0.5$  en función del tiempo de DO ( $t_{DO}$ ), para los diferentes agentes osmóticos: SAC69 (■), XIL47 (◆), SAC47 (●) y AAPM69 (▲).

De la apreciación de la Figura 3.6, se podría sugerir que SAC69 y XIL47 provocan un comportamiento diferente que SAC47 y AAPM69 durante una etapa posterior de secado. Y en ese caso, en términos de la transferencia de materia durante el secado, cabe preguntarse si resulta indistinto deshidratar con SAC69 o con XIL47 por un lado, y si resulta indistinto deshidratar con SAC47 o con AAPM69, por otro lado.

Para responderlo, se realizó un análisis de varianza a partir de los datos presentados en la Tabla 3.2.

Los resultados obtenidos de este estudio, para un nivel de confianza del 95% ( $\alpha=0.05$ ), referidos a la eliminación de agua, fueron:

- Las soluciones SAC69 y XIL47 promueven  $WL_S$  similares para procesos de DO de hasta 4 horas de duración.
- Las soluciones SAC47 y AAM69 solamente provocan comportamientos similares de las muestras en el secado, si la duración de la DO fue de 1 hora.
- En tanto que para tiempos de DO  $\geq 4$  h, todas las soluciones inducen respuestas diferentes durante el secado.

**Tabla 3.2** Valores de  $WL_S$  necesarios para alcanzar el valor  $a_W = 0.5$  (promedio de 4 experiencias; entre paréntesis se muestra la desviación estándar).

$t_{DO}(h)$	SAC69	XIL47	SAC47	AAPM69
0	84.23 (1.50)	84.23 (1.50)	84.23 (1.50)	84.23 (1.50)
1	60.79 (1.20)	61.75 (1.33)	66.36 (2.35)	69.44 (1.14)
2	55.12 (1.28)	54.83 (1.45)	62.09 (0.38)	64.55 (0.21)
4	44.62 (0.40)	48.31 (2.29)	54.38 (0.69)	60.49 (0.18)
12	29.68 (0.80)	30.69 (2.89)	41.23 (0.61)	44.11 (0.75)
24	17.90 (0.63)	23.87 (1.47)	32.65 (2.08)	36.88 (0.78)

### 3.4 CONCLUSIONES

En este Capítulo se identificó a la actividad acuosa como la variable crítica del proceso y se fijó como valor de diseño  $a_W = 0.5$ , conociendo que en esas condiciones está inhibida la proliferación microbiológica y que, por otra parte, es un valor similar al de los productos comerciales de aplicación o forma de consumo semejantes.

De esta forma, se determinó que el punto final de la etapa de secado se consigue una vez que el producto alcanza un valor de  $a_W = 0.5$ .

Además, se construyeron las curvas operativas de secado correspondientes a cada  $t_{DO}$  y a cada soluto. A partir de estas curvas es posible determinar el punto final del proceso de secado a través de la pérdida de peso, valor con el que se corresponde un único valor de  $a_W$ . Es decir que el monitoreo del secado es continuo y en consecuencia el monitoreo de  $a_W$  es continuo también. Más aún, este procedimiento, permite monitorear de manera sencilla y rápida (indirectamente) una variable de medición más compleja como el  $a_W$ .

Adicionalmente, para evaluar el efecto del tiempo de DO y de la naturaleza de la solución deshidratante sobre la pérdida de agua durante el secado, se pudo ver que:

- Se obtienen valores similares de  $WL_S$  para SAC69 y XIL47 si la DO dura hasta 4 horas.
- Se obtienen valores similares de  $WL_S$  para SAC47 y AAPM69 si la DO dura hasta 1 hora.

Es decir que, si la DO se extiende por más de 4 horas, todas las soluciones utilizadas, promueven un comportamiento diferente durante una etapa posterior de secado, pero si la

DO es corta, entonces resulta indistinto deshidratar con SAC47 o AAPM69 para  $t_{DO} \leq 1$  h y resulta indistinto deshidratar con SAC69 o con XIL47 si  $t_{DO} \leq 4$  h.

Al momento de diseñar el proceso global, será necesario definir la duración de la DO y seleccionar la solución deshidratante. Con los resultados obtenidos en este análisis de varianza, que indica que a tiempos cortos ( $t_{DO} \leq 4$  h.) en términos de transferencia de materia es similar utilizar SAC69 o XIL47, entonces, el criterio de selección debe basarse en otros factores como la calidad del producto final o el costo de la solución, entre otros.

## CAPÍTULO 4

# PROCESO COMBINADO: DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA Y SECADO POR MICROONDAS

### 4.1 INTRODUCCIÓN

El secado es uno de los métodos más antiguos de preservación de alimentos y posiblemente reúna a las tecnologías más estudiadas de la industria alimentaria. Se lo puede definir como una operación de transferencia simultánea de calor y materia durante la que se evapora el agua del material secado hacia una corriente gaseosa no saturada, reduciendo así la actividad acuosa del alimento (Khraisheh et al., 1997). El objetivo básico del secado es la remoción de agua hasta un nivel en el que se inhibe la proliferación microbiológica, consecuentemente se obtienen productos de mayor vida útil y menor volumen que los frescos. Al mismo tiempo, dependiendo de la técnica de secado y del aspecto y la humedad final, aumentan las posibilidades de desarrollo de productos diferenciados para aplicaciones específicas. Todas estas características impulsan la producción y comercialización de alimentos deshidratados.

A nivel industrial, el secado convectivo -también llamado secado convencional o secado por aire caliente (SAC)- es el método más utilizado para deshidratar alimentos. Con esta tecnología el secado transcurre a alta temperatura (60-80 °C) y se requieren tiempos largos para alcanzar el contenido de humedad deseado.

Dicha combinación tiempo-temperatura provoca la vaporización de los compuestos volátiles y por lo tanto la pérdida significativa de aroma y sabor (*flavour*). Además, los alimentos SAC, comúnmente tienen asociada la alteración de color y pérdida de nutrientes, la disminución de la densidad y una baja capacidad de rehidratación.

El resultado es un producto con signos de daño térmico directamente proporcionales a la temperatura y a la duración de la exposición (Lin et al., 1998).

Por otro lado, a medida que progresa el secado, el agua se mueve hacia la superficie (arrastrando sólidos solubles) a una velocidad de difusión menor que la velocidad de evaporación del agua superficial, por esta razón, las capas externas se secan más rápidamente dando lugar a la formación de una “costra superficial” y al consecuente encogimiento. Estos dos factores (costra y encogimiento) constituyen una resistencia al transporte de materia (dificultan el transporte de agua) y a la transferencia de calor debido a la baja conductividad térmica de la costra formada (Feng & Tang, 1998; Nijhuis et al., 1998).

Como ya fue discutido en el Capítulo 2, asociar una etapa previa de DO al SAC, permite obtener productos de mejor calidad que sin pretratamiento, sin embargo, este proceso combinado no es lo suficientemente flexible.

Por ejemplo: recordando que la DO permitiría remover agua del alimento provocando menor daño térmico que el SAC, resultaría lógico diseñar un proceso combinado en el que la mayor cantidad de agua se remueva durante la DO y la menor durante el secado. De esta forma, se maximizaría la calidad del producto. Sin embargo, la mayor pérdida de agua durante la DO, tiene asociado -generalmente- el mayor ingreso de sólidos, que forman la costra. Esta costra (pobre en agua y rica en sólidos), continúa secándose durante una etapa de SAC y disminuye, aún más, la conductividad del alimento. Esto se traduce en secados más largos o a mayor temperatura, con los consiguientes efectos sobre la calidad del producto, para alcanzar la actividad acuosa objetivo. Es decir que la ductilidad de la combinación DO-SAC está limitada en función de la calidad del producto final.

De hecho, los productos DO-SAC han presentado durante el secado coeficientes de difusión de agua ( $D_{ef}$ ) menores a los de la fruta sin DO; algunos ejemplos son: manzana (Nieto et al., 1998), ananá (Rahman & Lamb, 1991), banana (Sankat et al., 1996; Fernandes et al., 2006) y arándanos (Venkatachalapathy & Raghavan, 1998). También se comprobó que, cuanto mayor fue la ganancia de sólidos durante la DO, mayor fue la resistencia interna a la difusión de agua en el secado (a mayor  $SG_{DO}$ , menores  $D_{ef}$ ). En conjunto, la salida de agua (rápida) y los sólidos impregnados, promoverían la cristalización en las capas superficiales, dificultando la salida de agua (este hecho también se ha manifestado a través de aumentos en la dureza de las muestras DO-SAC) (Mandala et al., 2005).

Por las razones descritas, y más allá del pretratamiento que se le acople, el SAC es un proceso de baja eficiencia energética: entre el 25 y el 50% de la energía entregada al alimento se utiliza para la remoción de agua (Chua et al., 2001).

En estos términos, la búsqueda a nivel industrial de un proceso de secado eficiente y que permita conservar la calidad de los alimentos ha llevado al desarrollo de tecnologías alternativas dentro de las que se encuentran el secado por vacío, la liofilización y/o la dehidrocongelación. Sin embargo, en las dos primeras técnicas la velocidad de remoción de agua es baja (especialmente en el período de velocidad de secado decreciente) y, en consecuencia los tiempos de proceso son largos. La dehidrocongelación, por su parte, requiere que el producto se mantenga congelado.

Las microondas, no obstante, ofrecen la posibilidad de acortar los tiempos de secado y obtener productos de mejor calidad (Mousa & Farid, 2002; Zhang et al., 2006).

En el secado por microondas (MO), las diferencias de presión de vapor entre la superficie y el interior del alimento proveen la fuerza impulsora para la transferencia de materia (Maskan, 2000b). Las microondas son ondas electromagnéticas en un rango de frecuencia de 300 MHz a 300GHz, dentro de este rango se utilizan -para los fines del secado- dos bandas bien definidas: 915 y 2450 MHz.

El principio básico del secado por microondas es la rotación de las moléculas bipolares del alimento. El agua pertenece a esta clase de moléculas, capaces de rotar bajo la influencia de un campo magnético que cambia de dirección muy rápidamente (millones de veces por segundo), y por su naturaleza, estos dipolos tratan de alinearse en la dirección del campo. La energía electromagnética se convierte en energía cinética de las moléculas de agua y luego en calor cuando colisionan con otras vecinas, es decir que se genera calor por fricción. Por lo tanto, la energía de las microondas no es una forma de calor, sino que el calor es un efecto secundario resultante de la interacción de un campo electromagnético oscilante con un material (Schiffmann, 1995).

Las frutas y vegetales son susceptibles al secado por MO debido a su importante contenido de agua (50-97%) y absorben energía electromagnética proporcionalmente a este contenido de humedad. Otros componentes como proteínas y lípidos también absorben energía de las microondas pero en menor medida que el agua (Mudgett & Westphal, 1989).

Durante un proceso de secado por MO es posible diferenciar tres etapas (Zhang et al., 2006):

1. Un período de precalentamiento durante el cual la energía electromagnética se convierte en energía térmica dentro del producto, y en consecuencia, aumenta la temperatura del alimento con el tiempo. Una vez que la presión de vapor de agua en el alimento es mayor que la del medio, el material comienza a perder humedad pero a una velocidad relativamente baja.

2. Un período de secado rápido en el que la temperatura permanece estable y la energía térmica obtenida a partir de las microondas se usa para la evaporación de agua.
3. Un período de velocidad de secado decreciente, cuando la humedad local se reduce hasta un punto en el cual la energía térmica obtenida de las microondas es menor a la necesaria para la evaporación. Por esta razón, la temperatura local podría crecer por encima de la temperatura de ebullición del agua, y así este sobrecalentamiento comprometería la calidad del producto.

El período de precalentamiento es relativamente corto (en el secado por MO) y, en resumen, la mayor eliminación de agua ocurre durante la segunda etapa (Bouraoui, et al., 1994).

En numerosos trabajos se comprobó que el secado por MO es más rápido, más uniforme y más eficiente en términos energéticos que el SAC. Las microondas pueden penetrar fácilmente en el interior del alimento y ser absorbidas directamente por el agua. Esta absorción veloz de energía causa una evaporación rápida del agua, generando un flujo de vapor hacia el exterior (Feng et al., 2001). Es más, las microondas son capaces de atravesar fácilmente una capa de sólidos no conductora como la formada durante una etapa preliminar de DO y calentar al alimento a través de las zonas más húmedas (Nijhuis et al., 1998). La interacción directa con el alimento hace que los costos de operación sean menores que en el SAC, ya que la energía de las MO se transforma (mayormente) en calor dentro del producto, no en las paredes del horno o en la atmósfera y, por lo tanto, las pérdidas de calor hacia los alrededores son menores. La reducción de los tiempos de secado se traduce en un aumento de la capacidad productiva o bien, frente a una misma capacidad es posible diseñar equipos más compactos que los utilizados para el secado convencional y, en consecuencia, es menor la superficie instalada (Mullin & Bows, 1993).

En cuanto a la calidad del producto final, la salida rápida de vapor contribuiría a evitar el colapso estructural (encogimiento) comúnmente observado durante el SAC. Por ende los productos obtenidos mediante MO presentarían mejores características de rehidratación que los obtenidos por el secado convencional (Al-Duri & McIntyre, 2005). Otra ventaja de las MO respecto del SAC, es que disminuiría el deterioro de color a nivel superficial, ya que las máximas temperaturas se producen en el centro de las piezas (Maskan, 2000b).

Sin embargo, el secado con MO requiere un diseño cuidadoso del proceso, ya que si no se realiza apropiadamente, se obtienen productos de mala calidad (Yongsawatdigul & Gunasekaran, 1996). Por ejemplo, aún no se cuenta con un método para monitorear o controlar la distribución del campo electromagnético. Es más, un defecto inherente a la tecnología de microondas es el calentamiento no homogéneo debido a la distribución espacial no uniforme del campo dentro de la cavidad de secado. No obstante, esta desventaja disminuye marcadamente si el producto se mantiene en movimiento, asegurando que diferentes las partes del alimento reciban una intensidad promedio del campo magnético durante el secado (Feng & Tang, 1998).

La uniformidad del secado por microondas depende de varios factores que pueden dividirse en dos grupos: efectos de la cavidad y efectos de interacción con el producto (Kelen et al., 2006; Vadivambal & Jayas, 2007).

Los primeros se refieren a la forma de la cavidad, ubicación de la fuente de MO y a la ubicación de los ventiladores que distribuyen las ondas. Los factores de interacción con el producto incluyen al espesor, forma y tamaño de la carga y las propiedades dieléctricas del material, que son las claves del secado por MO. Estas propiedades describen el comportamiento de un material frente a un campo electromagnético y son:

- La constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ): es una medida de la habilidad del material para acoplarse con la energía de las microondas.
- El factor de pérdida ( $\epsilon''$ ): es una medida de la capacidad del material para calentarse a partir de la energía que absorbe de las microondas.

O, de otra forma,  $\epsilon'$  indica la capacidad del material para almacenar energía electromagnética y  $\epsilon''$  está relacionado con la absorción y disipación de la energía electromagnética del campo (de los Reyes et al., 2007).

Sólo un material dieléctrico ideal puede absorber y disipar energía electromagnética sin absorberla. Los alimentos no son dieléctricos ideales y por lo tanto, bajo un campo magnético absorben parte de la energía; así, un alimento con bajo  $\epsilon''$  necesita de un campo magnético intenso para aumentar su temperatura y en el otro extremo, materiales con alto  $\epsilon''$  disipan la energía principalmente en la superficie, es decir que se absorbe toda la energía en las capas más externas.

A su vez, para vincular ambas propiedades, existe una tercera llamada espesor de penetración ( $D_p$ ) que representa la distancia desde la superficie a la cual el 63% de la

energía es disipada. Un descenso brusco de su valor implicaría absorciones altas de energía en un volumen pequeño, y por lo tanto, el deterioro de la calidad del alimento.

El contenido de agua es la variable que más afecta a las propiedades dieléctricas: a mayor humedad habrá mayor absorción de energía, entonces mayor generación de calor y mayor evaporación de agua.

Trayendo nuevamente a la DO a nuestro terreno de análisis, se demostró que la incorporación de sólidos al alimento aumenta el factor de pérdida,  $\epsilon''$ , respecto al producto fresco, permitiendo un mayor poder de absorción por unidad de volumen. Este efecto minimiza la reducción de  $\epsilon'$  (y por lo tanto, la disminución en la capacidad para almacenar energía) que tiene lugar durante la DO debido a la pérdida de agua. Además, en el caso de soluciones de sacarosa, se evita la disminución brusca del espesor de penetración (de los Reyes, 2007).

Ergo, la DO con azúcares puede aumentar la eficiencia de absorción de energía durante el secado por MO (menor consumo energético) y obtener productos de mejor calidad.

En cuanto a la aplicación de las microondas en el secado de frutas y vegetales, son varios los trabajos que se encuentran en la literatura. Esta técnica se ha usado en secado de manzana (Contreras et al., 2005; Funebo & Ohlsson, 1998; Bilbao-Sainz et al., 2005), papa (Bouraoui et al., 1994; Khraisheh et al., 1997), zanahoria (Jia et al., 2003; Changrue et al., 2008), kiwi (Maskan, 2001), hongos (Funebo & Ohlsson, 1998), espárrago (Nindo et al., 2003), durazno (Wang & Sheng, 2006), frutilla (Changrue et al., 2008), banana (Maskan, 2000b), ajo (Sharma & Prasad, 2001) y tomate (de los Reyes et al., 2007).

En la tabla 4.1 se presentan algunas otras aplicaciones de las microondas en escala industrial y otras en camino de implementación a gran escala (Nijhuis et al., 1998).

**Tabla 4.1.** Resumen de algunas aplicaciones industriales de las microondas. Escala Industrial (I), Escala Piloto (P).

<b>Producto</b>	<b>Detalles del proceso</b>	<b>Escala</b>
Panceta	Pre-cocción	I
Piezas de pollo	Con aire caliente	P
Yema de huevo	Con energía infrarroja	I
Vegetales	Con aire caliente o aplicación de vacío	I
Cebolla	Con aire caliente	I
Rodajas de papa	Con aire caliente	I
Papas fritas	Pre-secado	P
Chips de papa	Seguida por aire	I
Pasta	Con aire caliente	I
Miga de pan	Horneado, secado	I
Arroz	Con aire caliente	I
Snacks	Puffing	I
Granos, maní	Por aplicación de vacío	P
Cacao, café	Tostado	I
Galletitas	Post-horneado	I
Alimento para animales	Con extrusión previa	I

Asimismo se pueden encontrar revisiones de literatura que dan cuenta de los usos del secado por microondas y de la implementación de DO seguido de microondas en Nijhuis et al. (1998), Vadivambal & Jayas (2007), Zhang et al. (2006) y Venkatesh & Raghavan (2004).

Teniendo en cuenta las ventajas del secado por microondas respecto del secado convencional y su potencial, en esta tesis se eligió al secado por MO como segunda etapa del proceso combinado.

Conjuntamente, se resolvió abordar el estudio de un proceso combinado formado exclusivamente por DO y MO. En la mayor parte de la literatura citada, se utiliza al secado por microondas como técnica de asistencia al SAC, debido a que la utilización de las MO como tecnología de secado sería costosa en comparación con el SAC. Sin embargo, una de las hipótesis de este trabajo se basa en que la incorporación de una etapa previa de DO, exige remover menor cantidad de agua durante el secado (en comparación con la fruta fresca) y en consecuencia, permite reducir los tiempos y/o la potencia de MO. Definitivamente, una segunda etapa con menor demanda energética (tiempo o potencia), se

traduce en un aumento de la calidad global de los productos (color, propiedades mecánicas, capacidad de rehidratación) y del caudal de producción (Prabhanjan et al., 1995; Kostaropoulos & Saravacos, 1995; Funebo & Ohlsson, 1998).

Finalmente, el objetivo puntual de este capítulo fue estudiar el proceso combinado DO-MO, analizando la cinética de secado de los productos DO y la influencia de las variables operativas de ambas etapas sobre los parámetros de proceso y calidad.

## **4.2 MATERIALES Y MÉTODOS**

La deshidratación osmótica se realizó bajo las mismas condiciones planteadas en los Capítulos 2 y 3. El secado por microondas posterior, se realizó utilizando diferentes niveles de potencia: 160, 350, 500 y 650 W (potencias preestablecidas en el equipo). La carga de muestras secadas fue 23.50 +/- 1.10 g (cantidad similar a la descrita en el Capítulo 3).

Según la rutina descrita en el Capítulo 3, la evolución del secado se monitoreó a través del peso de las muestras, interrumpiendo el secado a diferentes intervalos de tiempo.

Aquí se utilizaron las curvas  $a_w-WL_s$  estudiadas en el Capítulo 3, para determinar el punto final del secado. Es decir, una vez alcanzada la pérdida de peso objetivo (unívocamente relacionada con la actividad acuosa objetivo,  $a_w = 0.5$ ), se interrumpió el secado y las muestras se dejaron enfriar en un recipiente cerrado a temperatura ambiente, durante 30 minutos. Sobre estos productos ya sometidos a DO seguida de MO, se analizaron (de igual forma que en los capítulos anteriores) color y propiedades mecánicas y se determinaron su contenido de humedad (en base húmeda y en base seca) y su actividad acuosa. El diseño experimental del secado combinado se muestra en la Figura 4.1.

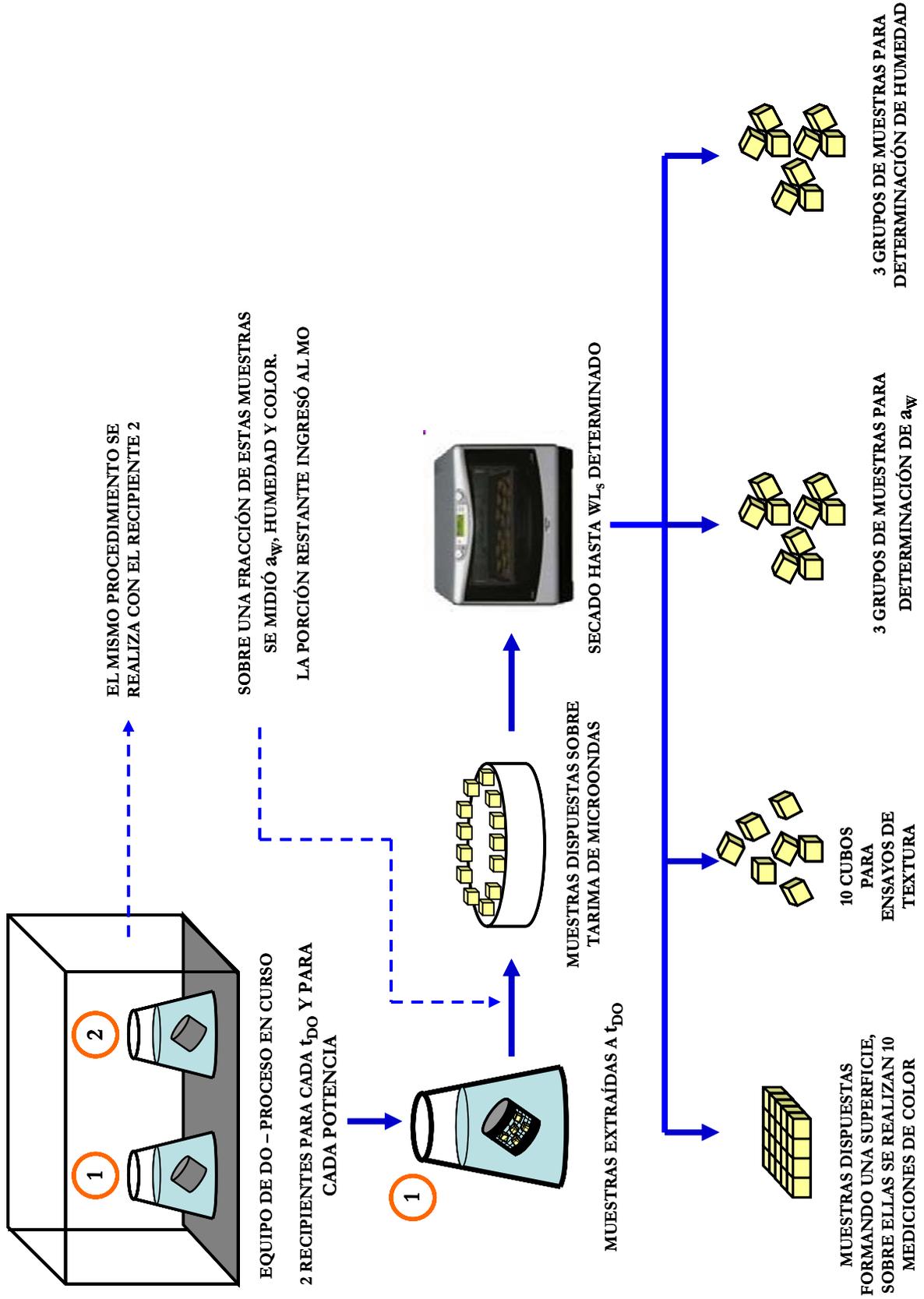


Figura 4.1 Diseño experimental del secado combinado.

## 4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.3.1 Transferencia de materia

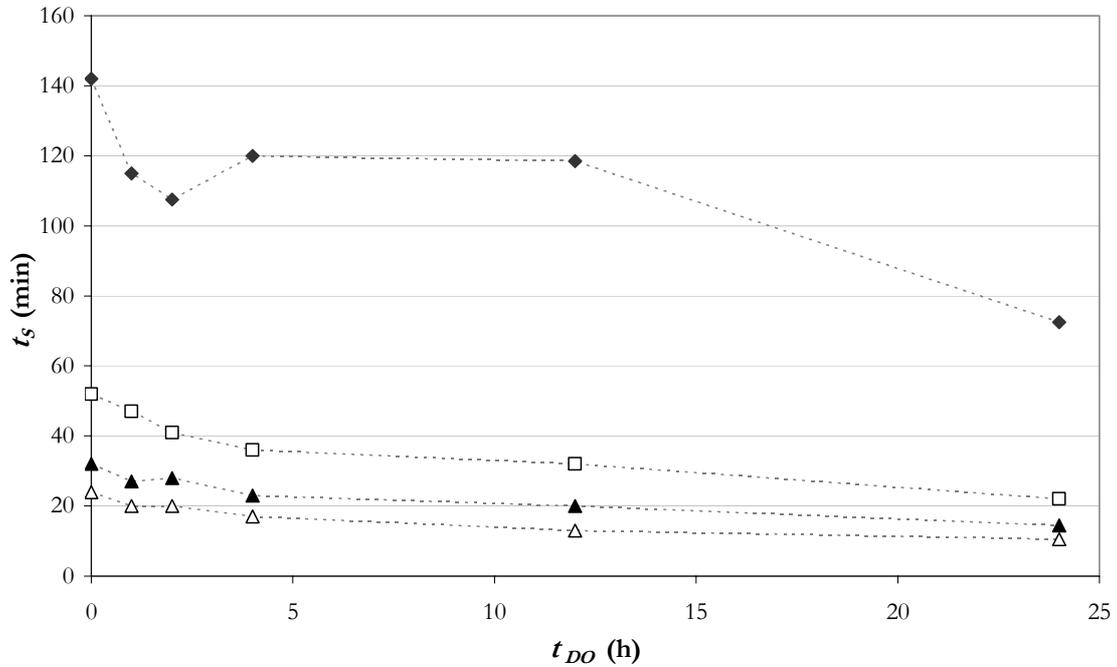
En la Figura 4.2 se analiza la variación de los tiempos de secado correspondientes a SAC69, en función del tiempo de DO y de la potencia de MO utilizada, obtenidos teniendo en cuenta la condición final establecida para el proceso:  $a_w = 0.5$ . Se observa que cuanto mayor fue la potencia utilizada, menor fue el tiempo de secado requerido, para todo  $t_{DO}$ . También que, en líneas generales, cuanto más prolongada fue la DO, más corta fue la etapa de secado. Esto es esperable, considerando que para alcanzar el valor de  $a_w$  objetivo, la DO y el secado participan como etapas complementarias, es decir que: si se removió gran cantidad de agua durante la DO, poca es la que se debió remover durante el secado.

Sin embargo, el secado a la potencia más baja (160 W) merece un análisis particular: en este caso el tiempo de secado disminuyó con el tiempo de osmodeshidratación hasta  $t_{DO} = 2h$ , aumentó hacia las 4 horas, luego permaneció prácticamente constante hasta las 12h y por último, disminuyó hacia el final del proceso (alcanzando los menores tiempos de secado en esa condición).

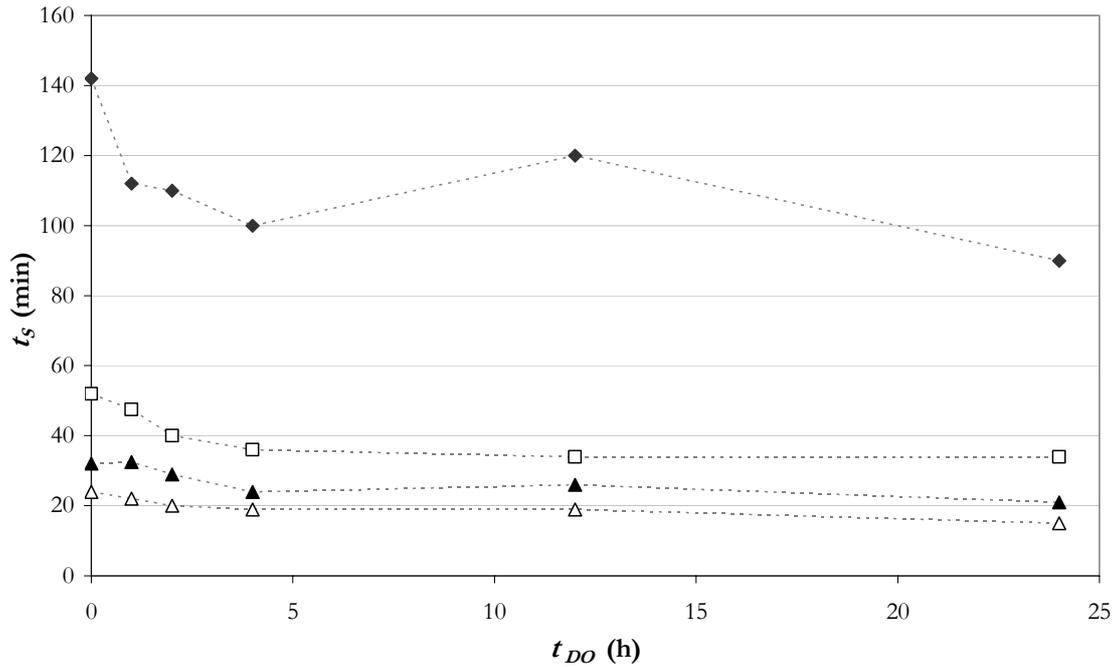
Este comportamiento se podría atribuir al desarrollo de una “costra” sobre las muestras, que se originó durante la DO como consecuencia de la impregnación de sólidos, los que cristalizarían en las capas más externas durante el secado e impedirían la salida del agua. Tal como se describió en el Capítulo 2, la mayor incorporación de sólidos se registró a las 4 horas de DO, y a partir de aquí permaneció constante, es decir que la costra se habría consolidado definitivamente a las 4 horas y por esta razón resultaría más difícil extraer agua entre las 2 y las 4h. El desarrollo de dicha costra es característico de la DO y fue descrito en numerosos trabajos al quedar en evidencia durante una ulterior etapa de secado, ya sea por modificar la respuesta de los tiempo de secado o las características fisicoquímicas del alimento, como propiedades mecánicas y color (Mandala et. al., 2005; Prothon, 2001; Raoult-Wack, 1994).

No obstante, entre las 12 y las 24 horas de DO, se removió en el pretratamiento una importante cantidad de agua de la fruta y restaría extraer una menor cantidad en la segunda etapa. Por lo que, más allá de la formación de la costra, el secado es más corto porque la cantidad de agua a quitar es menor y por otro lado, porque la estructura presentaría un deterioro mayor que permitiría remover más fácilmente el agua, venciendo la resistencia impuesta por la costra presente (esta observación acerca del deterioro estructural fue descrita mediante las micrografías, Capítulo 2).

Para potencias mayores de secado, el tiempo de secado tendió a disminuir para tiempos crecientes de DO; por lo que se puede inferir que el proceso de formación de costra resultaría lento en comparación con la velocidad de salida de agua, o bien, que estos niveles de potencia generarían una presión de vapor mayor, que vencería la resistencia de la costra.



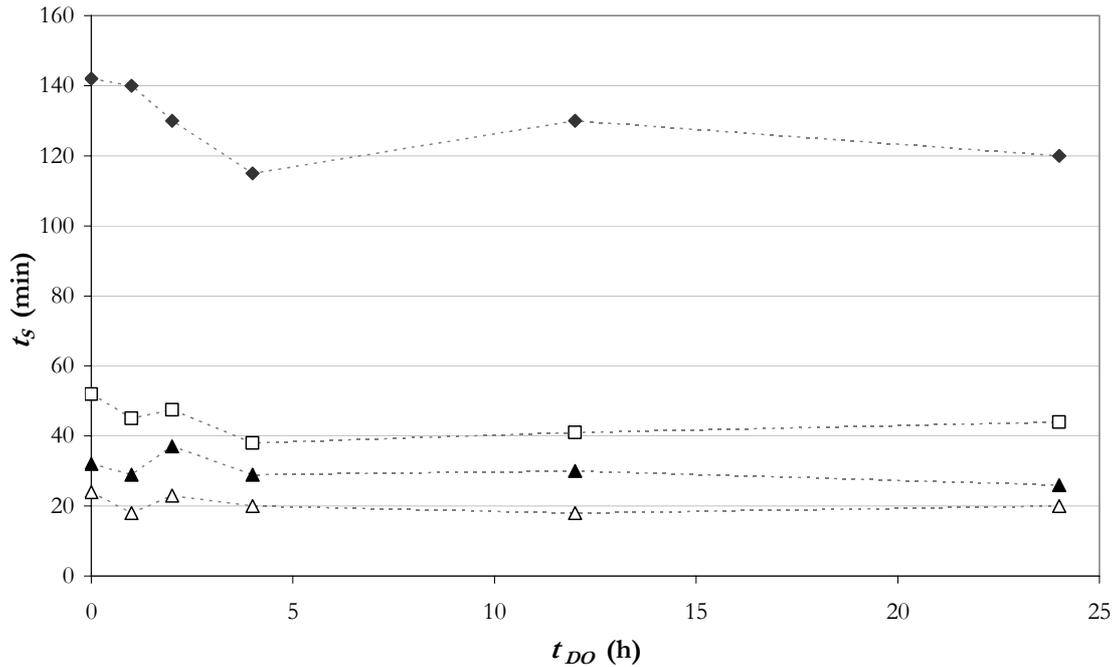
**Figura 4.2** Tiempo de secado ( $t_s$ ) en función del tiempo de DO. Solución deshidratante: SAC69. (◆) 160 W, (□) 350 W; (▲) 500 W; (△) 650 W.



**Figura 4.3** Tiempo de secado ( $t_s$ ) en función del tiempo de DO. Solución deshidratante: SAC47. (◆) 160 W, (□) 350 W; (▲) 500 W; (△) 650 W.

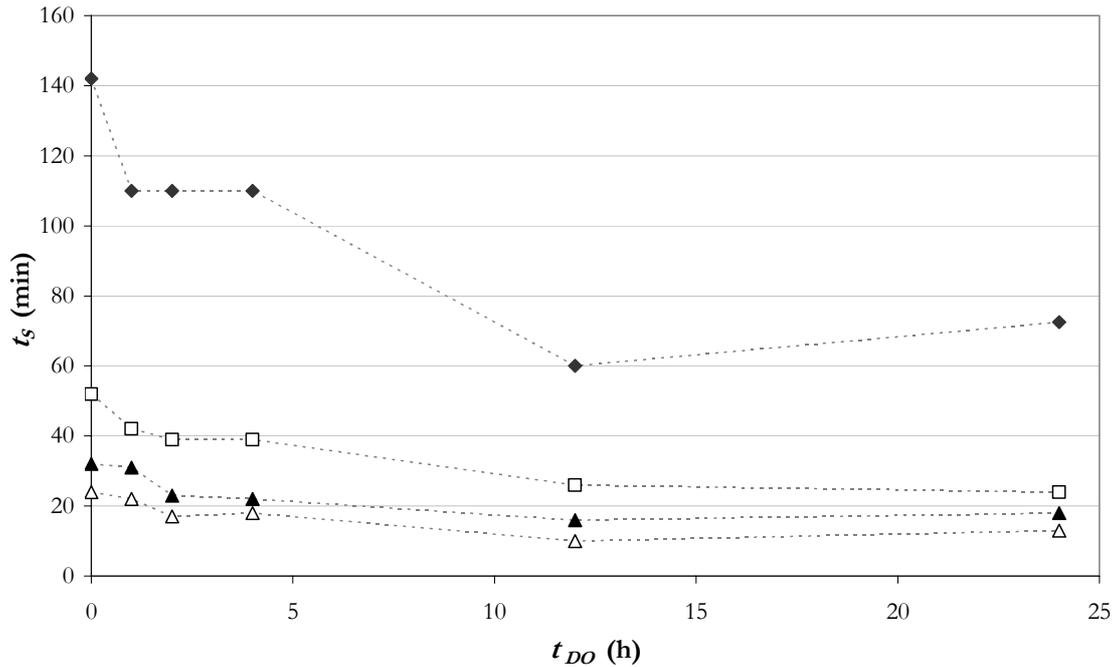
El secado de muestras DO con SAC47 a la potencia más baja (Figura 4.3) presentó un comportamiento similar al de SAC69, pero el aumento del tiempo de secado tuvo lugar a partir de las 4 horas (y hasta las 12 h de DO), cuando habría ocurrido la consolidación de la costra.

Complementariamente, una observación similar se realizó en el Capítulo 2 donde la formación de la costra se manifestó a través de la evolución de la ganancia de sólidos (creciente hasta las 4 h), de las propiedades mecánicas (adhesividad) y del análisis microscópico: entre las 0 y las 4 h se consolidaría la costra y aumentarían los tiempos de secado a partir de aquí.



**Figura 4.4** Tiempo de secado ( $t_s$ ) en función del tiempo de DO. Solución deshidratante: AAPM69. ( $\blacklozenge$ ) 160 W, ( $\square$ ) 350 W; ( $\blacktriangle$ ) 500 W; ( $\triangle$ ) 650 W.

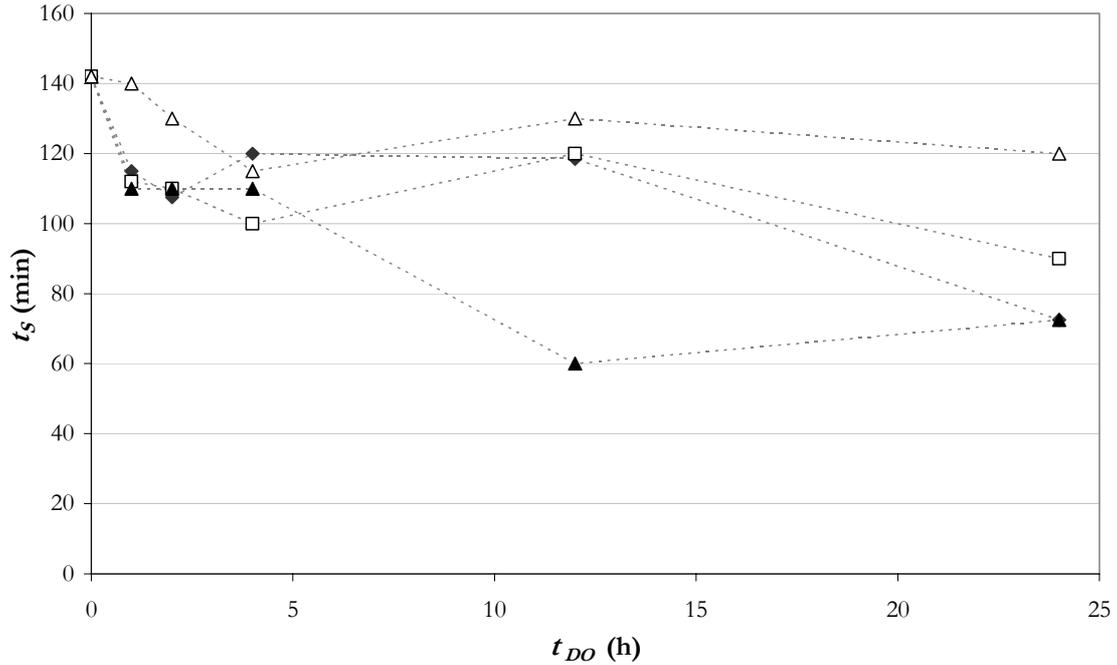
Para el caso de AAPM69 (Figura 4.4) las observaciones son similares a las correspondientes a SAC47. Para la menor potencia, la resistencia de la costra fue máxima a las 12 h de DO, lo que se condice con las observaciones microscópicas y de las propiedades mecánicas realizadas para las muestras DO: la máxima acumulación de sólidos ocurriría a las 12 h y luego tendría lugar un colapso estructural marcado, que también se manifestó empíricamente por fragmentos de manzana desprendidos para tiempos mayores a 12 h de DO.



**Figura 4.5** Tiempo de secado ( $t_s$ ) en función del tiempo de DO. Solución deshidratante: XIL47. ( $\blacklozenge$ ) 160 W, ( $\square$ ) 350 W; ( $\blacktriangle$ ) 500 W; ( $\triangle$ ) 650 W.

Por otro lado, para la potencia más baja, las muestras tratadas con XIL47 (Figura 4.5) presentaron una tendencia decreciente de  $t_s$  hasta las 12 h de DO, y luego un leve aumento. Es decir que a partir de la segunda mitad del proceso se habría consolidado más fuertemente la costra, lo que coincide con la máxima incorporación de sólidos, registrada entre las 12 y las 24 h (Capítulo 2, Figura 2.5).

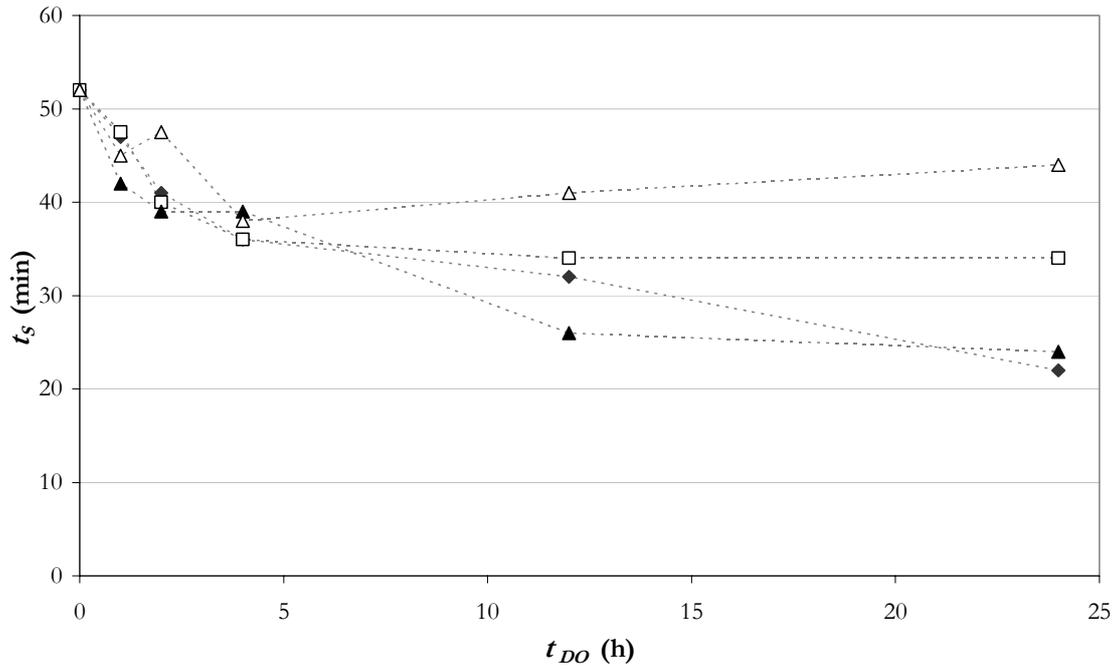
En líneas generales, para potencias mayores a 160 W y para todos los solutos: cuanto mayor fue el tiempo de DO, más cortas fueron las etapas de secado.



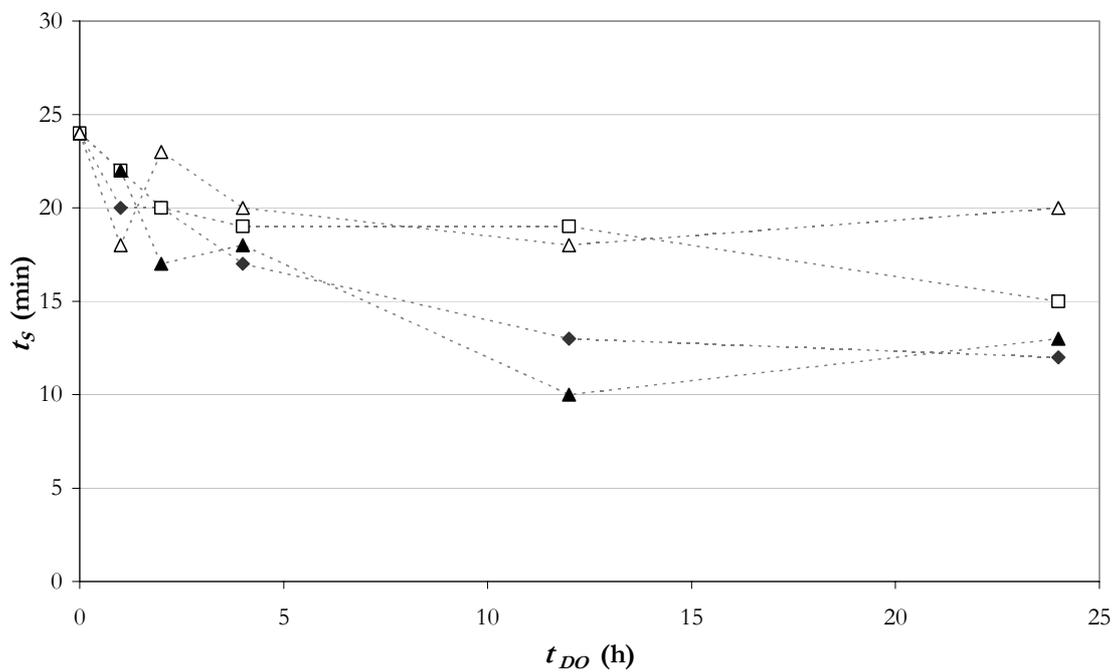
**Figura 4.6** Tiempo de secado ( $t_s$ ) en función del tiempo de DO para los diferentes solutos. Potencia de secado: 160 W. (◆) SAC69, (△) AAPM69; (□) SAC47; (▲) XIL47.

Comparando los resultados obtenidos del tiempo de secado (a 160 W) en función de la duración del tratamiento de DO (Figura 4.6), en líneas generales es posible reconocer que la solución AAPM69 fue la que exigió las etapas de secado más prolongadas y que la de XIL47, las más cortas. Esta respuesta (continuando con las explicaciones anteriores) podría adjudicarse a una mayor cantidad de agua a remover en el caso de AAPM69. Las otras dos soluciones mostraron comportamientos intermedios.

Esta diferencia en la duración de la etapa de secado disminuyó a medida que aumentó la potencia de microondas y finalmente, para el caso de la potencia más alta, las etapas de secado tuvieron una duración similar para todos los solutos (Figuras 4.7 y 4.8).



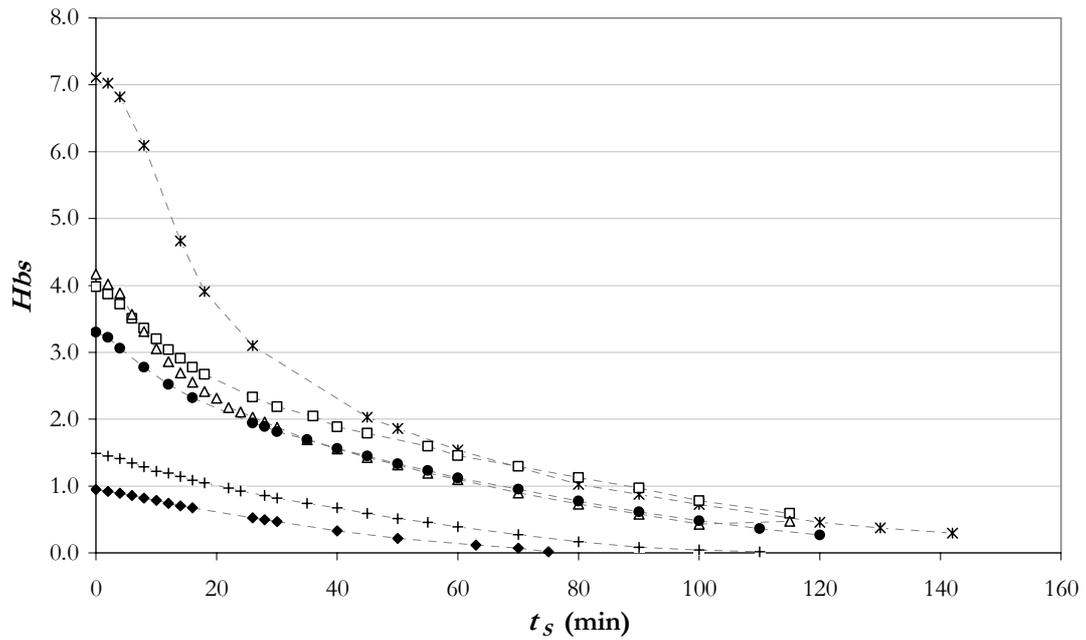
**Figura 4.7** Tiempo de secado ( $t_s$ ) en función del tiempo de DO para los diferentes solutos. Potencia de secado: 350 W. (◆) SAC69, (△) AAPM69; (□) SAC47; (▲) XIL47.



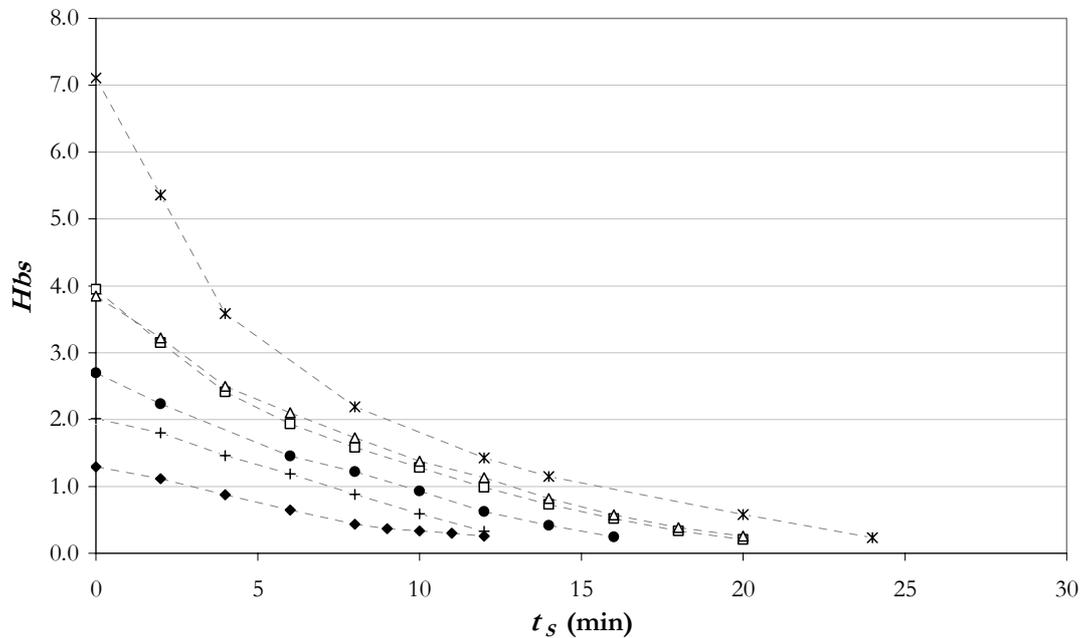
**Figura 4.8** Tiempo de secado ( $t_s$ ) en función del tiempo de DO para los diferentes solutos. Potencia de secado: 650 W. (◆) SAC69, (△) AAPM69; (□) SAC47; (▲) XIL47.

Analizando la evolución de la humedad (en base seca) en función del tiempo de secado, se puede ver que cuanto más prolongada fue la DO, menor humedad tuvieron las muestras al ingreso de la MO. Esto no implicó una reducción lineal de los tiempos de secado para la potencia más baja pero sí para las potencias más altas, tal como se discutió anteriormente.

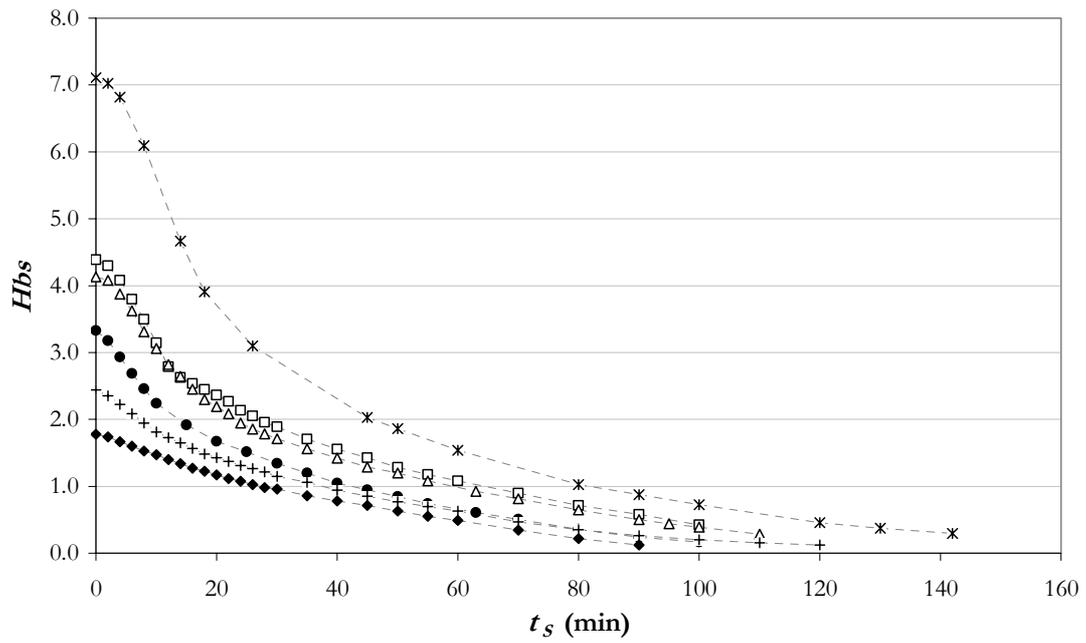
A continuación, se muestran los resultados correspondientes a las cuatro soluciones, para la potencia más baja y para la más alta (Figuras 4.9 y 4.10 para SAC69; Figuras 4.11 y 4.12 para SAC47; Figuras 4.13 y 4.14 para XIL47 y Figuras 4.15 y 4.16 para AAPM69).



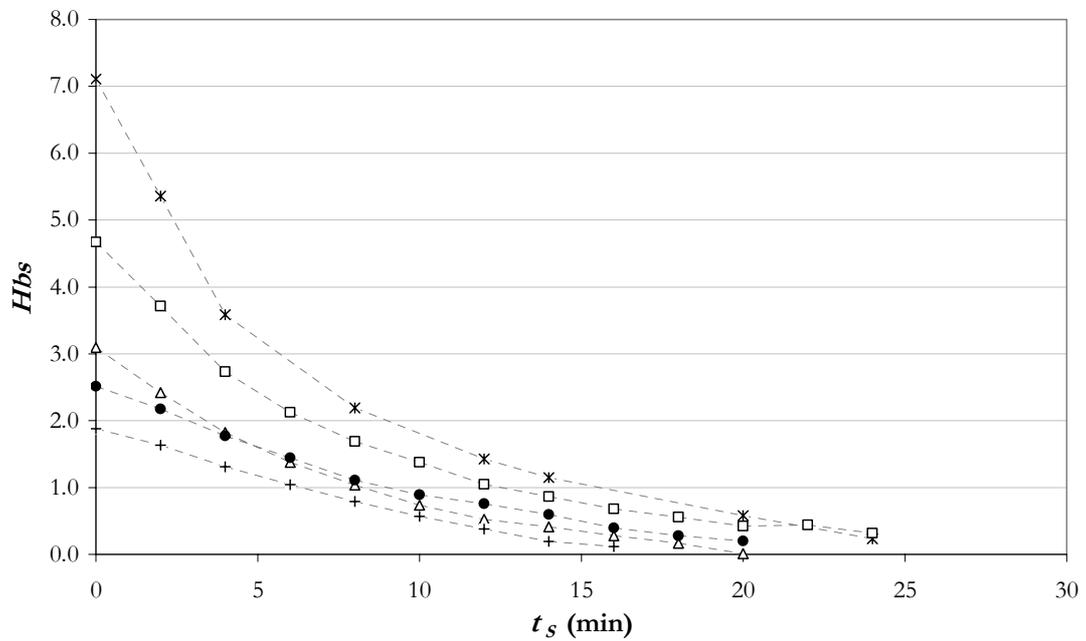
**Figura 4.9** Humedad (en base seca) en función del tiempo de secado ( $t_s$ ) para los diferentes tiempos de DO. Solución deshidratante: SAC69. Potencia de secado: 160 W. (\*) 0 h; (□) 1 h; (△) 2 h; (●) 4 h; (+) 12 h; (◆) 24 h.



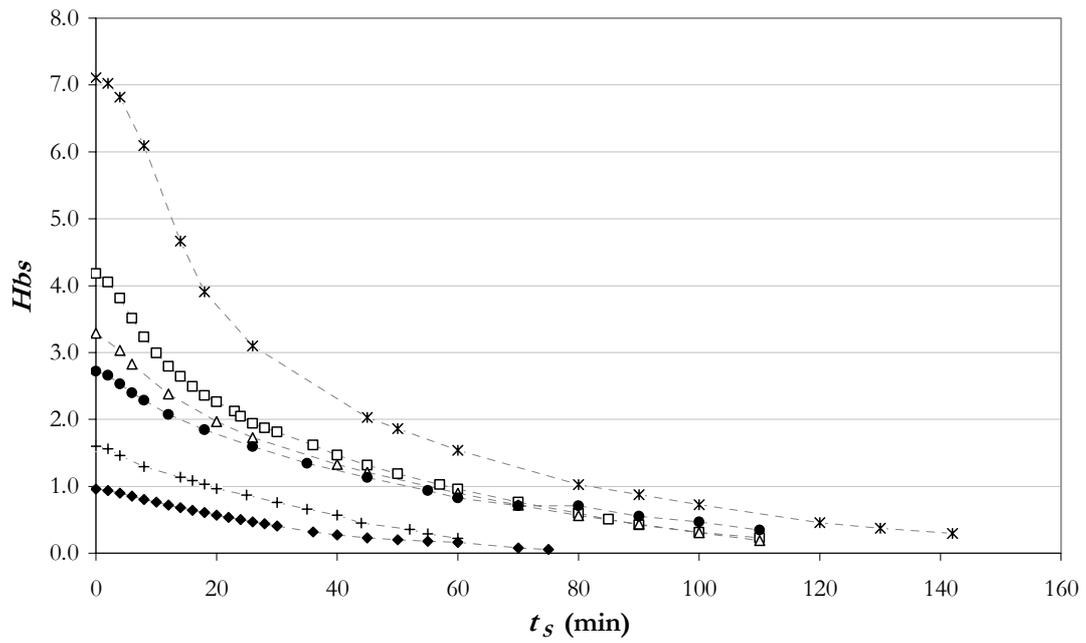
**Figura 4.10** Humedad (en base seca) en función del tiempo de secado ( $t_s$ ) para los diferentes tiempos de DO. Solución deshidratante: SAC69. Potencia de secado: 650 W. (\*) 0 h; (□) 1 h; (△) 2 h; (●) 4 h; (+) 12 h; (◆) 24 h.



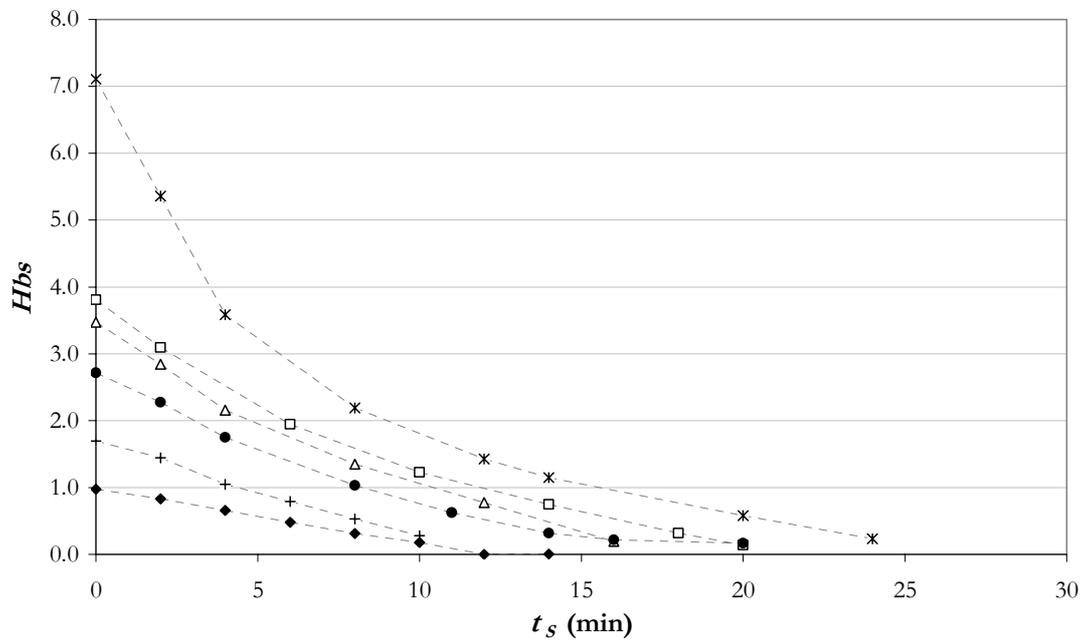
**Figura 4.11** Humedad (en base seca) en función del tiempo de secado ( $t_s$ ) para los diferentes tiempos de DO. Solución deshidratante: SAC47. Potencia de secado: 160 W. (\*) 0 h; (□) 1 h; (△) 2 h; (●) 4 h; (+) 12 h; (◆) 24 h.



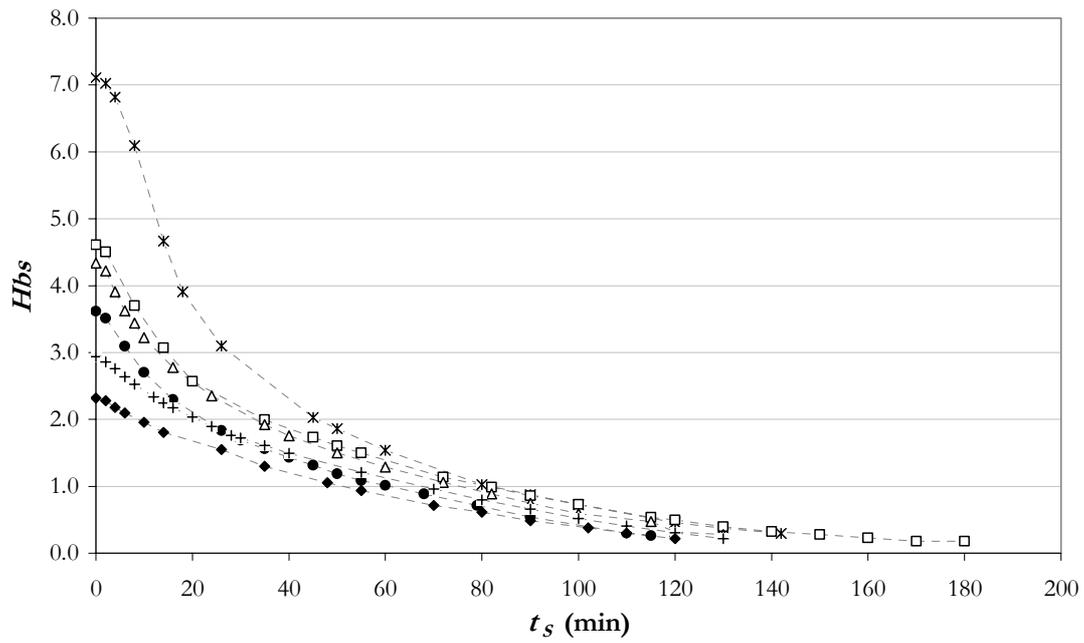
**Figura 4.12** Humedad (en base seca) en función del tiempo de secado ( $t_s$ ) para los diferentes tiempos de DO. Solución deshidratante: SAC47. Potencia de secado: 650 W. (\*) 0 h; (□) 1 h; (△) 2 h; (●) 4 h; (+) 12 h; (◆) 24 h.



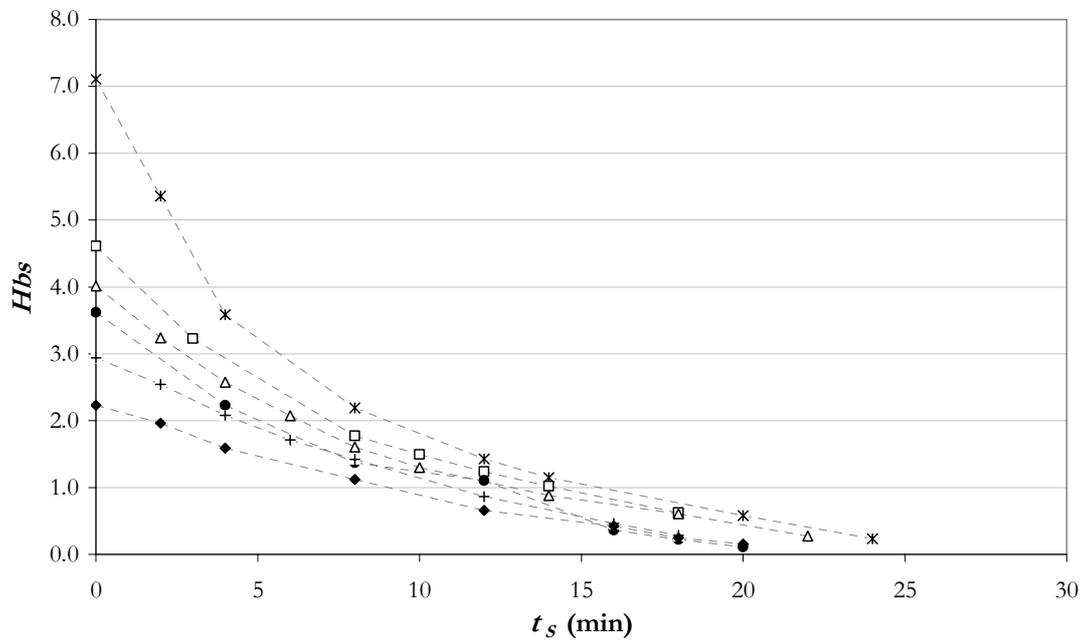
**Figura 4.13** Humedad (en base seca) en función del tiempo de secado ( $t_s$ ) para los diferentes tiempos de DO. Solución deshidratante: XIL47. Potencia de secado: 160 W. (\* ) 0 h; (□) 1 h; (△) 2 h; (●) 4 h; (+) 12 h; (◆) 24 h.



**Figura 4.14** Humedad (en base seca) en función del tiempo de secado ( $t_s$ ) para los diferentes tiempos de DO. Solución deshidratante: XIL47. Potencia de secado: 650 W. (\* ) 0 h; (□) 1 h; (△) 2 h; (●) 4 h; (+) 12 h; (◆) 24 h.



**Figura 4.15** Humedad (en base seca) en función del tiempo de secado ( $t_s$ ) para los diferentes tiempos de DO. Solución deshidratante: AAPM69. Potencia de secado: 160 W. (\*) 0 h; (□) 1 h; (△) 2 h; (●) 4 h; (+) 12 h; (◆) 24 h.

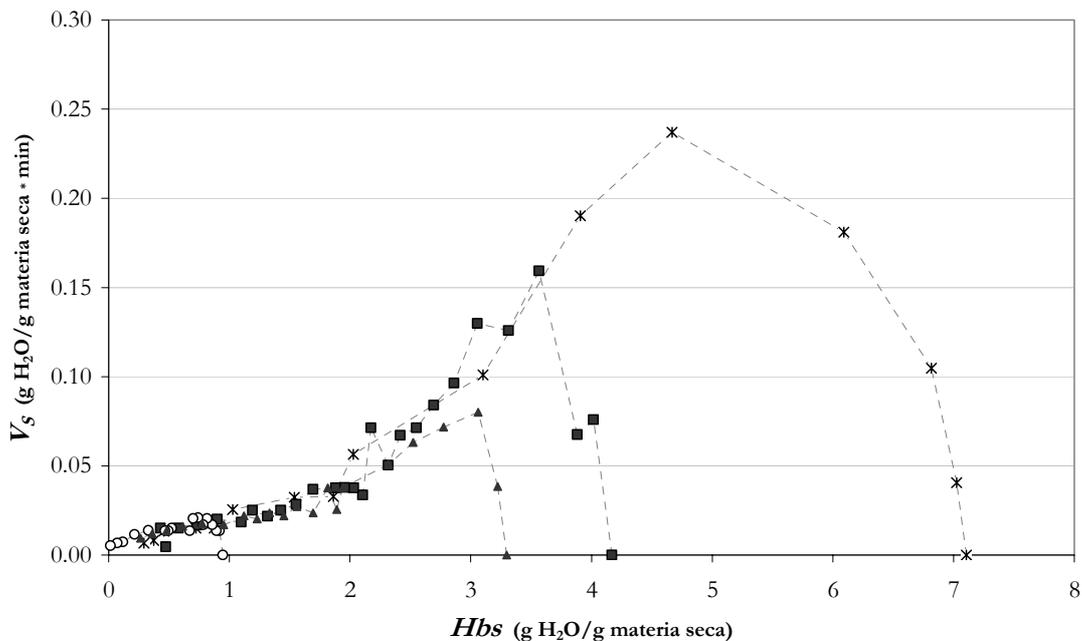


**Figura 4.16** Humedad (en base seca) en función del tiempo de secado ( $t_s$ ) para los diferentes tiempos de DO. Solución deshidratante: AAPM69. Potencia de secado: 650 W. (\*) 0 h; (□) 1 h; (△) 2 h; (●) 4 h; (+) 12 h; (◆) 24 h.

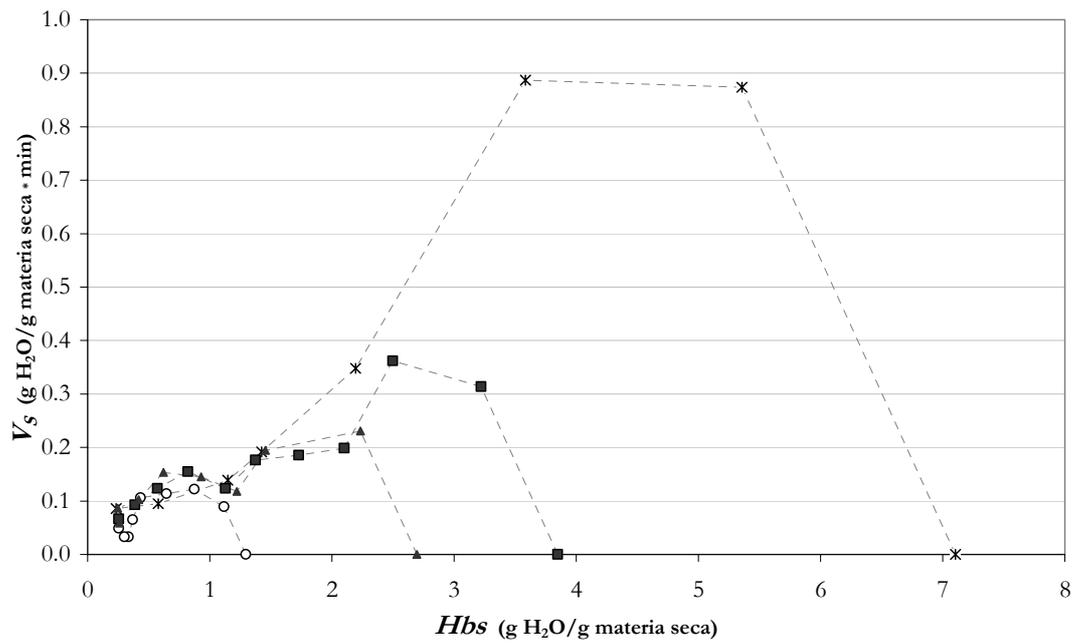
Simultáneamente, cabe rescatar el análisis de las velocidades de secado ( $V_s$ ) correspondientes a cada caso, es decir la relación existente entre  $V_s$  ( $DM/Dt_s$ ) y  $Hbs$ , donde  $DM$  (g) es la variación de peso durante el secado y  $Dt_s$  (min) es el intervalo de tiempo de secado considerado.

Para analizarla resulta conveniente introducir el concepto de período de precalentamiento: es la etapa del secado que se extiende desde el inicio de la operación hasta que se alcanza la velocidad máxima de secado ( $V_{s_{MÁX}}$ ). Durante esta etapa la energía suministrada al alimento se traduce en un aumento de temperatura, que no es lo suficientemente alto como para generar la evaporación (la velocidad de evaporación aumenta en forma progresiva). Es decir que el precalentamiento es una etapa ineficiente si se considera como objetivo del secado eliminar agua del producto y, como cualquier proceso ineficiente resulta imperativo minimizar su duración, y en definitiva, minimizar el tiempo necesario para alcanzar la velocidad máxima de secado ( $t_{s_{MÁX}}$ ).

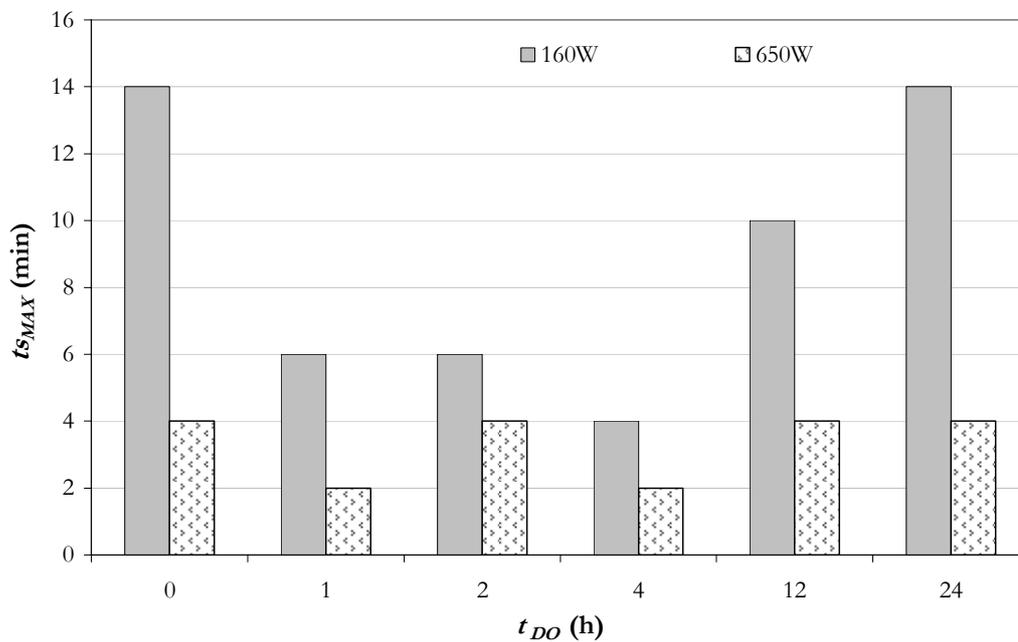
En las Figuras 4.17 y 4.18 se muestran las curvas de secado correspondientes a SAC69-160 W y SAC69-650 W, y sólo a los efectos de facilitar la lectura de los gráficos, se muestran los datos correspondientes a  $t_{DO} = 0, 2, 4$  y 24 h. En la Figura 4.19 se comparan los  $t_{s_{MÁX}}$  correspondientes a ambas potencias.



**Figura 4.17** Velocidad de secado ( $V_s$ ) en función de la humedad (en base seca) para SAC69. Potencia de secado: 160 W. (\*) Sin DO; (■) 2 h; (▲) 4 h; (○) 24 h.



**Figura 4.18** Velocidad de secado ( $V_s$ ) en función de la humedad (en base seca) para SAC69. Potencia de secado: 650 W. (\*) Sin DO; (■) 2 h; (▲) 4 h; (○) 24 h.



**Figura 4.19** Duración de la etapa de precalentamiento ( $t_{s_{MAX}}$ ) en función del tiempo de DO ( $t_{DO}$ ) y de la potencia de secado para SAC69.

En todos los casos se advierte un período inicial de precalentamiento: la velocidad de secado aumentó y la humedad media de la fruta disminuyó levemente.

Asimismo, cuanto mayor fue la potencia de secado (650 W), menor dependencia se generó entre la duración del precalentamiento y el tiempo de DO. En cambio, para la potencia más baja, se ingresa más rápidamente en la zona de secado efectivo cuando los productos fueron DO hasta las 4 h. Luego, para tiempos de DO mayores, se observaron precalentamientos más prolongados (para tiempos largos de DO: menor agua en el tejido vegetal y por lo tanto, menor eficiencia de las microondas).

En líneas generales, este período inicial fue más corto a medida que aumentó la potencia de microondas.

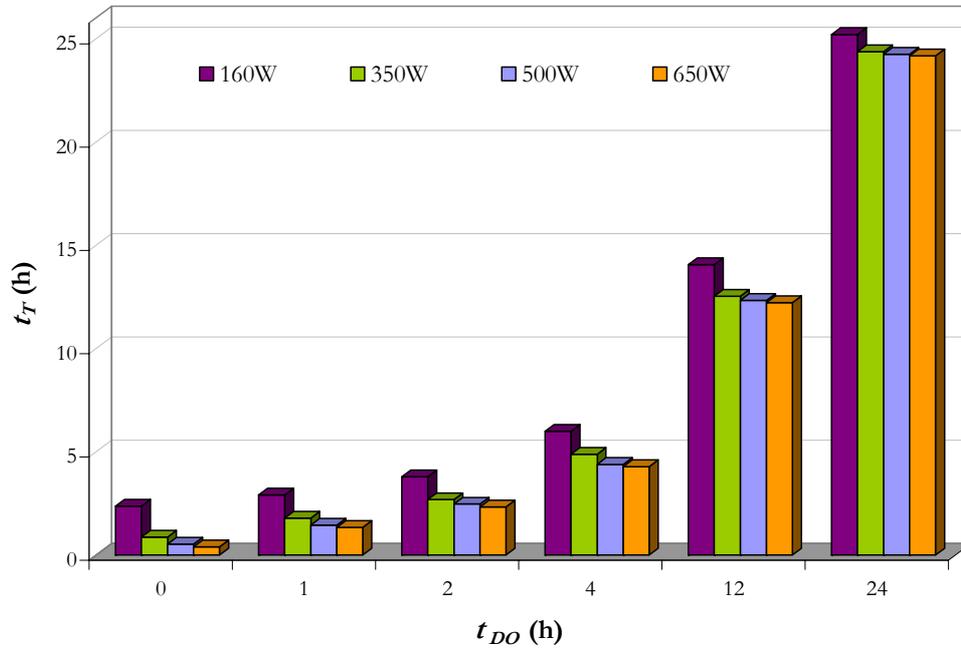
No obstante, no se deduce una relación clara entre  $t_{MAX}$  y  $t_{DO}$  (Figura 4.19): el período de precalentamiento disminuyó hasta las 2-4 h de DO y luego aumentó hacia las 24 h, particularmente se observa a potencias bajas, donde la generación de calor y la transferencia de materia son más lentas. En este contexto, es factible proponer la siguiente hipótesis: como resultado de la DO, la manzana tratada durante 12 y 24 h contiene menos agua que las osmodeshidratadas durante menos tiempo, las zonas superficiales se encuentran más deshidratadas que las interiores y la inclusión de solutos higroscópicos disminuirían aún más la disponibilidad del agua. Tanto el descenso general como la distribución no uniforme de humedad dificultan la remoción de agua por microondas; las zonas superficiales se secan rápidamente y la temperatura baja.

Por lo tanto, se podría decir que existe un umbral de humedad media (en el producto) por debajo del cual, el contenido de humedad no es suficiente para que se produzca un aumento (rápido) de temperatura tal que permita la evaporación y remoción del agua del alimento.

Luego de alcanzar un pico máximo, la velocidad de secado disminuyó hacia el final del proceso (no se pudo distinguir un período de secado constante en este trabajo). Es interesante observar la forma del período final de secado para cada potencia: el comportamiento y los valores de velocidad de secado son similares para los distintos tiempos de DO; sin importar la humedad inicial, la fase final del secado parece estar representada por una única curva. Es decir, la DO como pretratamiento introduce diferencias en el período de precalentamiento, pero una vez alcanzada la velocidad máxima (que depende de la distribución de humedad al final de la DO) la curva de secado no dependería del tiempo de DO.

Si ahora consideramos al proceso combinado, resultará interesante conocer su duración en función de las variables:  $t_{DO}$  y potencia de secado.

Como se ve en la Figura 4.20, para la solución SAC69, independientemente del tiempo de DO, aumentar la potencia de trabajo se tradujo en un proceso global más corto.



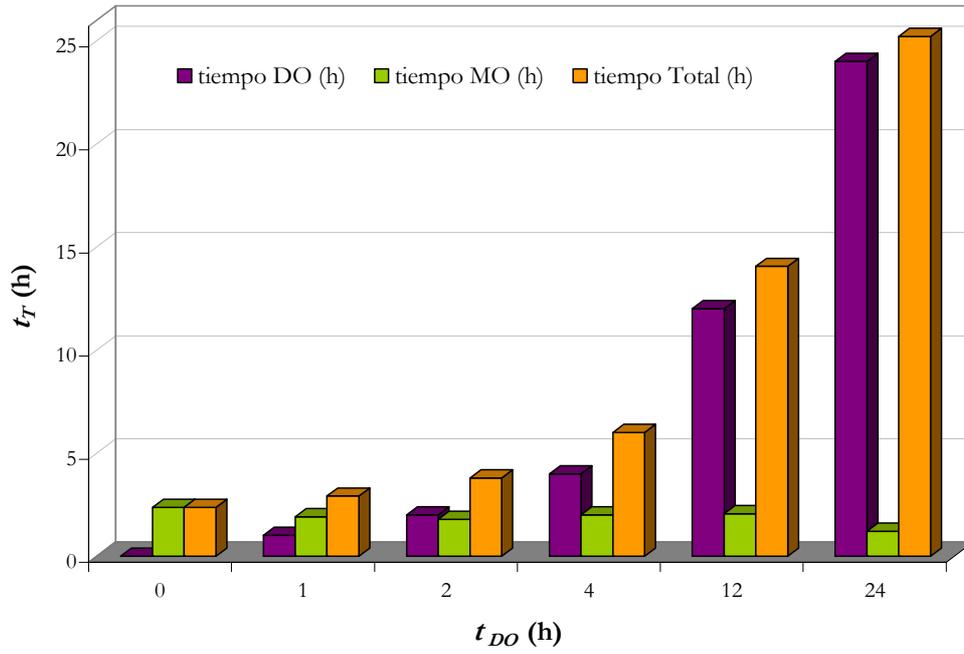
**Figura 4.20** Tiempo total de proceso ( $t_T$ ) en función del tiempo de DO y de la potencia de secado. Solución deshidratante: SAC69.

La duración de cada etapa y del proceso global se presenta en las Figuras 4.21 y 4.22, correspondientes a SAC69-160 W y SAC69-650 W respectivamente.

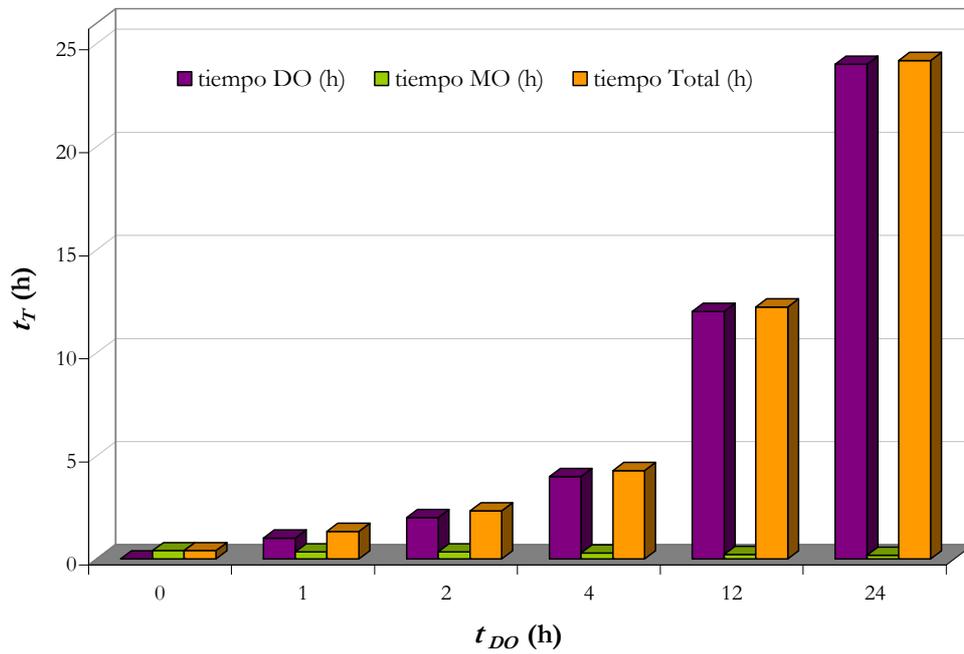
En el caso de 160 W, se ve que para  $t_{DO} < 2$  h el secado es la etapa que controla la duración del proceso global, mientras que para  $t_{DO}$  mayores de 2 h, es justamente el pretratamiento el que determina la duración total. El resto de los solutos presentan el mismo comportamiento.

Para la potencia más alta, en cambio, la etapa más prolongada siempre es la DO.

En las Tablas 4.3 a 4.10 se muestran los tiempos de secado (en horas) y los tiempos totales de proceso, correspondientes a los diferentes pretratamientos (con las diferentes soluciones) y a las distintas potencias de MO utilizadas.



**Figura 4.21** Duración de cada etapa y del proceso combinado, en función del tiempo de DO. Potencia de secado: 160 W. Solución deshidratante: SAC69.



**Figura 4.22** Duración de cada etapa y del proceso combinado, en función del tiempo de DO. Potencia de secado: 650 W. Solución deshidratante: SAC69.

**Tabla 4.3** Duración de la etapa de secado ( $t_s$ (h)) correspondiente a DO practicada con SAC69, considerando los cuatro niveles de potencia de MO utilizados.

$t_{DO}$ (h)	160W	350W	500W	650W
0	2.37	0.87	0.53	0.40
1	1.92	0.78	0.45	0.33
2	1.79	0.68	0.47	0.33
4	2.00	0.60	0.38	0.28
12	1.98	0.53	0.33	0.22
24	1.21	0.37	0.24	0.20

**Tabla 4.4** Duración del proceso global ( $t_T$ (h)) correspondientes a DO practicada con SAC69, considerando los cuatro niveles de potencia de MO utilizados.

$t_{DO}$ (h)	160W	350W	500W	650W
0	2.37	0.87	0.53	0.40
1	2.92	1.78	1.45	1.33
2	3.79	2.68	2.47	2.33
4	6.00	4.60	4.38	4.28
12	13.98	12.53	12.33	12.22
24	25.21	24.37	24.24	24.20

**Tabla 4.5** Duración de la etapa de secado ( $t_s$ (h)) correspondiente a DO practicada con SAC47, considerando los cuatro niveles de potencia de MO utilizados.

$t_{DO}$ (h)	160W	350W	500W	650W
0	2.37	0.87	0.53	0.40
1	1.87	0.79	0.54	0.37
2	1.83	0.67	0.48	0.33
4	1.67	0.60	0.40	0.32
12	2.00	0.57	0.43	0.32
24	1.50	0.57	0.35	0.25

**Tabla 4.6** Duración del proceso global ( $t_T$ (h)) correspondientes a DO practicada con SAC47, considerando los cuatro niveles de potencia de MO utilizados.

$t_{DO}$ (h)	160W	350W	500W	650W
0	2.37	0.87	0.53	0.40
1	2.87	1.79	1.54	1.37
2	3.83	2.67	2.48	2.33
4	5.67	4.60	4.40	4.32
12	14.00	12.57	12.43	12.32
24	25.50	24.57	24.35	24.25

**Tabla 4.7** Duración de la etapa de secado ( $t_s$ (h)) correspondiente a DO practicada con XII47, considerando los cuatro niveles de potencia de MO utilizados.

$t_{DO}$ (h)	160W	350W	500W	650W
0	2.37	0.87	0.53	0.40
1	1.83	0.70	0.52	0.37
2	1.83	0.65	0.38	0.28
4	1.83	0.65	0.37	0.30
12	1.00	0.43	0.27	0.17
24	1.21	0.40	0.30	0.22

**Tabla 4.8** Duración del proceso global ( $t_T$ (h)) correspondientes a DO practicada con XII47, considerando los cuatro niveles de potencia de MO utilizados.

$t_{DO}$ (h)	160W	350W	500W	650W
0	2.37	0.87	0.53	0.40
1	2.83	1.70	1.52	1.37
2	3.83	2.65	2.38	2.28
4	5.83	4.65	4.37	4.30
12	13.00	12.43	12.27	12.17
24	25.21	24.40	24.30	24.22

**Tabla 4.9** Duración de la etapa de secado ( $t_s$ (h)) correspondiente a DO practicada con AAPM69, considerando los cuatro niveles de potencia de MO utilizados.

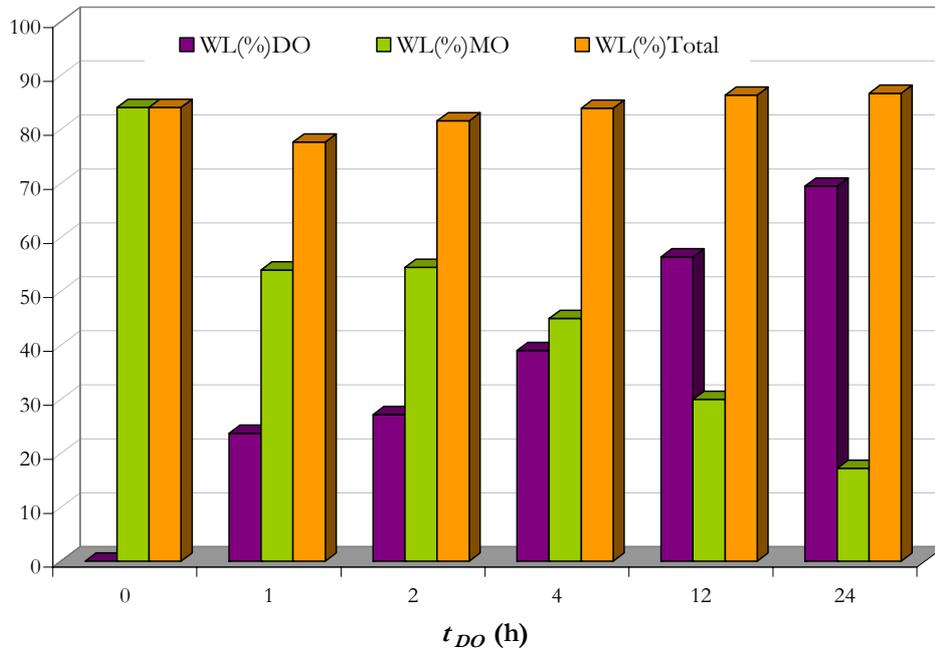
$t_{DO}$ (h)	160W	350W	500W	650W
0	2.37	0.87	0.53	0.40
1	2.33	0.75	0.48	0.30
2	2.17	0.79	0.62	0.38
4	1.92	0.63	0.48	0.33
12	2.17	0.68	0.50	0.30
24	2.00	0.73	0.43	0.33

**Tabla 4.10** Duración del proceso global ( $t_T$ (h)) correspondientes a DO practicada con AAPM69, considerando los cuatro niveles de potencia de MO utilizados.

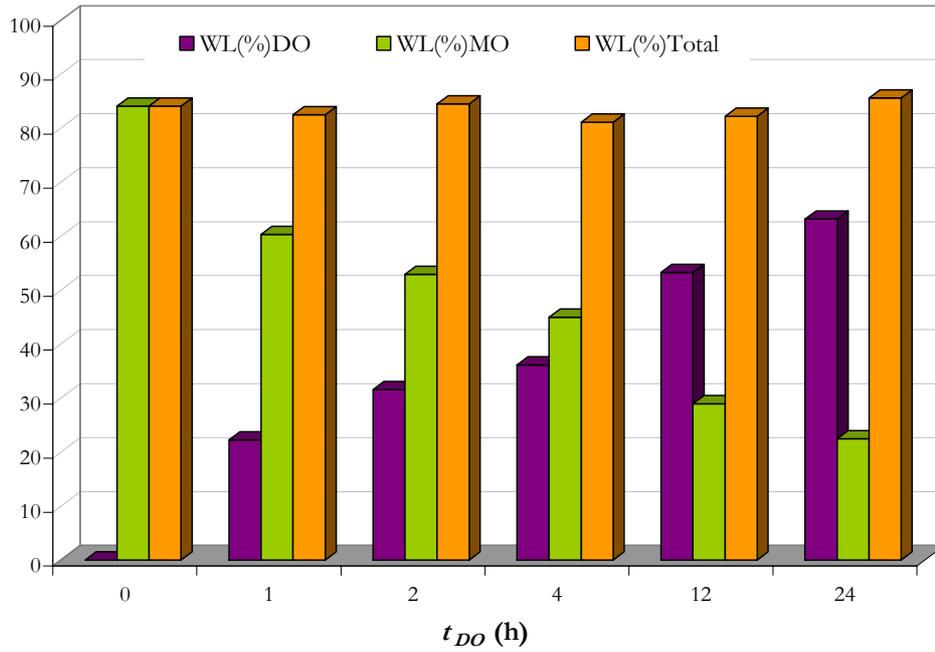
$t_{DO}$ (h)	160W	350W	500W	650W
0	2.37	0.87	0.53	0.40
1	3.33	1.75	1.48	1.30
2	4.17	2.79	2.62	2.38
4	5.92	4.63	4.48	4.33
12	14.17	12.68	12.50	12.30
24	26.00	24.73	24.43	24.33

En cuanto a la pérdida de agua total necesaria para conseguir un  $a_w = 0.5$ , resultó prácticamente independiente del  $t_{DO}$  y del soluto utilizado (tal como se dedujo en el análisis de varianza realizado en el Capítulo 3).

En la Figura 4.23 se muestran los  $WL$  obtenidos durante cada etapa y el correspondiente al total, cuando se utilizó solución de SAC69 y se secó a 160 W. Se puede ver que para  $t_{DO} \leq 2$  h la mayor remoción de agua se realizó durante el secado; que para  $t_{DO} \geq 12$  h la mayor parte del agua es removida durante la DO y que para tiempos de DO de 4 h ambas etapas consiguen extraer cantidades semejantes. Estos resultados son independientes de la potencia de secado ya que la cantidad de agua total a remover es la misma y que el  $WL$  de la DO sólo es función del tiempo de contacto fruta-solución. Las mismas observaciones son válidas para XIL47 (Figura 4.24).



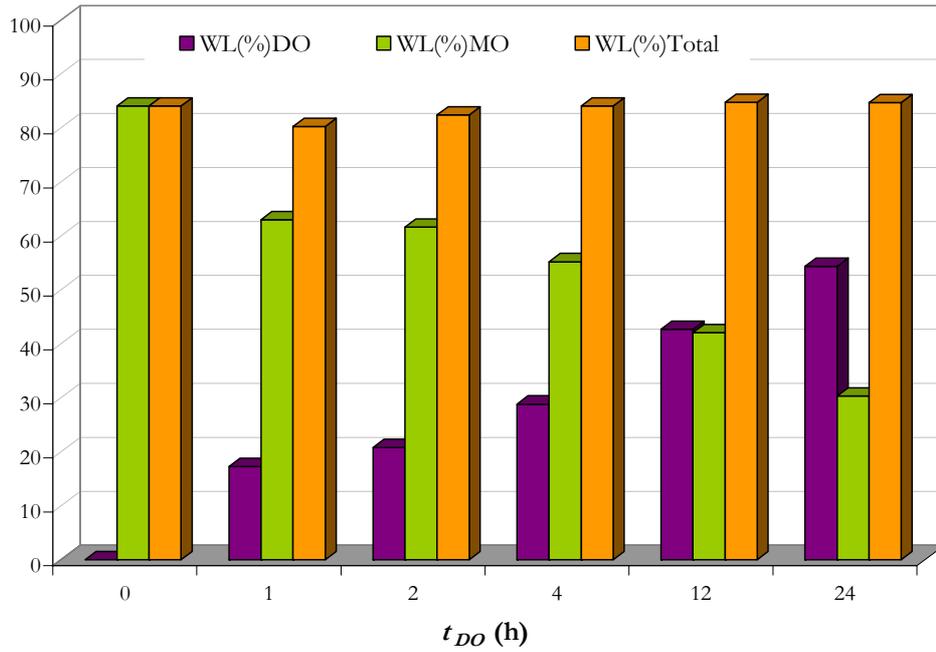
**Figura 4.23**  $WL$  de cada etapa y del proceso combinado, en función del tiempo de DO. Potencia de secado: 160 W. Solución deshidratante: SAC69.



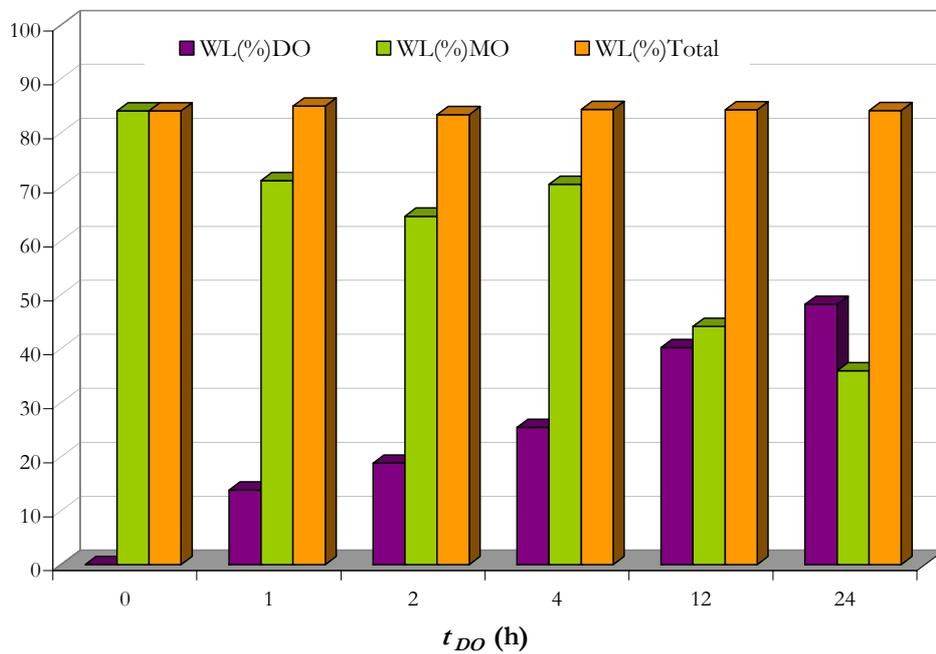
**Figura 4.24**  $WL$  de cada etapa y del proceso combinado, en función del tiempo de DO. Potencia de secado: 160 W. Solución deshidratante: XIL47.

En el caso de la solución SAC47, para  $t_{DO} \leq 4$  h, la mayor cantidad de agua se removió durante el secado; para  $t_{DO} = 12$  h, se removieron similares cantidades de agua en ambas etapas y finalmente, para tiempos de DO de 24 h, los mayores  $WL$  se registraron durante la DO (Figura 4.25).

Una respuesta similar se obtuvo para AAPM69 (Figura 4.26).



**Figura 4.25** *WL* de cada etapa y del proceso combinado, en función del tiempo de DO. Potencia de secado: 160 W. Solución deshidratante: SAC47.



**Figura 4.26** *WL* de cada etapa y del proceso combinado, en función del tiempo de DO. Potencia de secado: 160 W. Solución deshidratante: AAPM69.

Hasta aquí, habiendo analizado la transferencia de materia del proceso combinado DO-MO, es posible concluir que:

- El tiempo de secado disminuye cuando aumenta la potencia de secado (para un mismo  $t_{DO}$ ).
- En líneas generales, se requieren períodos de secado más cortos cuanto más larga ha sido la DO (es decir, cuanto mayor cantidad de agua se removió en la DO).
- No obstante, se encuentran situaciones particulares al trabajar con las soluciones de sacarosa: en ambos casos, se verificó que no necesariamente aumentar el  $t_{DO}$  implica una reducción del  $t_S$ .

La sacarosa incorporada a la matriz del alimento durante la DO, consolida una costra durante la etapa ulterior de secado, que actúa como resistencia a la difusión de agua. Particularmente, este efecto se manifiesta a potencias bajas de secado cuando la velocidad de remoción de agua sería menos intensa que a potencias altas y permitiría la formación de la costra. Adicionalmente, este efecto se manifiesta de manera más marcada, cuanto mayor es el contenido de sólidos impregnados. De hecho, la función decreciente del tiempo de secado en función del tiempo de DO presenta un quiebre (se convierte en función creciente) en aquellas condiciones en las que se registró el mayor valor de  $SG_{DO}$ .

- En la mayoría de los casos, la etapa más larga es la DO aún a la menor potencia de microondas (salvo para  $t_{DO} = 1$  h en los que el secado por MO a 160 W se extiende aproximadamente por 1 hora también). Es decir que, en la mayoría de los casos, la etapa que controla la duración del proceso global es la DO. Por lo tanto, si el objetivo es optimizar los tiempos de proceso, el esfuerzo debe volcarse sobre la DO.
- En cuanto a las curvas de secado, se vio que son del tipo exponencial negativa en las que se distinguen un período inicial de precalentamiento, uno efectivo de secado y otro de velocidad decreciente.

El período de precalentamiento (ineficiente desde el punto de vista de la eliminación de agua) fue más largo para los tiempos largos de DO. Esto puede atribuirse a que existe una cantidad menor de agua en la estructura, insuficiente para generar (rápidamente) la temperatura necesaria para la evaporación. En aquellas estructuras

más húmedas -correspondientes a  $t_{DO}$  más cortos- se contaría con una humedad mayor y por ello el secado habría presentado un precalentamiento más corto.

Por otro lado, aunque el período de precalentamiento es diferente según la duración de la DO, sin embargo, en el período de velocidad decreciente todas las curvas se agrupan en una sola.

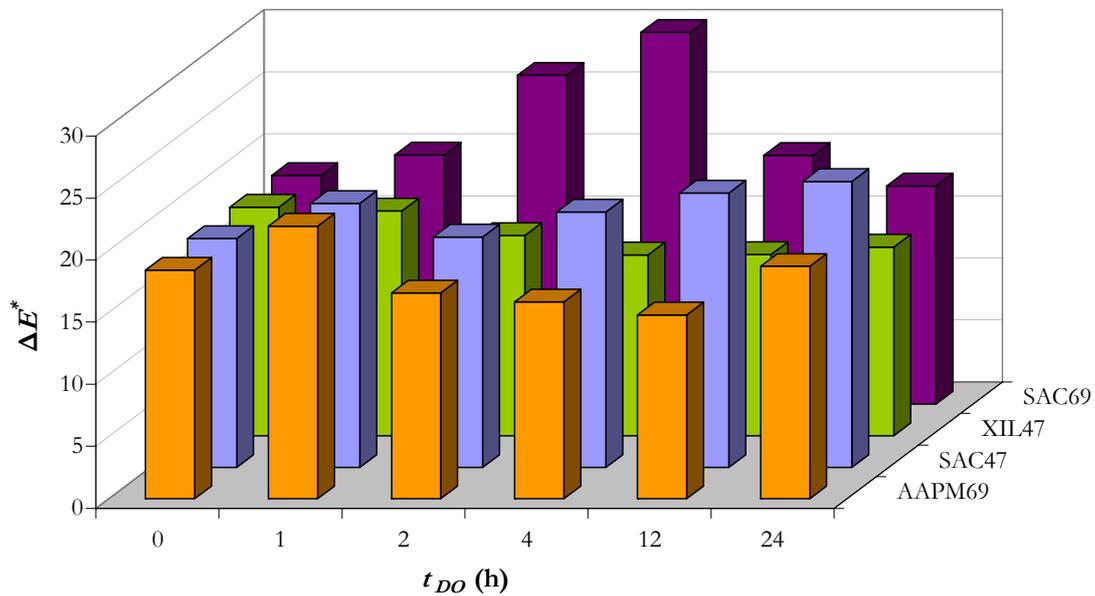
### 4.3.2 Cinética de variación de color durante el proceso combinado

En cuanto a la calidad de los productos obtenidos del proceso global, se observa que las soluciones de xilitol y AAPM a la potencia más baja (Figura 4.27) promovieron cambios de color similares a los que experimentó la manzana fresca durante el proceso de secado.

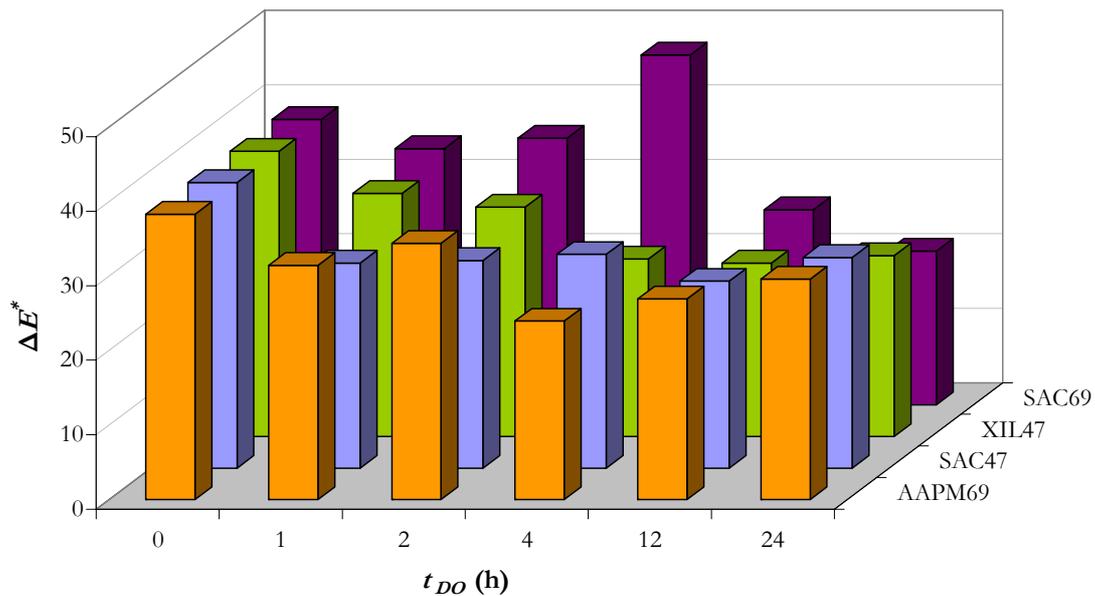
Diferente fue el comportamiento de las soluciones de sacarosa que generaron mayores  $\Delta E^*$  que los correspondientes a la manzana fresca para todo tiempo de DO:

- Con SAC47 se puede deducir una tendencia creciente del cambio de color con  $t_{DO}$ , particularmente a partir de las 4 h.
- En el caso de SAC69, los mayores cambios (y mucho más importantes que los obtenidos con SAC47) se registraron para las muestras DO durante 2 y 4 horas.

Por otro lado, cuando el secado se realizó a la mayor potencia (Figura 4.28), la incorporación de una etapa de DO siempre condujo a menores  $\Delta E^*$ , a excepción de la condición SAC69-4 h.



**Figura 4.27** Variación total de color al final del proceso combinado ( $\Delta E^*$ ) de manzana tratada con los diferentes solutos. Potencia de secado: 160 W.



**Figura 4.28** Variación total de color al final del proceso combinado ( $\Delta E^*$ ) de manzana tratada con los diferentes solutos. Potencia de secado: 650 W.

Cabe recordar que estas variaciones de color del proceso global resultan de la combinación de las dos etapas (DO y MO) y por lo tanto, merece un tratamiento particular la contribución de cada etapa al color final.

En el caso de la solución SAC47, en las Figuras 4.29 y 4.30 se muestran los aportes mencionados correspondientes a la potencia más baja y más alta, respectivamente.

Allí se percibe que la DO produce un aumento del  $\Delta E$  directamente proporcional a  $t_{DO}$ . En el secado posterior, en cambio,  $\Delta E^*$  aumenta con  $t_{DO}$  hasta  $t_{DO} = 12$  h, cuando coincidentemente se registró el mayor tiempo de secado.

En ese sentido, SAC47 a 160 W produjo durante la DO un aumento lento de  $\Delta E^*$  con  $t_{DO}$ , luego, el secado posterior de estas muestras dio lugar a las mayores variaciones para las  $t_{DO}=12$  h, donde también se registró el mayor tiempo de secado. Además, se puede ver que del 100% de la variación total de color, un 50% fue producido por la DO y el 50% restante por MO, es decir que ninguna de las dos tecnologías gobierna el color de los productos finales secados en la potencia más baja y con esta solución osmótica.

Por el contrario, al trabajar con la potencia más alta, el secado por microondas fue el responsable del mayor cambio de color, salvo para los tiempos de DO largos (24 h) donde las contribuciones de ambas etapas fueron semejantes (Figura 4.30).

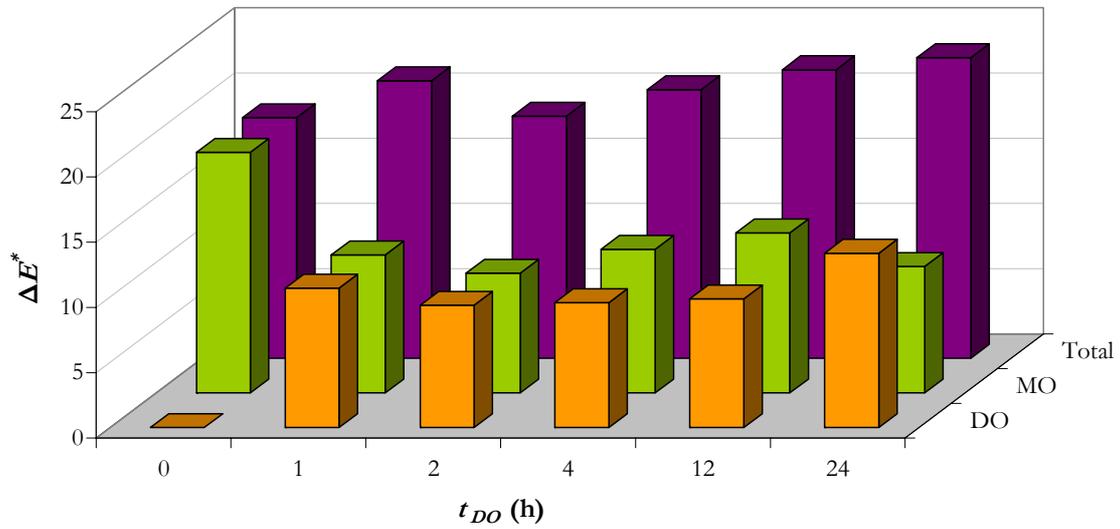


Figura 4.29 Variación total de color al final del proceso combinado ( $\Delta E^*$ ) de manzana tratada con SAC47. Potencia de secado: 160 W.

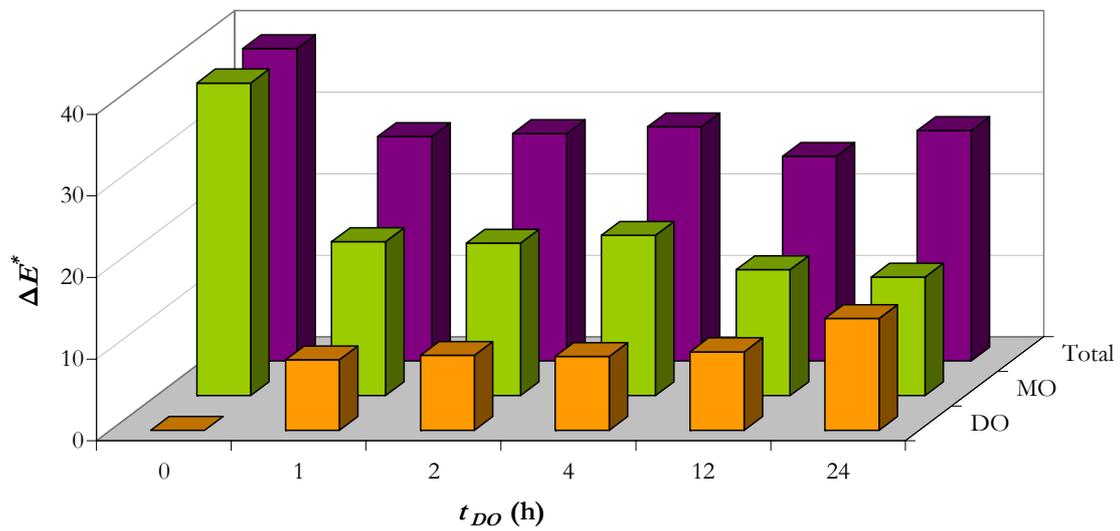
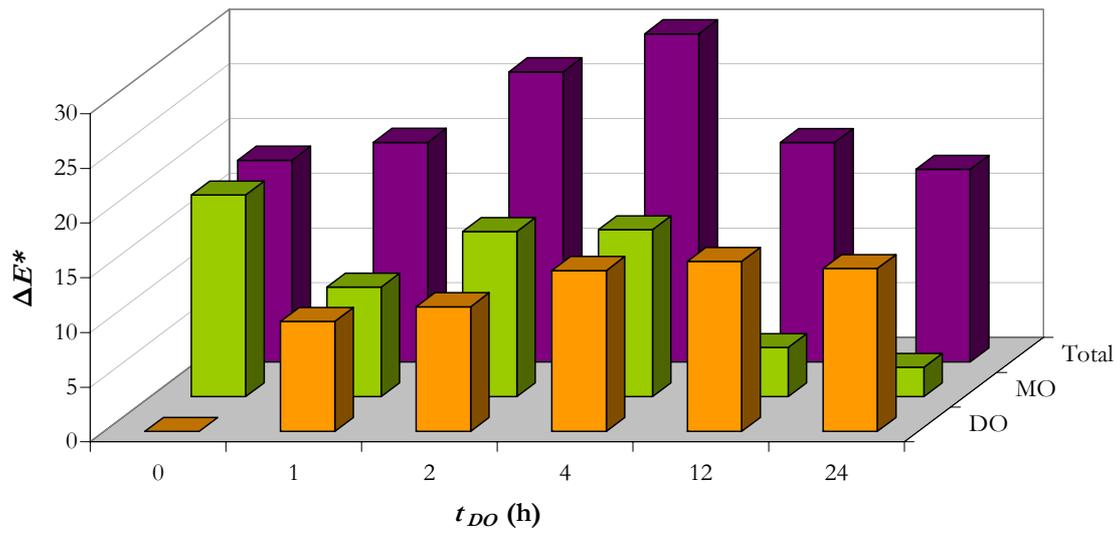
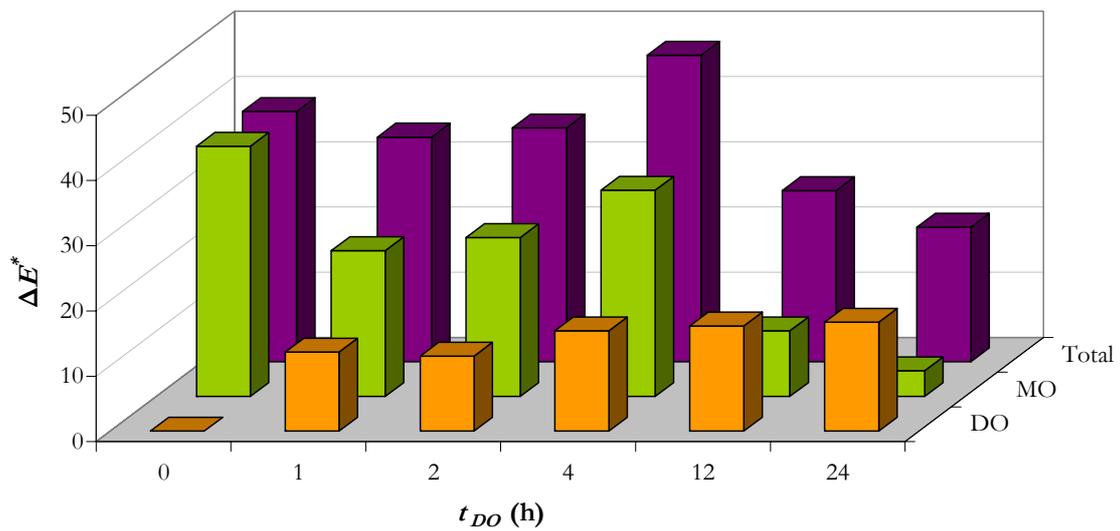


Figura 4.30 Variación total de color al final del proceso combinado ( $\Delta E^*$ ) de manzana tratada con SAC47. Potencia de secado: 650 W.



**Figura 4.31** Variación total de color al final del proceso combinado ( $\Delta E^*$ ) de manzana tratada con SAC69. Potencia de secado: 160 W.



**Figura 4.32** Variación total de color al final del proceso combinado ( $\Delta E^*$ ) de manzana tratada con SAC69. Potencia de secado: 650 W.

En cuanto a la solución SAC69, independientemente de la potencia de MO,  $\Delta E^*$  presentó tendencia creciente para  $t_{DO} \leq 4$  h y tendencia decreciente para  $t_{DO}$  mayores (Figuras 4.31 y 4.32).

Ahora bien, cuando se secó a potencia  $P = 160$  W, la contribución de ambas etapas a la variación total de color fue similar para  $t_{DO} \leq 4$  h, en tanto que, para tiempos mayores, el secado promovió los mayores  $\Delta E^*$ .

En cambio, cuando se secó a  $P = 650$  W, para  $t_{DO} \leq 4$  h el secado siempre fue el responsable de los mayores cambios de color y luego lo fue la DO, para tiempos mayores.

Por lo visto hasta el momento, al deshidratar con las soluciones de sacarosa, la relación entre el cambio de color y el tiempo de secado no es tan directa como en un proceso de secado convencional, dado que intervienen muchas variables en el proceso combinado analizado (pérdida de agua, ganancia de sólidos y potencia de microondas).

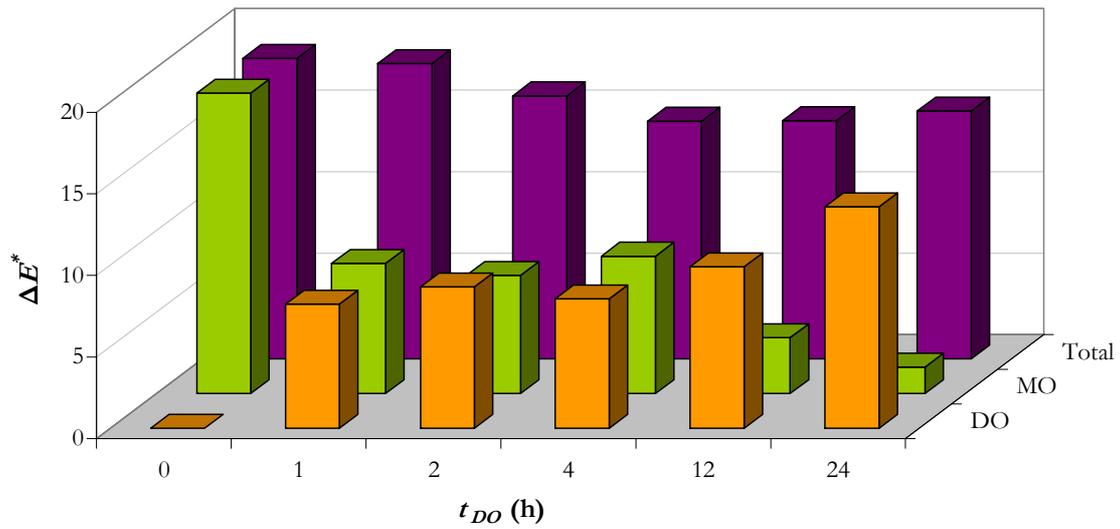
En este sentido, para deducir un mecanismo que relacione estas variables, se necesitarían técnicas experimentales más sofisticadas tales como la temperatura superficial durante el MO y la concentración local de sólidos en la superficie.

En otras palabras, sería necesario medir las variables que gobiernan los mecanismos generales de pardeamiento (por ejemplo, reacción de Maillard).

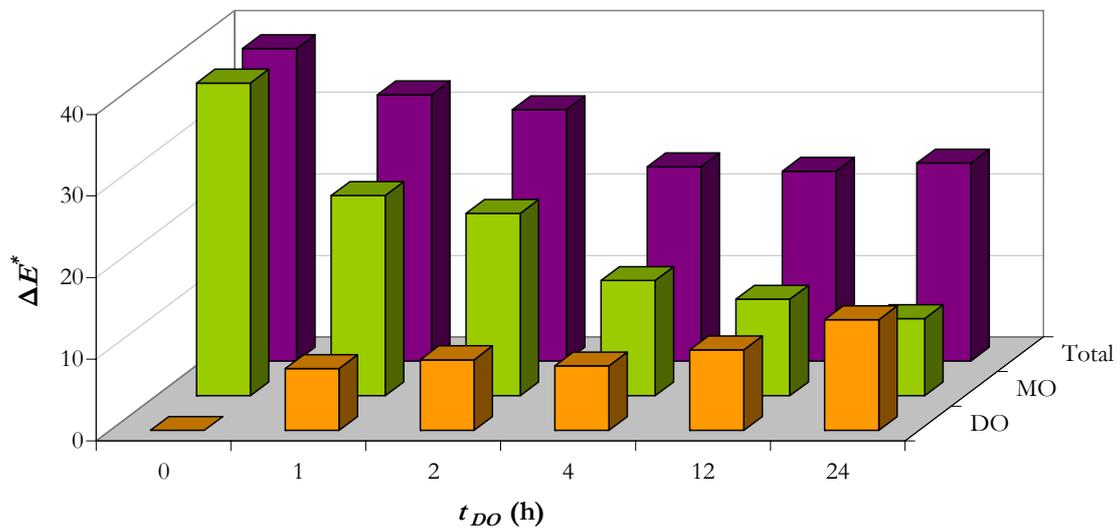
Adicionalmente, en estos procesos combinados, a medida que progresó el secado, las superficies presentaron una apariencia más lisa -tanto más al utilizar las potencias altas- obteniéndose un producto levemente inflado, con apariencia de un cubo con sus caras expandidas. En estas superficies más lisas, el equipo de medición de color detectó menor cambio de color, no coincidiendo con las observaciones visuales (esta discusión continúa más adelante en la sección 4.3.4).

Por otra parte, cuando se utilizó XIL47 e independientemente de la potencia de trabajo, cuanto más larga fue la DO, menor fue el cambio de color total.

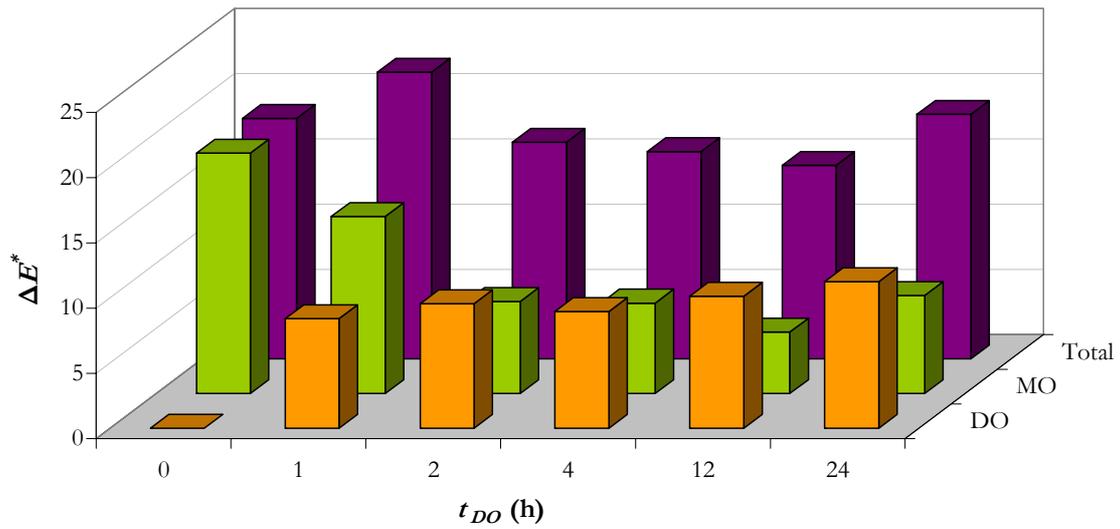
En el caso de la potencia baja, la mayor contribución al cambio total de color lo produjo la DO para  $t_{DO} \geq 12$  h. En cambio, a la potencia alta el secado generó los mayores cambios de  $\Delta E$  para  $t_{DO} \leq 4$  h, y para tiempos mayores, ambas etapas contribuyen de manera similar a la variación total de color.



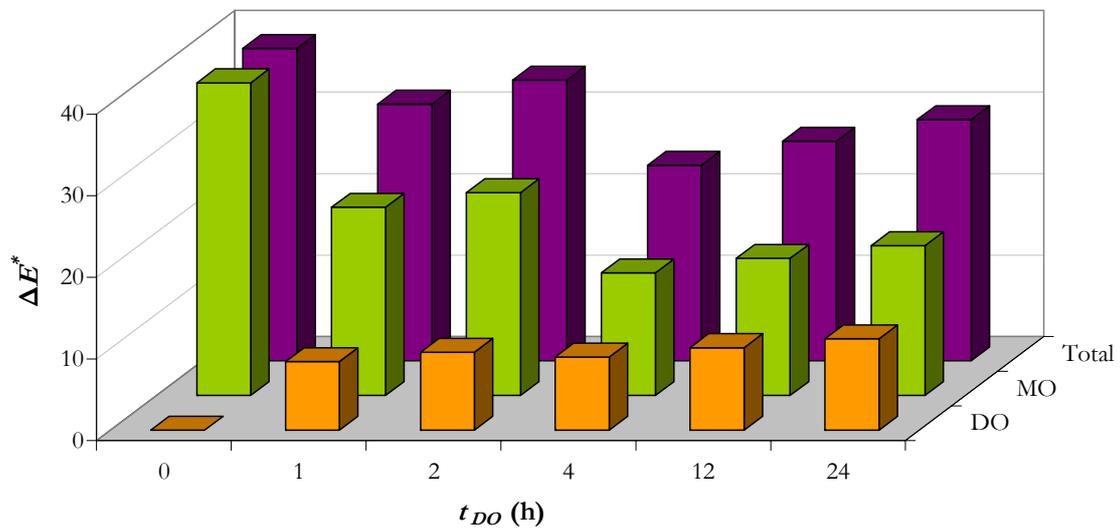
**Figura 4.33** Variación total de color al final del proceso combinado ( $\Delta E^*$ ) de manzana tratada con XII47. Potencia de secado: 160 W.



**Figura 4.34** Variación total de color al final del proceso combinado ( $\Delta E^*$ ) de manzana tratada con XII47. Potencia de secado: 650 W.



**Figura 4.35** Variación total de color al final del proceso combinado ( $\Delta E^*$ ) de manzana tratada con AAPM69. Potencia de secado: 160 W.



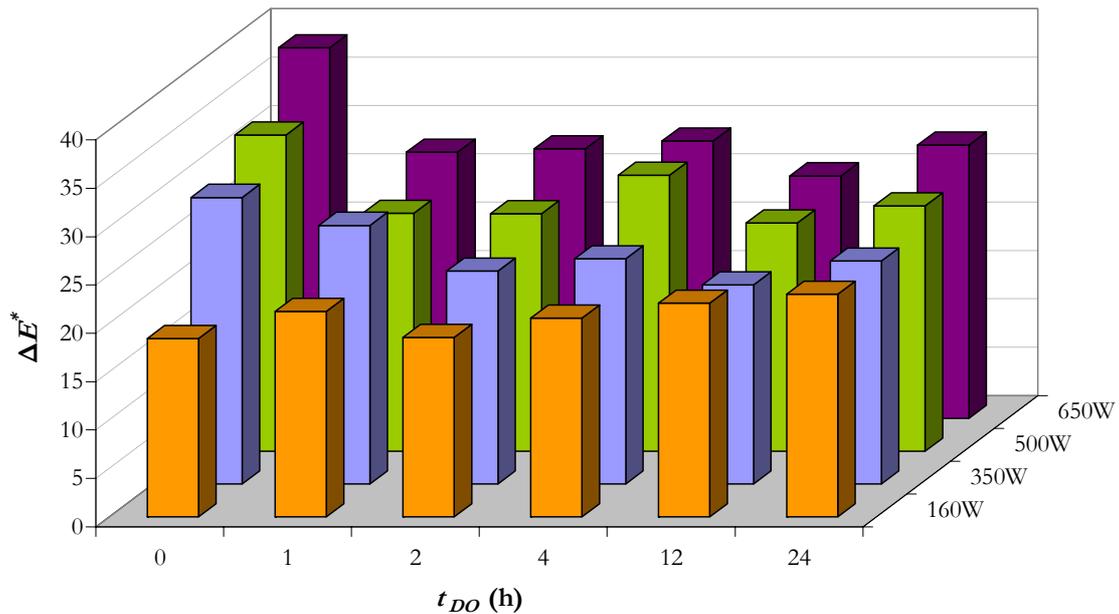
**Figura 4.36** Variación total de color al final del proceso combinado ( $\Delta E^*$ ) de manzana tratada con AAPM69. Potencia de secado: 650W.

En el caso de la solución con AAPM, no fue posible establecer una relación entre la variación de color y el tiempo de DO, aunque sí se podría deducir que para  $t_{DO} \geq 2$  h y para

cualquier potencia de secado, siempre se obtuvieron productos con menores variaciones de color que los secados sin pretratamiento y que, a potencias altas, el secado promovió los mayores  $\Delta E$  (Figuras 4.35 y 4.36).

De lo analizado en las figuras anteriores, se concluye que para un proceso de secado cuyo objetivo es reducir el  $a_w$  del alimento hasta 0.5, el agregado de una etapa previa de DO de al menos 2 h, siempre permite obtener un producto de mejor color que el obtenido sin este pretratamiento (secado directo por MO de fruta fresca). En efecto,  $\Delta E^*$  de muestras DO-MO es menor que  $\Delta E$  de muestra fresca-MO.

En conjunto, analizando los diferentes niveles de potencia usados con cada agente osmótico, se comprobó una tendencia creciente del cambio de color con la potencia de secado (Figuras 4.37 a 4.40).



**Figura 4.37** Variación total de color al final del proceso combinado ( $\Delta E^*$ ) de manzana tratada con SAC47.

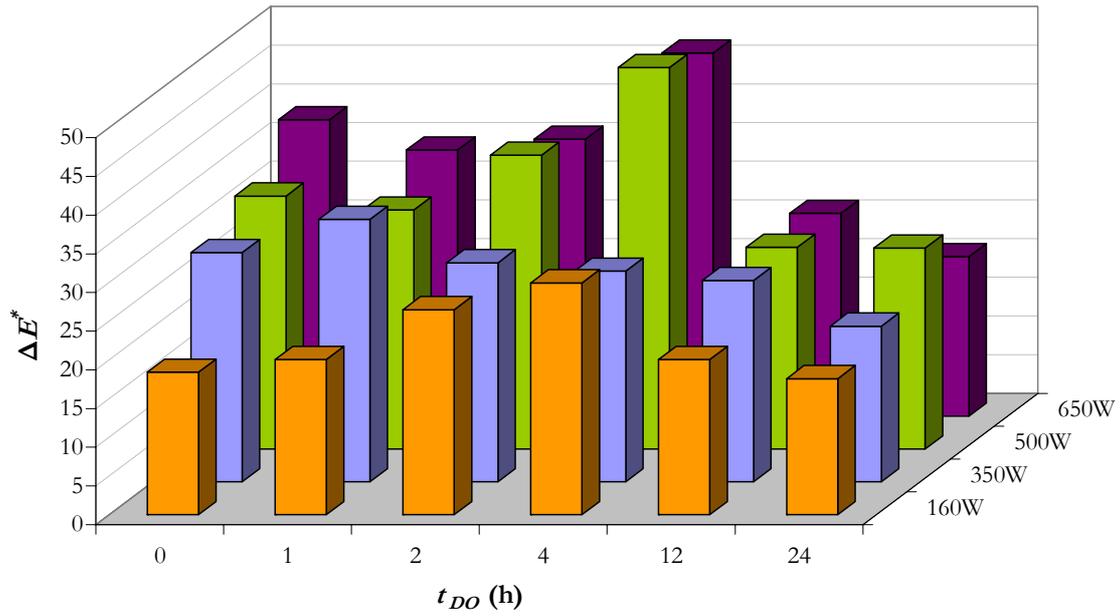


Figura 4.38 Variación total de color al final del proceso combinado ( $\Delta E^*$ ) de manzana tratada con SAC69.

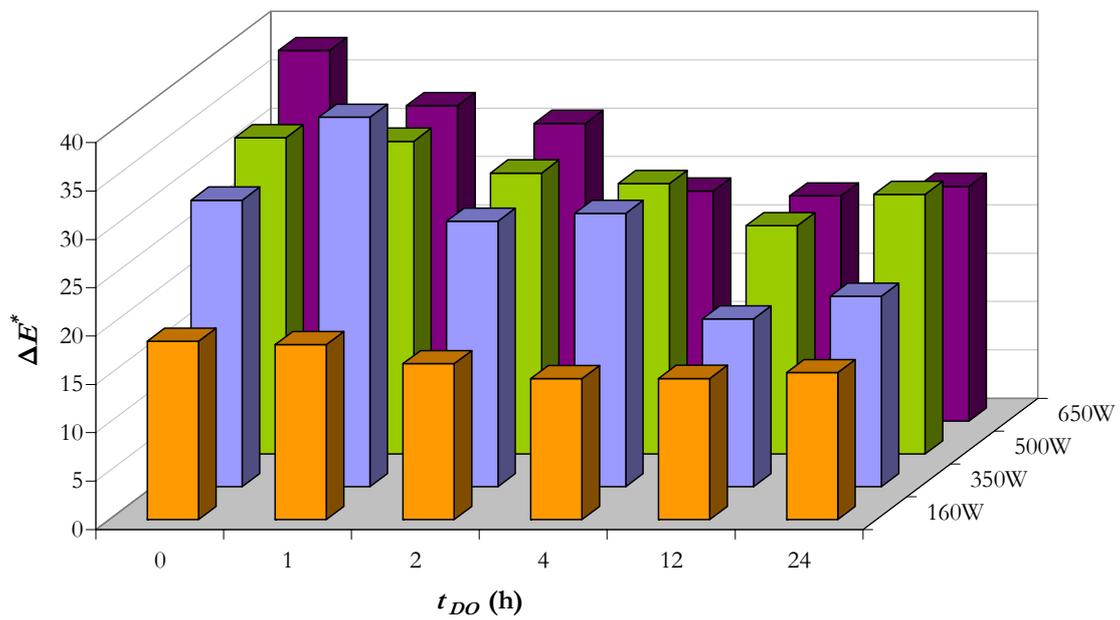
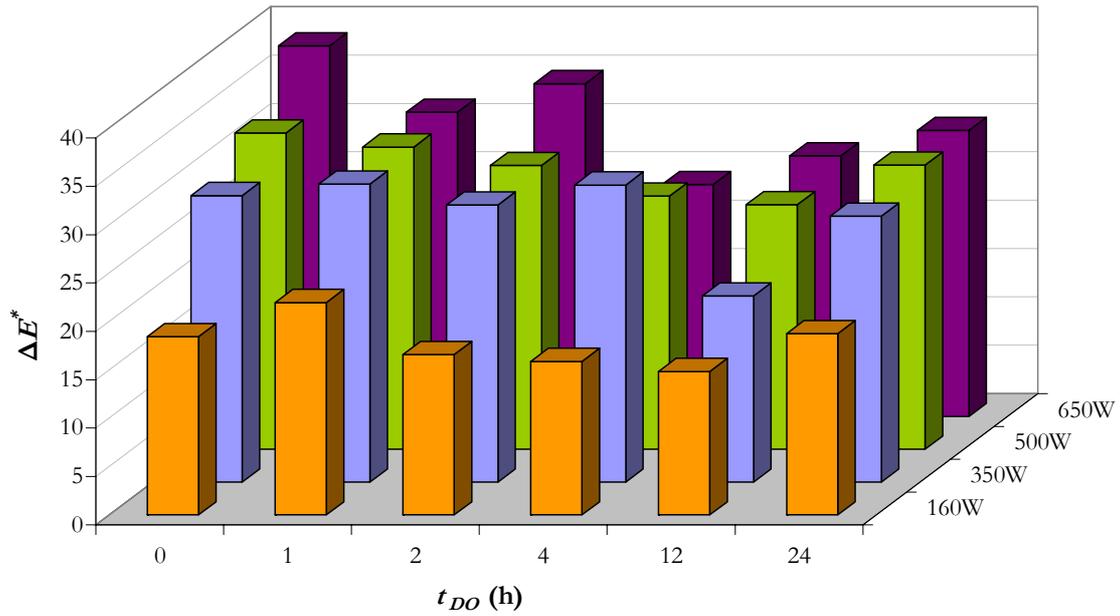


Figura 4.39 Variación total de color al final del proceso combinado ( $\Delta E^*$ ) de manzana tratada con XII47.



**Figura 4.40** Variación total de color al final del proceso combinado ( $\Delta E^*$ ) de manzana tratada con AAPM69.

En líneas generales: se obtuvieron los productos con mayor variación de color para tiempos cortos de DO y potencias altas.

Finalmente, es necesario resaltar que el color obtenido en las muestras (particularmente las secadas a potencia baja -160 W- e intermedia 350 W) si bien se aparta del color de la manzana fresca, no se aleja del color de los productos de manzana deshidratados conocidos. Por lo que la aplicación de los productos generados en este trabajo y desde el punto de vista del color, son absolutamente compatibles con los existentes en el mercado.

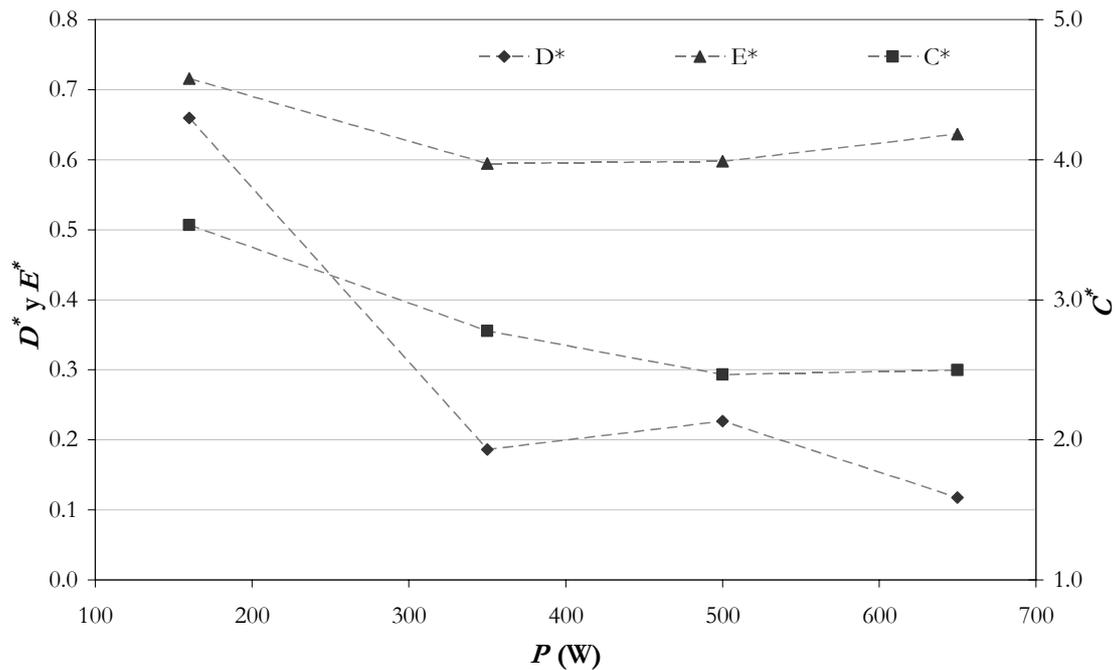
### 4.3.3 Variación de las propiedades mecánicas del proceso combinado

La variación en cualquiera de las propiedades mecánicas respecto de la fruta fresca, se calcula como una fracción de la propiedad correspondiente, según:

$$X^* = \frac{X_{DO-MO}}{X_0} \quad (4.1)$$

Donde:  $X_{DO-MO}$  es el valor de la propiedad evaluada (dureza, cohesividad o adhesividad) al final del proceso DO-MO y  $X_0$  es el valor correspondiente a la muestra fresca.

En la Figura 4.41 se ven las variaciones de las propiedades mecánicas de la manzana fresca-MO respecto del estado fresco: independientemente de la potencia de secado, se obtuvieron muestras más blandas, más cohesivas y menos elásticas que la manzana fresca, con una tendencia decreciente con la potencia (y muy leve para el caso de la elasticidad).

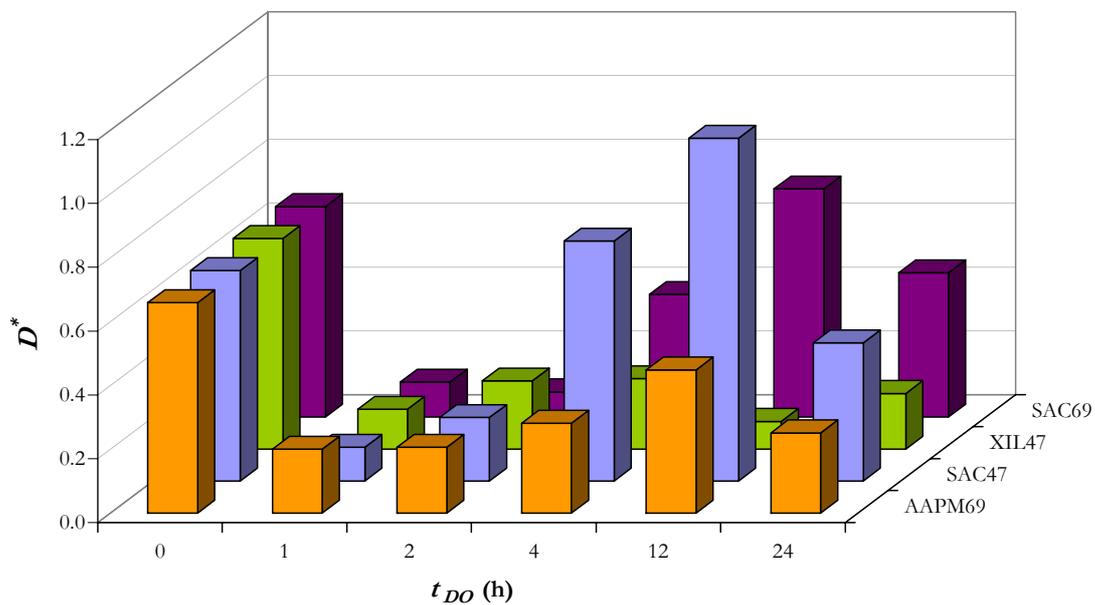


**Figura 4.41:** Variación de la Dureza, la Cohesividad y la Elasticidad de manzana sin DO durante el secado, en función de las diferentes potencias.

Cabe rescatar (tal como se verá en las observaciones macroscópicas), que el secado a baja potencia permitió una remoción de agua más uniforme y el resultado fue una matriz más homogénea. Sin embargo al aumentar la potencia, la remoción de agua fue más violenta y el

centro de la pieza (el más húmedo) se volvió el punto más caliente. Reflejo de esta observación fue la obtención de muestras “huecas” y “quemadas” en el centro, dando lugar a un producto “vacío” cuando se secó a altas potencias. Este hecho podría explicar la marcada disminución en la cohesividad y la dureza registrados para los sucesivos aumentos de  $P$ .

La respuesta de la manzana DO durante el secado fue diferente de la que presentó la manzana sin pretratamiento. Los resultados correspondientes se muestran en las Figuras 4.42 y 4.43.

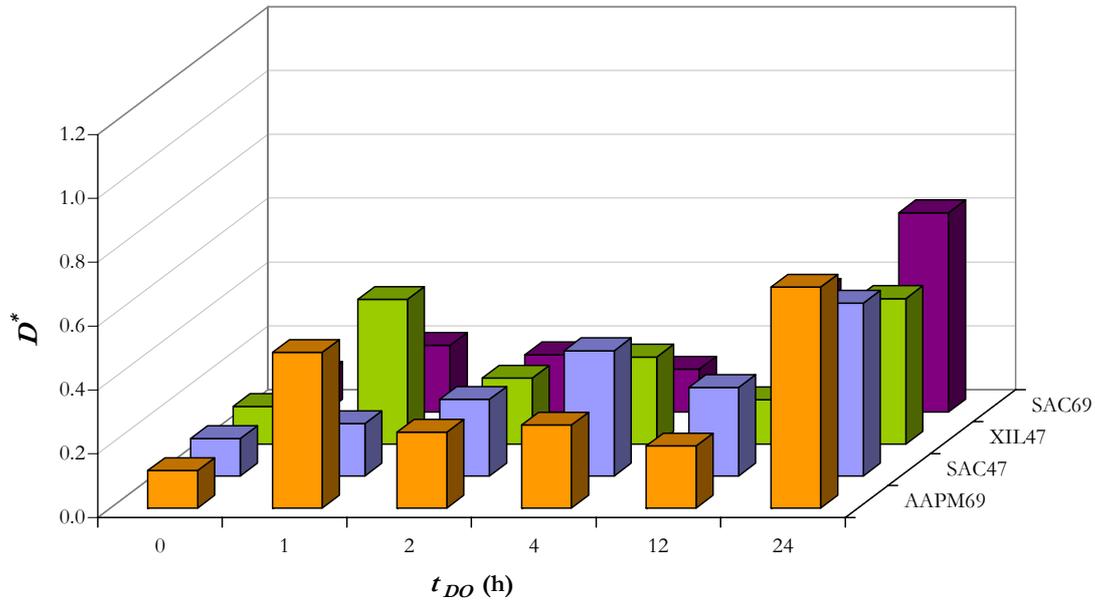


**Figura 4.42** Dureza al final del proceso combinado ( $D^*$ ) de manzana tratada con los diferentes solutos. Potencia de secado: 160 W.

A la potencia más baja de secado:

- Los productos DO con XIL47 y AAPM69, siempre fueron más blandos que la manzana fresca e inclusive, que la manzana fresca secada con MO. Es decir que, las modificaciones estructurales introducidas durante la DO, causantes del ablandamiento durante esa etapa preliminar, también se manifestaron al final del proceso combinado.
- Las soluciones SAC47 y SAC69 promovieron una disminución de la dureza hasta  $t_{DO} < 4$  h y luego, un aumento marcado para  $t_{DO} = 4$  y 12 h. Se puede atribuir esta

“recuperación de la dureza” a la presencia de sacarosa en la estructura, que alcanzó su mayor grado de incorporación en ese tiempo. Sin embargo, hacia el final del proceso, estos sólidos no habrían sido lo suficientemente efectivos como para anular los efectos de colapso estructural descritos para tiempos largos en el análisis de las micrografías (Capítulo 2).



**Figura 4.43** Dureza al final del proceso combinado ( $D^*$ ) de manzana tratada con los diferentes solutos. Potencia de secado: 650 W.

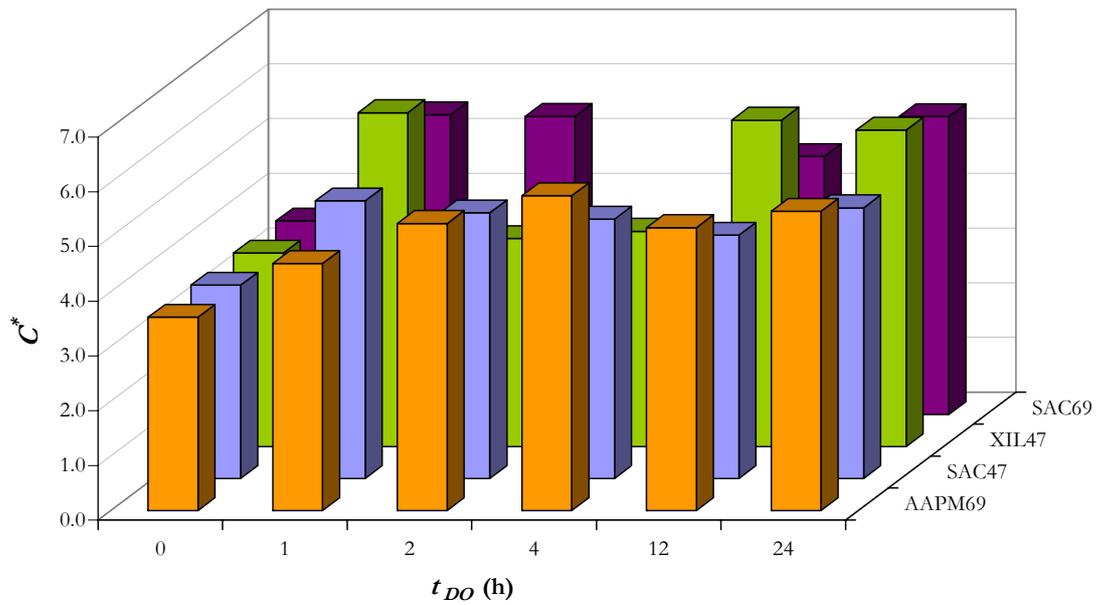
A la mayor potencia de secado, todos los solutos produjeron muestras más duras que la manzana secada sin DO. Sin embargo, se obtuvieron muestras más duras para tiempos de DO de 24 h.

En este caso, no es posible deducir una única variable responsable del endurecimiento a tiempos largos y potencia alta. Por esta razón, se puede proponer una contribución compleja de las diferentes variables sobre la dureza: tiempo de DO y su efecto sobre la estructura y densidad aparente de las muestras (encogimiento), incorporación de sólidos, la distribución inicial de agua y el tiempo de secado por MO (que define en parte la cantidad en la que se remueve el agua).

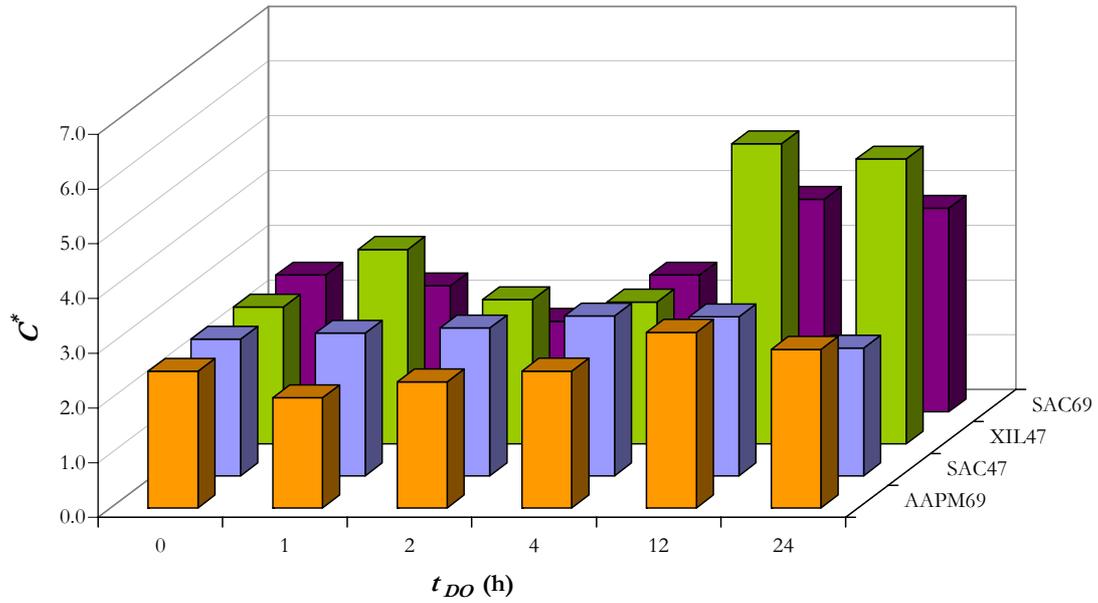
Conjuntamente, no se puede establecer una dependencia de la dureza con la potencia de trabajo, sobre todo a tiempo de DO de 24 h.

Por otro lado, independientemente de la potencia, todos los solutos promovieron muestras más cohesivas que la manzana fresca (Figuras 4.44 y 4.45).

En tanto que, para la potencia más baja no se observó una dependencia directa de la cohesividad con  $t_{DO}$  y para la potencia más alta, presentó un incremento leve para procesos largos de DO.

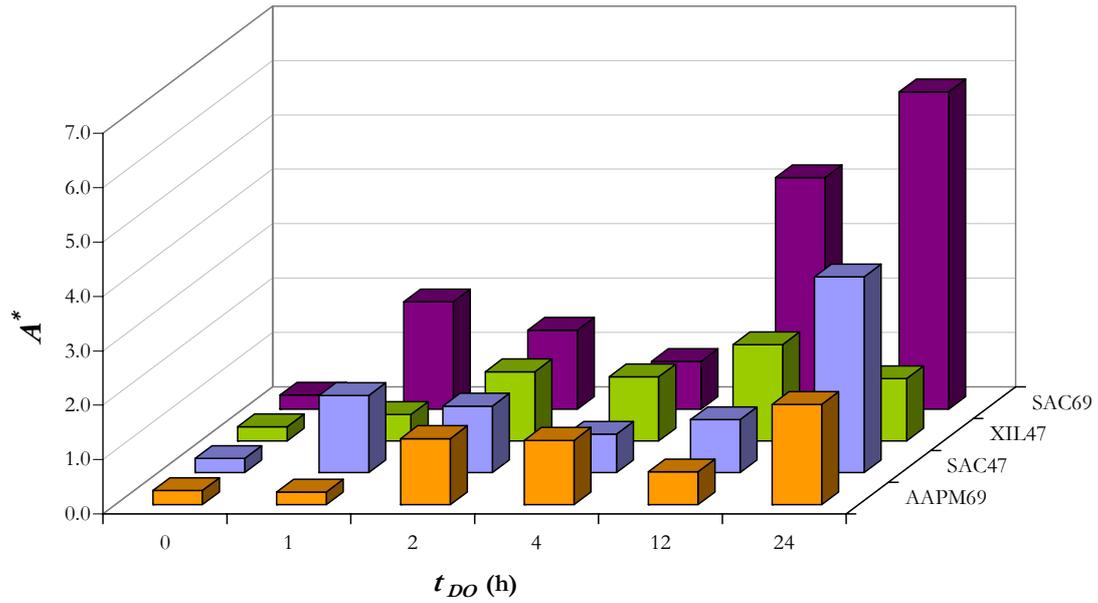


**Figura 4.44** Cohesividad al final del proceso combinado ( $C^*$ ) de manzana tratada con los diferentes solutos. Potencia de secado: 160 W.

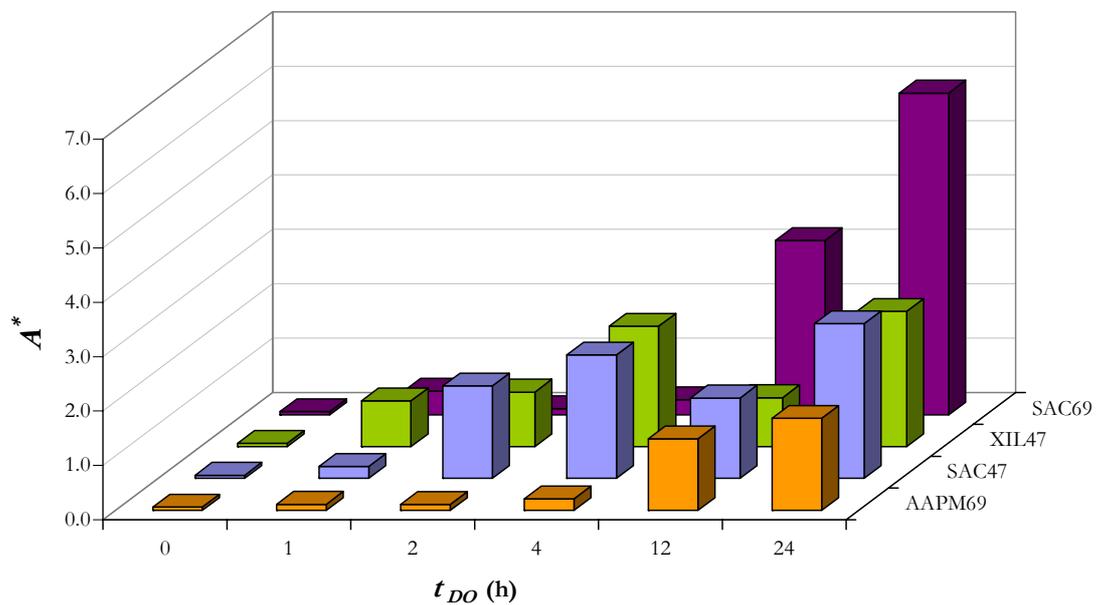


**Figura 4.45** Cohesividad al final del proceso combinado ( $C^*$ ) de manzana tratada con los diferentes solutos. Potencia de secado: 650 W.

Con respecto a la adhesividad, practicando un tratamiento de DO, se obtienen productos más adhesivos que los frescos secados y además (en líneas generales), más adhesivos que la manzana fresca cuando el  $t_{DO} \geq 12$  h y cuando se emplearon las soluciones de sacarosa (Figuras 4.46 y 4.47). No obstante, no fue posible establecer una relación clara entre la adhesividad y la potencia de secado.



**Figura 4.46** Adhesividad al final del proceso combinado ( $A^*$ ) de manzana tratada con los diferentes solutos. Potencia de secado: 160 W.



**Figura 4.47** Adhesividad al final del proceso combinado ( $A^*$ ) de manzana tratada con los diferentes solutos. Potencia de secado: 650 W.

A partir de estos resultados se ve que el secado acentuó el ablandamiento de los productos DO: todos los productos DO-MO fueron más blandos que la manzana fresca ( $D^* \leq 1$ ) y, por otro lado que, introducir una etapa de DO previo al secado a alta potencia permite obtener productos más duros que los secados sin pretratamiento.

Otro es el escenario cuando se trabaja a la potencia baja:

- Los productos tratados con XIL47 y con AAPM69 siempre fueron más blandos que aquellos obtenidos por secado sin DO previa.
- Los productos resultantes de la DO con las soluciones de sacarosa, deshidratados menos de 4 horas y más de 12 horas son más blandos que los secados sin DO, en tanto que los tratados 4-12 horas fueron más duros.

Se podría inferir un efecto “reforzador” de la sacarosa impregnada, ya que las muestras que mayor cantidad de soluto incorporaron durante la DO, mostraron una recuperación de la dureza durante el secado a la potencia más baja ( $t_{DO} = 12$  h). Para un aumento de la potencia, todos los solutos produjeron muestras más duras que la manzana sin DO

Por otro lado, introducir a la DO como etapa preliminar de un proceso combinado con microondas, permitiría obtener alimentos más cohesivos que los que fueron secados sin haber tenido pretratamiento, y más aún, cuanto menor es la potencia de secado y mayor fue el  $t_{DO}$ .

Finalmente, poniendo foco sobre la adhesividad: se obtuvieron productos de manzana más adhesivos que la manzana MO (sin DO) cuando se utilizaron las soluciones de sacarosa y para  $t_{DO} \geq 12$  h.

Comparando entre los diferentes solutos: a tiempos largos de DO (12 y 24 h) se obtuvieron los productos DO más duros, y los más adhesivos (y consecuentemente, más gomosos que los frescos inclusive) cuando se trabajó con las soluciones de sacarosa.

De lo expuesto, se podría suponer que debido a las transformaciones sufridas durante la DO (incorporación de sólidos y eliminación de agua), la matriz resultante se va endureciendo durante una etapa posterior de secado, de hecho, la dureza perdida durante la DO se recupera durante el secado.

Dentro del mismo análisis cabe considerar la naturaleza del soluto: el xilitol también se habría incorporado a la estructura y aún en cantidades mayores que las soluciones de

sacarosa, la remoción de agua fue intermedia entre las obtenidas para las soluciones de sacarosa y sin embargo, no consiguió ese efecto de reforzar la estructura conseguido por el disacárido.

Por lo tanto, la recuperación de la dureza durante el secado por MO gracias a este efecto “reforzador” no solamente depende de la cantidad de soluto incorporado sino de la naturaleza de este soluto.

#### 4.3.4 Composición calórica de los productos al final del proceso combinado

El contenido calórico final de los productos luego del proceso combinado fue muy similar entre ellos, aunque resultaron levemente más calóricos los obtenidos a partir de SAC69 y levemente menos calóricos, los resultantes de la DO con XIL47 -una diferencia menor al 3% para cualquier  $t_{DO}$ - (Figura 4.48).

Del mismo modo, es necesario recordar que el xilitol tiene igual poder endulzante que la sacarosa, por lo tanto, los productos de XIL47 serían más dulces que los obtenidos con SAC69, debido a que con XIL47 se obtuvieron mayores valores de  $SG$  para todo tiempo de DO. En cualquier caso, el contenido calórico oscila entre 70 y 75 calorías/100 gramos de producto. A partir de aquí se puede inferir que utilizando xilitol, es posible obtener un producto con igual dulzor que el obtenido con sacarosa pero de menor contenido calórico.

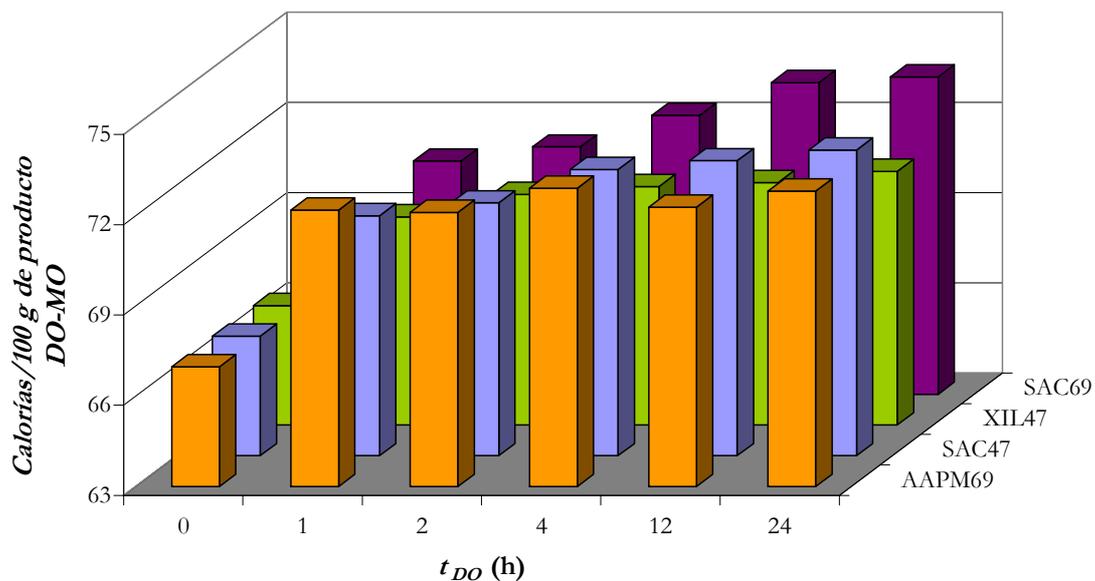


Figura 4.48: Aporte calórico de los productos obtenidos con DO-MO.

Estos alimentos así desarrollados pueden incorporarse a diferentes preparaciones o ser consumidos solos directamente. Los *snacks* de fruta que actualmente se comercializan (aunque no en el mercado local) incluyen materia grasa o cantidades de azúcares agregadas que los hacen altamente calóricos (Tabla 4.2).

Todos estos productos contienen aproximadamente el doble de calorías que los obtenidos con DO-MO y (cualitativamente) el aspecto es inferior.

**Tabla 4.2** Información de productos comerciales (*snacks*) a base de manzana.

Producto (referencia)	Descripción del producto	Contenido calórico (cal/100g)
Sensible Foods Organic Crunch Dried Snacks- Apple Harvest.	Orgánico, sin aditivos.	380
Beulah, Apple Products.	Sin aditivos ni azúcar agregada.	340
Bare Fruit 100% Organic Bake-Dried Cinnamon Apple Chips.	Orgánico, sin aditivos ni azúcar agregada. Horneadas.	240
Bare Fruit 100% Organic Bake-Dried Granny Smith Apple Chips.	Orgánico, sin aditivos ni azúcar agregada. Horneadas.	240
FastFruit – Apple Chips.	Horneadas.	364
Seneca Apple Chips	Contiene aceite de canola y azúcares agregados.	140
Good Health Natural Products – Apple Chips	Contiene aceite de girasol y de canela, jarabe de maíz, ácido cítrico y ácido ascórbico.	500

La información nutricional y detalles de la formulación fueron obtenidos de las páginas web de los productos o, en su defecto, de sitios de Internet que los comercializan.

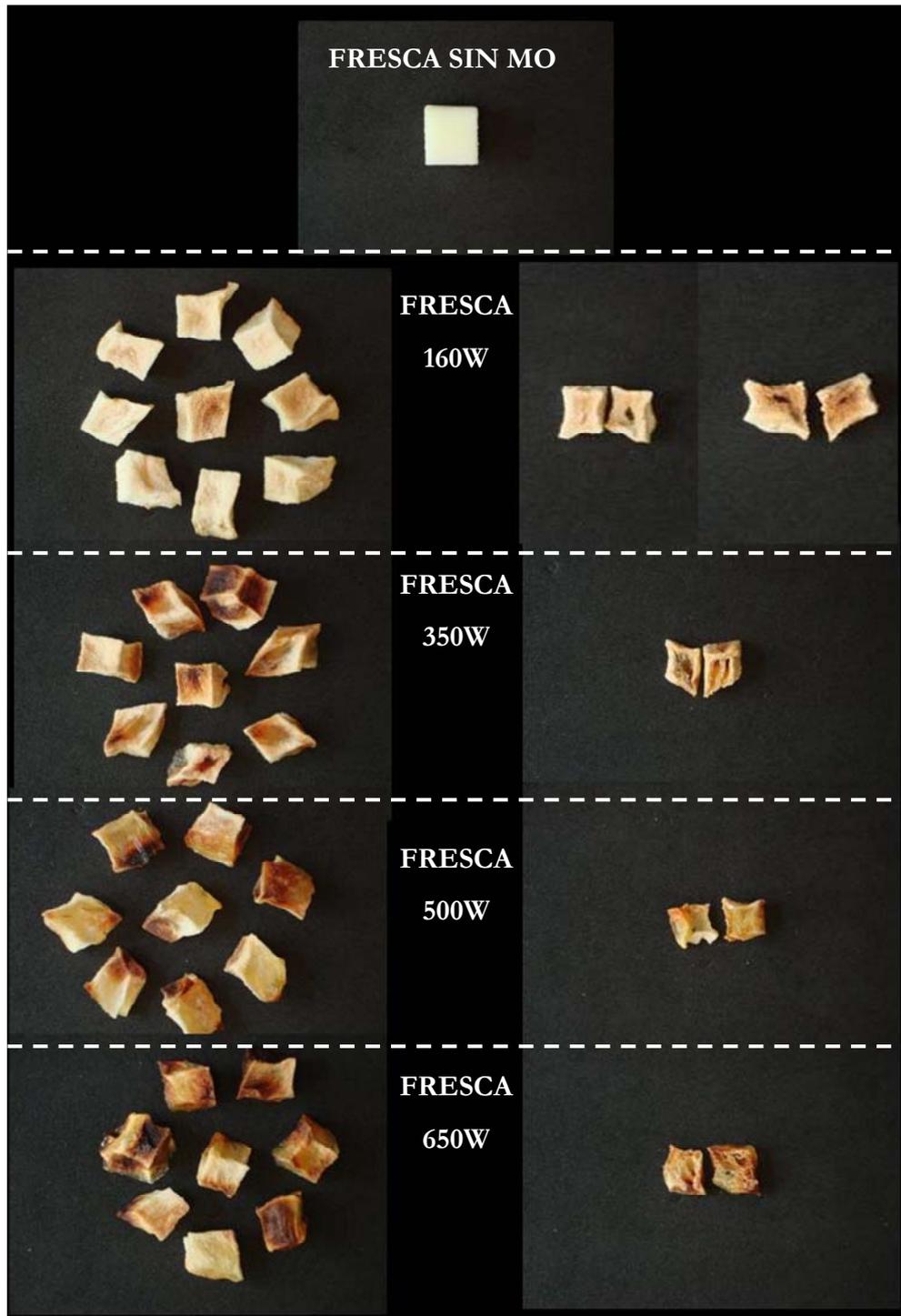
#### **4.3.5 Observaciones macroscópicas de los productos finales**

Conjuntamente con los cambios descriptos de color y de las propiedades mecánicas en las muestras DO-MO, se realizaron observaciones macroscópicas para complementar la información referida a la calidad de alimento.

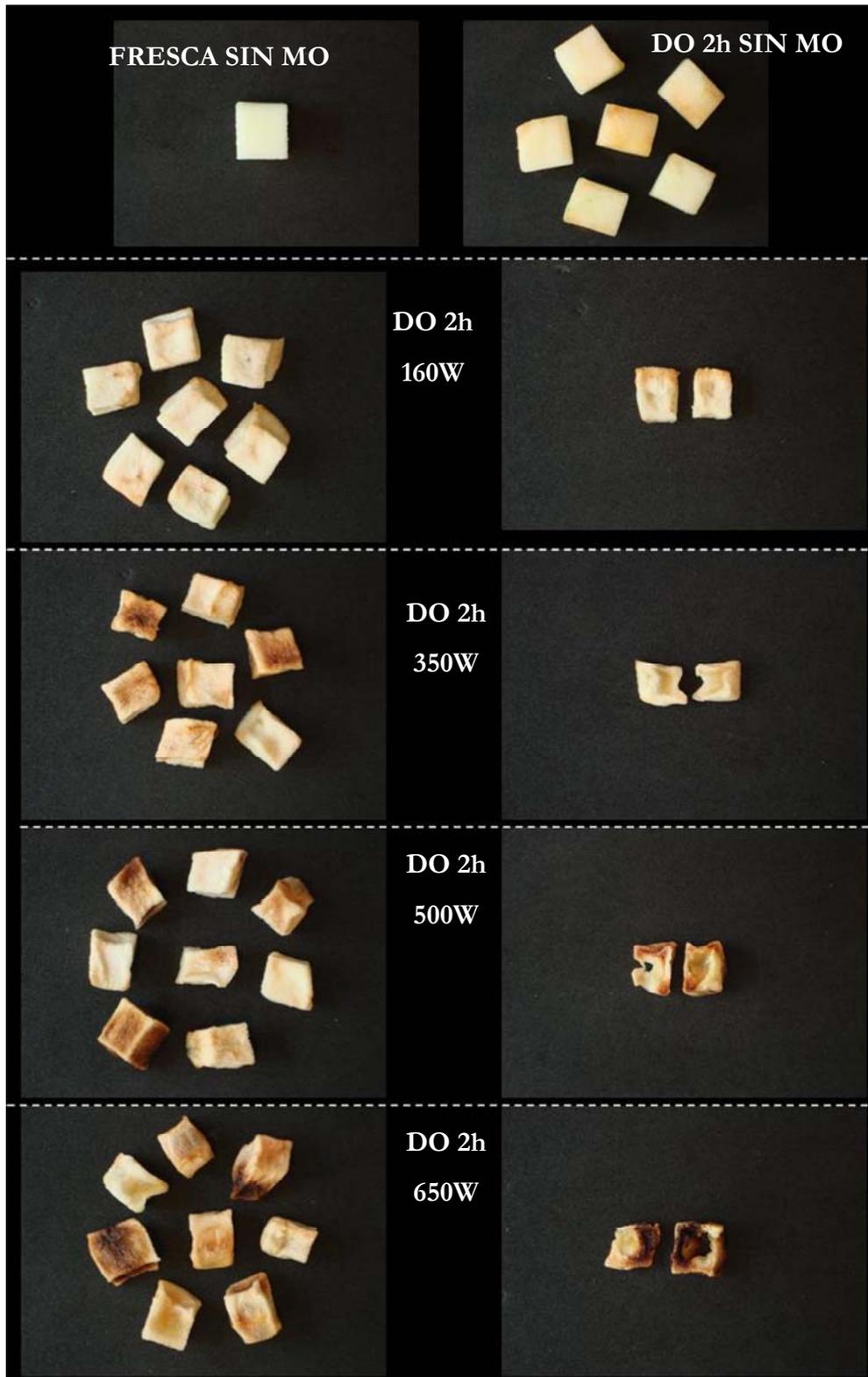
En la Galería de Imágenes 4.1 se muestran las sucesivas transformaciones de la manzana fresca (sin DO), al secarse por MO a diferentes niveles de potencia. En la columna izquierda se presentan las muestras enteras (observación superficial) y en la columna derecha, muestras que fueron seccionadas transversalmente (observación del interior).

Se puede ver que el secado provocó el encogimiento y deformación de las muestras: las aristas se curvaron y las caras se hundieron hacia el centro. Cuando el secado se realizó a potencia baja e intermedia (160 y 350 W) las aristas se observaron algo más secas y más claras que los centros de las caras. Al efectuar un corte transversal, se vio un centro levemente más oscuro y una estructura alveolar (esponjosa). En la potencia baja, se formó un alvéolo central y alrededor el tejido seco esponjoso. A medida que aumentó la potencia, los alvéolos fueron más grandes y ocuparon todo el interior de las muestras.

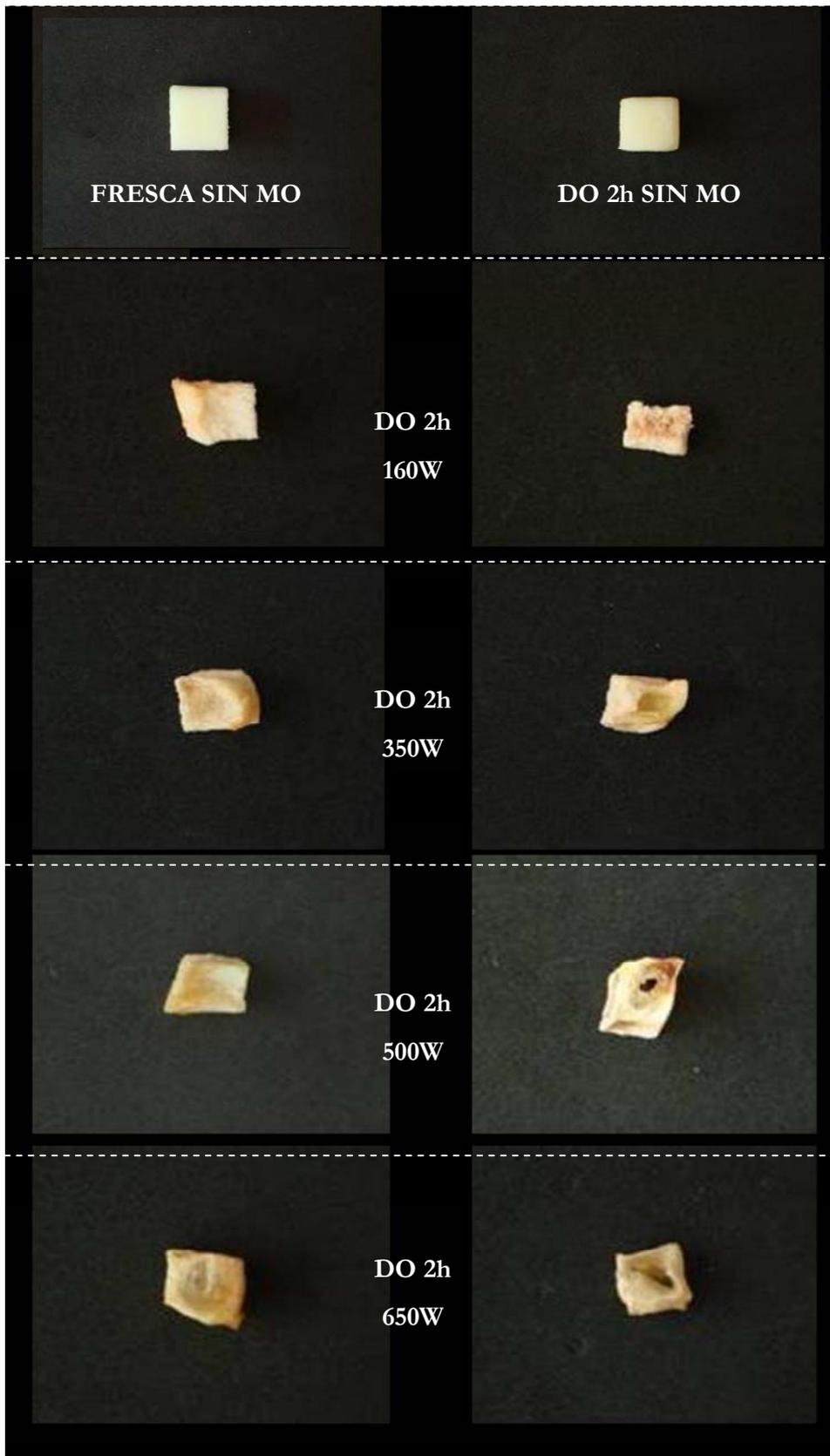
Es decir que al secar la manzana sin pretratamiento (fresca) con MO, se obtuvo ya desde el nivel más bajo de potencia, una estructura interior “abierta” y además, el aumento de potencia generó alvéolos cada vez más grandes.



Galería de Imágenes 4.1 Manzana sin DO, secada con MO utilizando diferentes potencias. Columna izquierda: muestras enteras; columna derecha: muestras cortadas transversalmente.



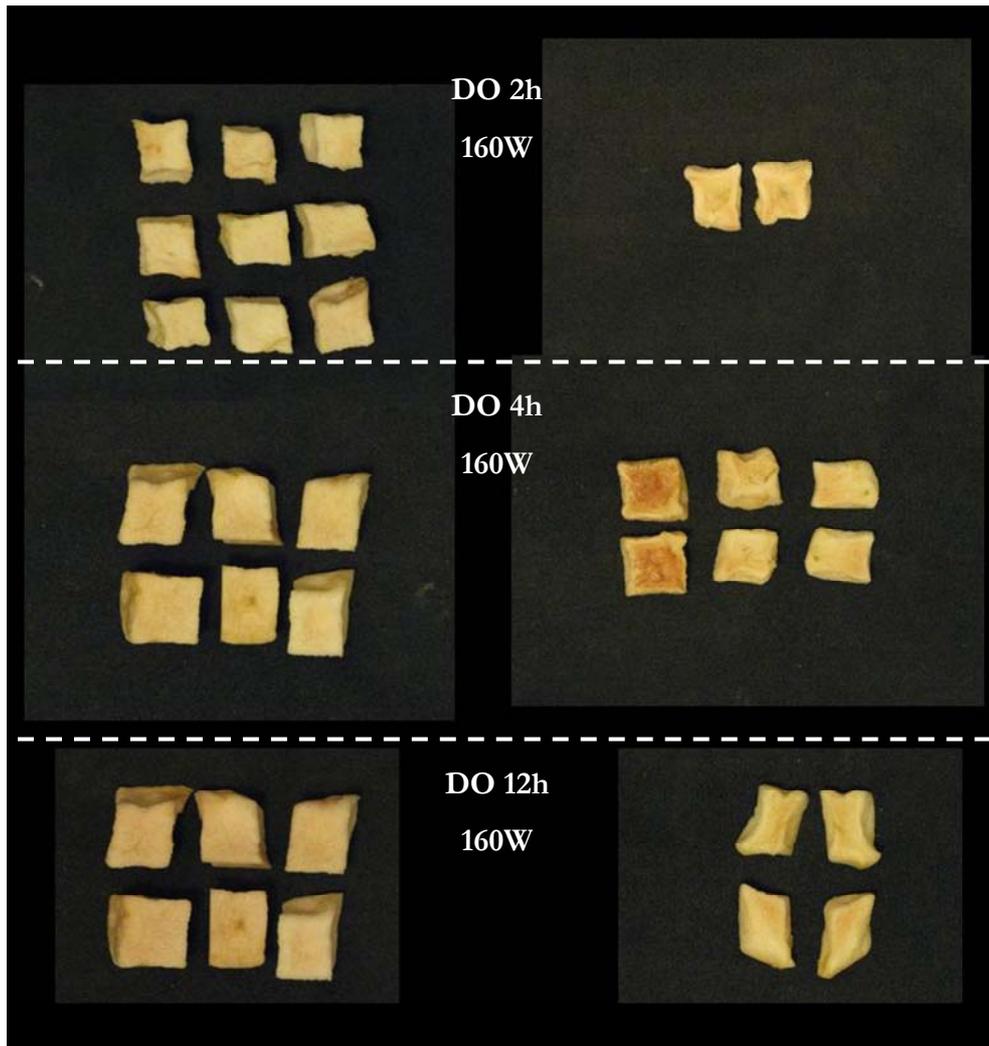
Galería de Imágenes 4.2 Manzana sin DO; Manzana DO 2 h con XIL47 (sin MO); Manzana DO 2 h con XIL47 y MO con diferentes potencias. Columna izquierda: muestras enteras.; columna derecha: muestras cortadas transversalmente.



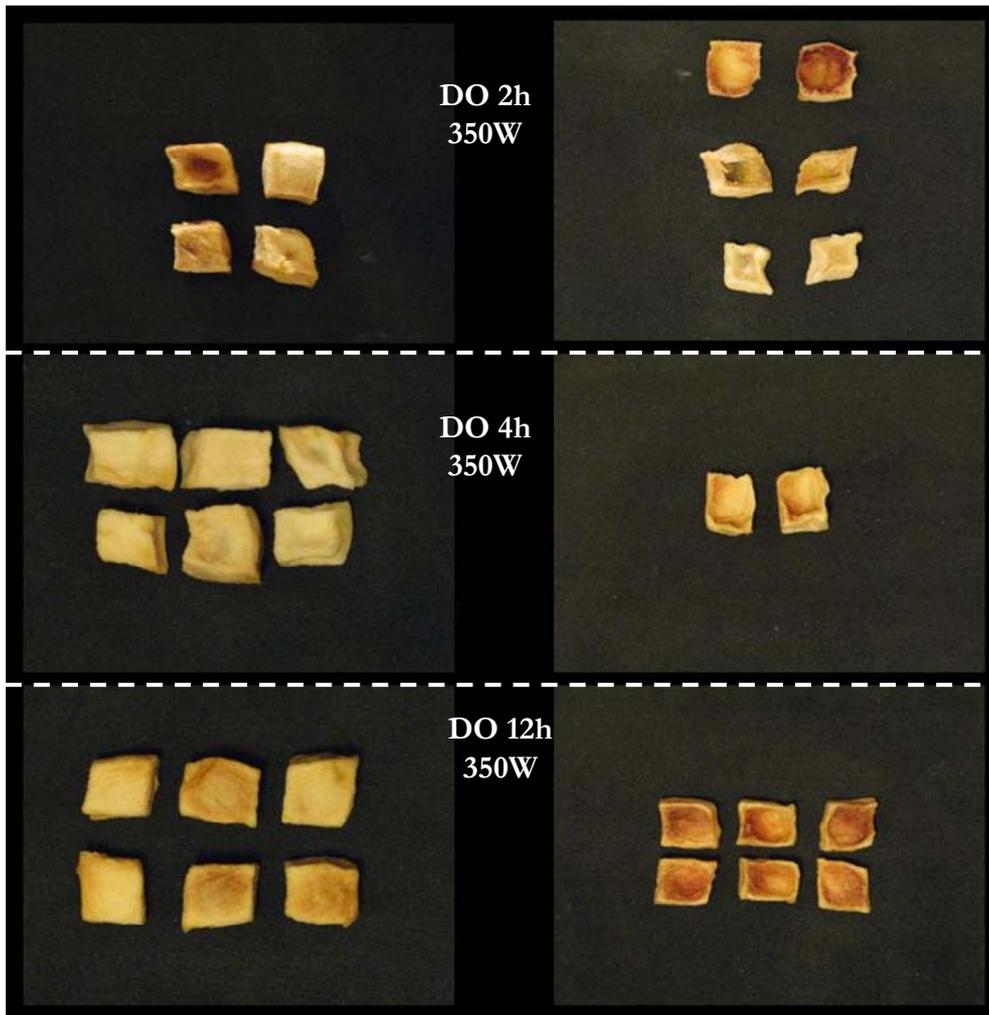
**Galería de Imágenes 4.3** Manzana sin DO; Manzana DO 2 h con AAPM69 (sin MO); Manzana DO 2 h con AAPM69 y MO con diferentes potencias. Columna izquierda: muestras enteras.; columna derecha: muestras cortadas transversalmente.

Por otro lado, la introducción de la DO retardó la formación de los alvéolos o, dicho de otra forma, aplicar el pretratamiento permite obtener muestras “macizas” o “alveolares” dependiendo de la potencia. Es así que, los productos resultantes del nivel de potencia más bajo fueron macizos (con alvéolos uniformemente distribuidos en el volumen) y los correspondientes a potencias más altas, presentaron alvéolos cada vez más grandes y menos uniformes al aumentar la potencia. Asimismo, para potencias altas se registró el adelgazamiento de las paredes (incluso transparentes) y una capa de tejido “pastoso” entre la pared seca y el centro hueco. Estas observaciones se correlacionan con la Galería de Imágenes 4.2 resultante de DO 2 h con XIL47 y con la Galería 4.3 resultante de DO 2 h utilizando AAPM69.

Analizando lo ocurrido al trabajar con SAC69, independientemente del  $t_{DO}$ , emplear la potencia más baja dio lugar a muestras DO macizas (Galería de Imágenes 4.4) y, utilizar  $P=350$  W, generó muestras huecas pero de paredes gruesas y secas (Galería de Imágenes 4.5). En este sentido SAC69 se diferenció del resto de las soluciones, las que dejaban una capa de tejido húmedo inmediatamente debajo del exterior seco, indicando un secado no uniforme. También se podría intuir que la sacarosa consiguió “reforzar” la estructura. Del mismo modo, estas observaciones permitirían comprender el aumento de la dureza de las muestras deshidratadas con la solución SAC69 a tiempos largos.



Galería de Imágenes 4.4 Manzana DO con SAC69 durante 2 h, 4 h y 12 h, secadas con MO a 160 W.



Galería de Imágenes 4.5 Manzana DO con SAC69 durante 2 h, 4 h y 12 h, secadas con MO a 350 W.

#### **4.4 CONCLUSIONES**

Para un mismo  $t_{DO}$ , a mayor potencia de microondas menor es el tiempo de secado. Por otra parte, en líneas generales, cuando se trabaja a una misma potencia el  $t_s$  disminuye con el tiempo de pretratamiento. Sin embargo cuando la fuerza impulsora del secado no es tan intensa (potencia baja), quien tiene más peso en la duración del proceso global es la DO ( $t_{DO}$  es la variable que gobierna la duración del proceso global). Específicamente entre las 4 y las 12 horas de DO, se formaría una costra superficial compuesta por azúcares que aumentaría la resistencia de la estructura a la difusión en esa zona del producto, dificultando la salida de agua hacia el exterior y, por lo tanto aumentando el tiempo de secado.

Al igual que en el secado tradicional (por aire caliente), la cinética de secado presenta una tendencia exponencial negativa. La potencia de MO aumenta la velocidad de secado del producto, la que también se ve influenciada por los cambios en los tejidos y en la composición que imprimió la DO en el alimento.

La velocidad de secado es mayor cuanto mayor es la potencia, independientemente de la duración de la DO. Además, de las curvas de secado se deduce que la DO modifica la duración del período inicial del secado, es decir, el precalentamiento: a menor  $t_{DO}$ , mayor precalentamiento. Sin embargo para cualquier potencia, una vez alcanzada la velocidad máxima de secado, todas las curvas de secado correspondientes al mismo soluto, se agrupan en una única curva.

El color de los productos sometidos al proceso combinado, depende de cuatro factores: concentración de agua, concentración de sólidos en superficie, duración del secado y potencia de secado. En líneas generales, se obtuvieron los productos con mayor variación de color para tiempos cortos de DO y potencias altas. Esto marca el efecto de “desplazamiento del oxígeno” que promoverían los sólidos que se incorporarían más tardíamente. Además, salvo en el caso de las muestras tratadas con SAC69, siempre resultaría conveniente incorporar una etapa de DO como pretratamiento, ya que la manzana secada sin DO, experimentó el mayor cambio de color independientemente de la potencia de trabajo.

Finalmente, es necesario resaltar que el color obtenido en las muestras (particularmente las secadas a potencia baja -160 W- e intermedia 350 W) si bien se aparta del color de la manzana fresca, no se aleja del color de los productos de manzana deshidratados comerciales. Por lo que la aplicación de los productos generados en este trabajo y desde el punto de vista del color, son absolutamente compatibles con los existentes en el mercado.

En otro aspecto, la implementación de xilitol como deshidratante permite obtener los productos menos calóricos, sin embargo no mucho menos que los restantes, es decir que la selección del xilitol como edulcorante no es en este aspecto decisivo si el objetivo es obtener un producto “reducido en calorías”. Aunque cabe resaltar que los productos obtenidos con xilitol son más dulces.

Conjuntamente, a partir de los cortes transversales de las muestras, se ve que si bien en todos los productos se alcanzó la actividad acuosa objetivo, la estructura interna fue diferente entre las muestras con y sin DO y de acuerdo con la potencia utilizada. Así, la manzana sin DO presenta un interior hueco aunque la potencia de MO sea baja, en tanto que, al incorporar la DO se abren dos caminos alternativos:

- DO y potencia baja (160 W), genera productos macizos con cierto patrón alveolar uniforme.
- DO y potencias altas, da lugar a productos huecos. Tanto más huecos y con mayores señales de daño térmico (quemados) cuanto mayor es la potencia de secado. Particularmente, para  $P= 350$  W, los productos fueron huecos y mostraron un aspecto aceptable.

La dureza, cohesividad y adhesividad entre ambos tipos de productos no presentaron una diferencia marcada en estos casos.

Adicionalmente, es posible desarrollar productos huecos y de paredes gruesas y secas a partir de la solución de SAC69 y potencias intermedias. Esto no se consigue con el resto de las soluciones, las que no promueven paredes gruesas y secas, sino paredes formadas por una capa delgada seca y una capa pastosa inmediatamente debajo.

## **CAPÍTULO 5**

# **PROCESO COMBINADO: DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA Y SECADO POR MICROONDAS ASISTIDO POR AIRE CALIENTE**

### **5.1 INTRODUCCIÓN**

En los capítulos anteriores fue extensamente descrito el efecto del secado convectivo aplicado sobre los productos DO y su contribución a la formación de una costra de baja conductividad térmica, que dificultaría la transferencia de calor, además de la de materia.

Por otro lado, también se mencionó la habilidad que tendría el secado por microondas para remover el agua de los alimentos sin el inconveniente de la formación de costra registrado en el SAC, y esa fue una de las razones por las que en este trabajo se eligió al secado por microondas como técnica complementaria a la DO.

Sin embargo, en esta misma tesis se vio que durante el secado por MO también se manifiesta la presencia de la costra dificultando la remoción del agua: particularmente el efecto de la costra se revela a potencias bajas.

Por lo tanto, las MO pierden -al menos relativamente- esta habilidad cuando previamente se incorpora una etapa de DO que dio lugar a la acumulación de sólidos a nivel superficial.

En este contexto es válido preguntarnos si una corriente de aire convectiva ayudaría a atenuar la resistencia de la costra durante el secado por microondas. La hipótesis propuesta en este caso consiste en que la corriente de aire actúa a nivel superficial removiendo la humedad de las capas externas del producto y generando mayores gradientes de concentración de agua y, simultáneamente, las microondas lo hacen en las zonas más húmedas (centro de la pieza).

Planteadas ya la hipótesis de trabajo que guía esta sección particular, es necesario recordar que en el Capítulo 4 se identificaron las condiciones de DO-MO que promueven dos clases de productos característicos: macizos y huecos. Por lo tanto, el objetivo de este capítulo fue

comprender si sumar una corriente de aire convectiva al secado por MO disminuye la resistencia a la transferencia de materia generada por la costra de sólidos formada durante la DO. Además, se evaluó la calidad de dichos productos y su comportamiento en una aplicación habitual (rehidratación).

Es importante resaltar que el estudio se enfocó sobre las microondas que estuvieron asistidas por aire caliente (MO-SAC) y no al revés.

## 5.2 MATERIALES Y MÉTODOS

Para este análisis se utilizó como agente deshidratante a la solución de sacarosa más concentrada (SAC69), porque:

- Removió la mayor cantidad de agua en el proceso de DO.
- Promovió variaciones de color similares al resto de los productos a tiempos bajos ( $t_{DO} \leq 1$  h) y a tiempos largos de DO ( $t_{DO} \geq 12$  h), en tanto que a tiempos intermedios ( $t_{DO} = 2-4$  h) condujo a los mayores cambios de  $\Delta E$  (pero ampliamente aceptables).
- Permitió obtener productos con un rango extenso de propiedades mecánicas: blandos a tiempos cortos de DO y duros a tiempos largos.
- El contenido calórico de los productos no difiere significativamente del obtenido con el resto de los solutos.
- Su costo es el más bajo (mucho más respecto del xilitol) y su utilización es sencilla (mucho más que la de la solución de AAPM) y es uno de los solutos más estudiados a nivel de investigación.
- Y fundamentalmente, porque se adapta al objetivo de obtener las dos clases de productos mencionados: independientemente del  $t_{DO}$ , a potencias bajas promueve productos macizos y a potencias intermedias, huecos de paredes gruesas y humedad uniforme.

La deshidratación osmótica se realizó bajo las mismas condiciones descritas en el Capítulo 2 (tamaño de las piezas,  $T_{DO} = 30$  °C; tiempos de contacto fruta-solución: 1, 2, 4, 12 y 24 h). Asimismo, las mediciones de  $a_w$ , humedad, color y propiedades mecánicas, y las observaciones macroscópicas, se realizaron según lo detallado en ese mismo capítulo.

Las potencias de trabajo seleccionadas fueron: 160 W (para obtener los productos macizos) y 350 W (para obtener los productos huecos).

El secado combinado MO-SAC se realizó en el mismo equipo que el secado por MO (de manera de no sumar a la geometría de los equipos como otra variable del desarrollo de este

trabajo). La temperatura de la corriente de aire caliente fue 75 °C y su velocidad, 0.5-0.6 m/s (anemómetro de paleta SOLOMAT MPM 2000, Reino Unido).

Estas configuraciones de potencia de microondas y temperatura de la corriente de aire son propias del equipo de microondas utilizado.

### **5.2.1 Análisis complementarios**

#### **Medición de densidad aparente**

La densidad aparente de las muestras se midió utilizando el método de desplazamiento de semillas (mijo). Las muestras DO-MO se pesaron al final del proceso y se procedió a la determinación de su densidad aparente.

#### **Análisis del coeficiente de rehidratación**

Entendiendo que una posible aplicación de los productos obtenidos sería formar parte de un cereal de desayuno, se evaluó la rehidratación sumergiendo muestras -de peso conocido- en leche descremada a temperatura ambiente (marca: Las Tres Niñas. Composición (g)/100ml: carbohidratos, 4.8; proteínas, 3; grasas, 3). A diferentes intervalos de tiempo, las muestras se retiraron del líquido, se secaron suavemente con papel absorbente y se pesaron. La evolución de la rehidratación se describió a través del coeficiente de rehidratación (CR), que se calcula según:

$$CR = m_R / m_0$$

Donde,  $m_R$  (g) es el peso de la muestra rehidratada durante un tiempo  $t_R$  y  $m_0$  (g) es el peso de la muestra sin rehidratar.

## 5.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

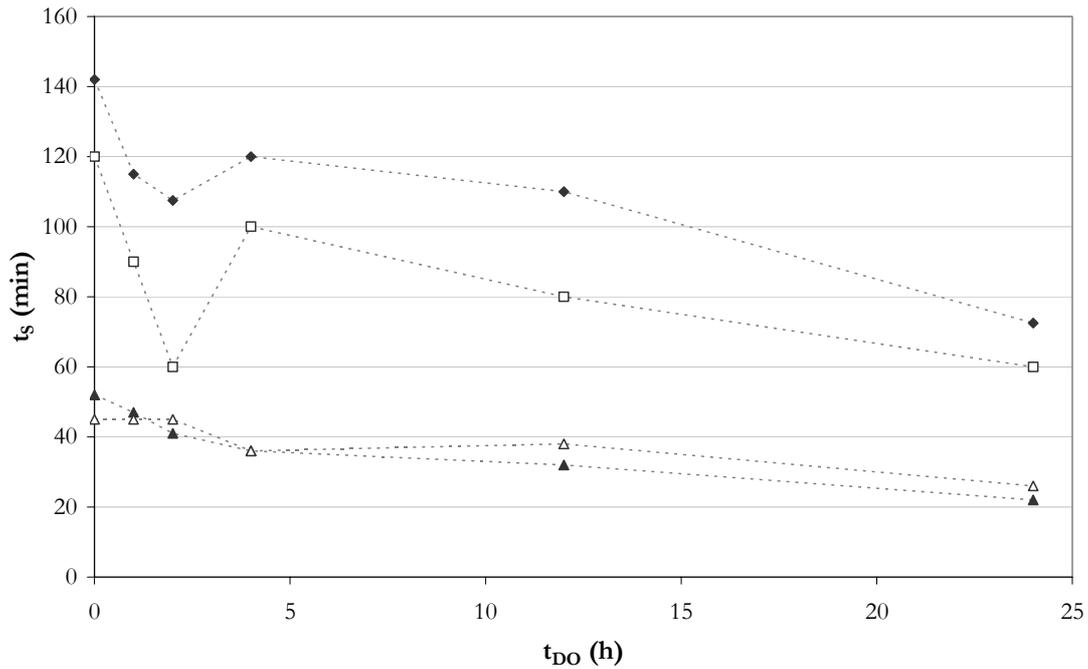
### 5.3.1 Transferencia de materia

En la Figura 5.1 se presentan los tiempos de secado correspondientes a los procesos de secado con MO y con MO-SAC, a las dos potencias de microondas seleccionadas (160 y 350 W). Se puede ver que a la potencia más baja de trabajo (160 W), los tiempos de secado obtenidos con MO-SAC son menores que los correspondientes a MO, es decir que la remoción de agua es más efectiva cuando se asocia una corriente de aire: MO-SAC consiguió procesos al menos 15% más cortos que MO para cualquier tiempo de DO. Además, con MO-SAC también se registró una disminución de los tiempos de secado hasta  $t_{DO}=2$  h, un aumento hacia las 4 h y un posterior descenso. Esta conducta es similar a la discutida para MO en el Capítulo anterior, que da cuenta de la formación de una costra a las 4 h de DO y conformaría una resistencia interna para la difusión de agua.

También se ve que para  $t_{DO}=2$  h, cuando la costra no estaría tan consolidada como a las 4 h y cuando además, el nivel de desintegración estructural no sería tan marcado, la presencia de la convección forzada permitió acortar los tiempos de secado considerablemente. Precisamente, para  $t_{DO}=2$  h se registró la mayor diferencia entre ambas tecnologías: MO-SAC removió la misma cantidad de agua que MO en el 44% del tiempo.

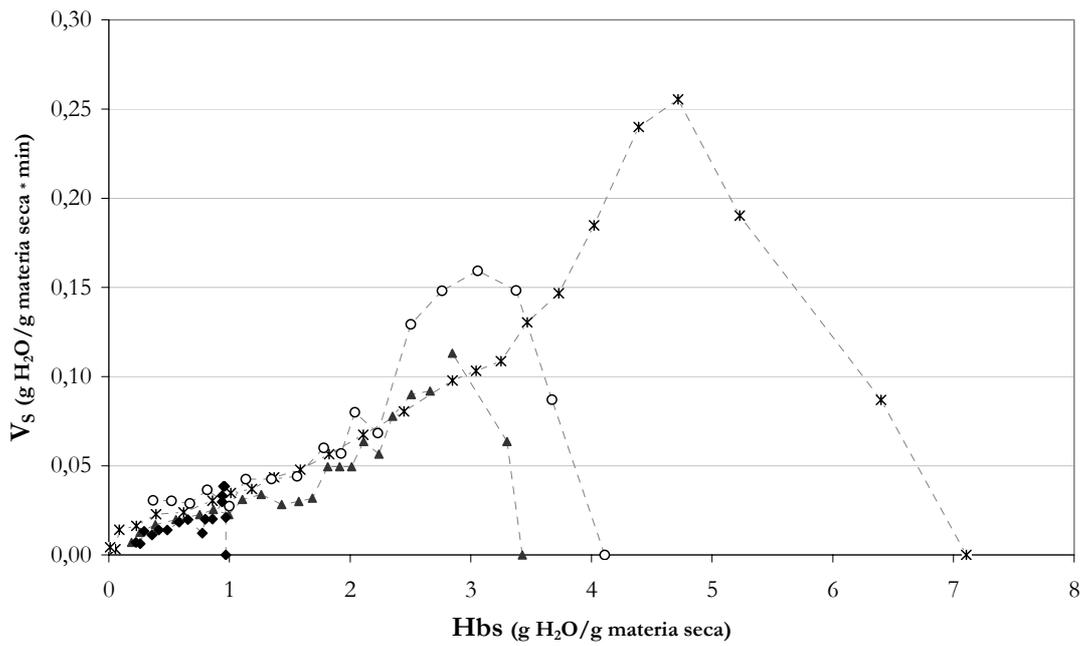
Otro es el escenario cuando se trabajó con la potencia 350 W: la adición del secado convectivo no promueve procesos más cortos. Estas observaciones revelan que para un nivel de potencia como el descrito (que en todo nuestro análisis calificaría como una potencia intermedia), el mecanismo gobernante de la transferencia de materia es el secado por microondas, lo que podría atribuirse a la generación de una presión de vapor suficiente como para vencer las resistencias estructurales: formación de costra y colapso de la matriz que obstaculizarían la difusión del agua.

Desde otro punto de vista y sólo considerando la duración del secado, trabajando a la potencia intermedia, sumar un aporte convectivo a las microondas no presenta ventajas adicionales.

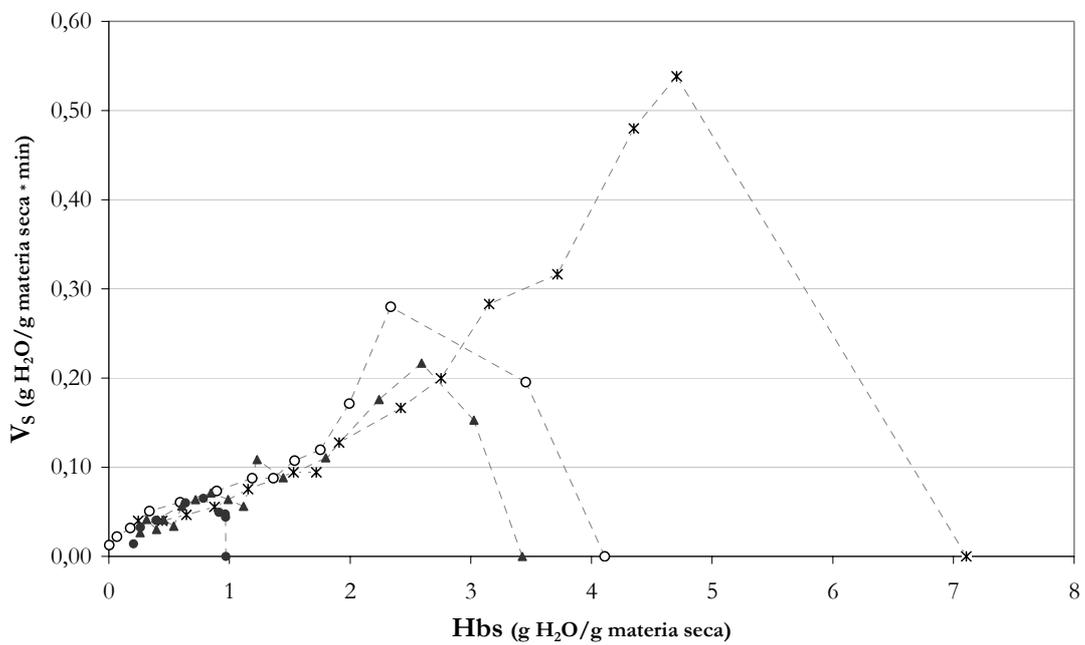


**Figura 5.1** Tiempo de secado ( $t_s$ ) en función del tiempo de DO. Solución deshidratante: SAC69. ( $\blacklozenge$ ) MO, 160 W; ( $\square$ ) MO-SAC, 160 W; ( $\blacktriangle$ ) MO, 350 W; ( $\triangle$ ) MO-SAC, 350 W.

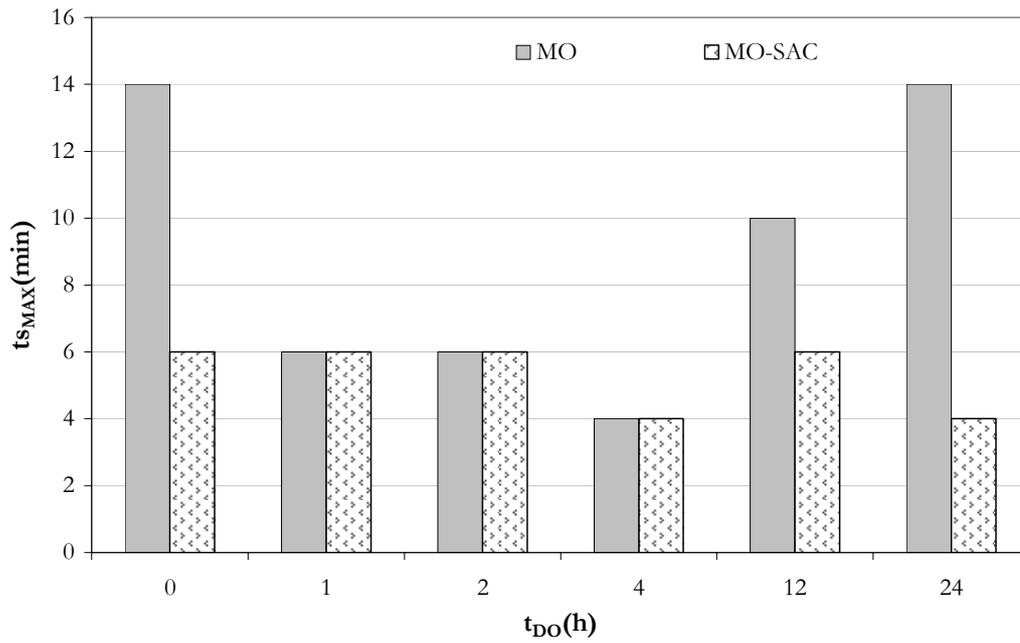
Las curvas de secado se muestran en las Figuras 5.2 y 5.3: frente a un mismo tiempo de DO, las velocidades de secado desarrolladas fueron mayores cuanto mayor fue la potencia y frente a una misma potencia de secado, se obtuvieron mayores  $V_s$  cuanto mayor era el contenido inicial de agua en las muestras (es decir mayores  $V_s$  para  $t_{DO}$  cortos). El mismo comportamiento fue observado para el secado por microondas (Capítulo 4).



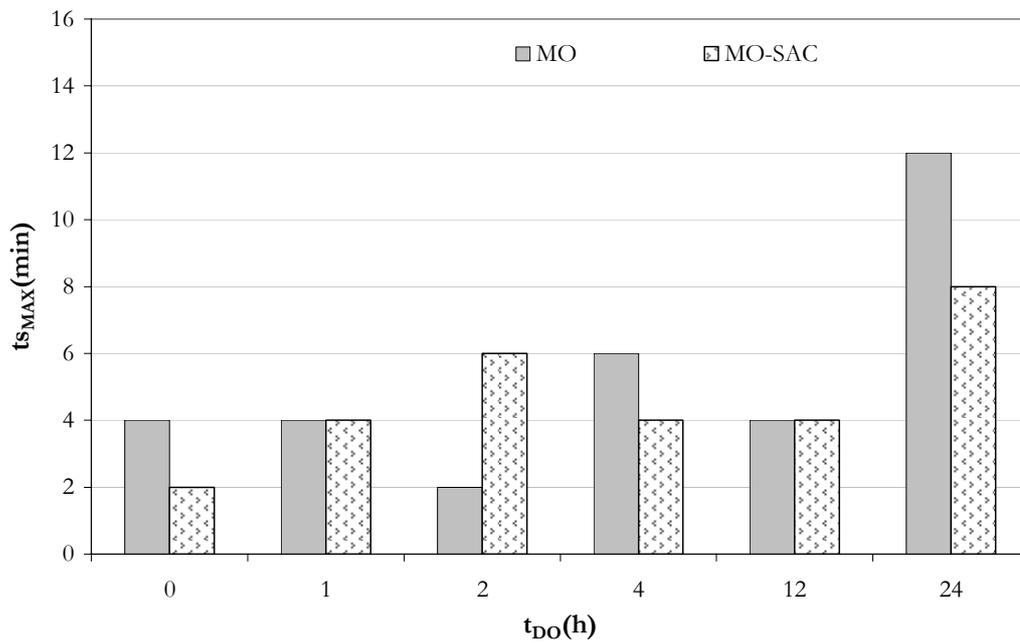
**Figura 5.2** Velocidad de secado ( $V_s$ ) en función de la humedad (en base seca). MO-SAC. Potencia de secado: 160 W. (\* Sin DO; (O) 2 h; (▲) 4 h; (●) 24 h.



**Figura 5.3** Velocidad de secado ( $V_s$ ) en función de la humedad (en base seca). MO-SAC. Potencia de secado: 350 W. (\* Sin DO; (O) 2 h; (▲) 4 h; (●) 24 h.



**Figura 5.4** Duración de la etapa de precalentamiento ( $t_{s_{MAX}}$ ) en función del tiempo de DO ( $t_{DO}$ ).  
P= 160 W.



**Figura 5.5** Duración de la etapa de precalentamiento ( $t_{s_{MAX}}$ ) en función del tiempo de DO ( $t_{DO}$ ).  
P= 350 W.

En las Figuras 5.4 y 5.5 se presenta la duración de las etapas de precalentamiento para MO y MO-SAC a ambas potencias de trabajo. Los resultados muestran que a la potencia más

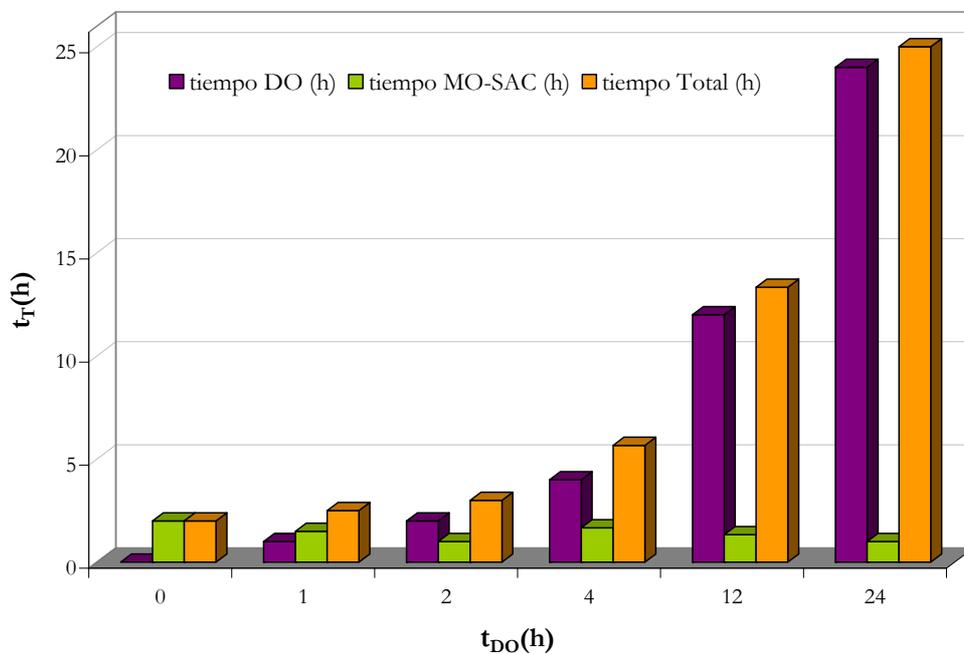
baja el precalentamiento fue más corto cuando se usó MO-SAC para tiempos largos de DO.

Cabe recordar que las muestras sometidas a tiempos largos de DO presentan menor humedad y más concentrada en el centro, es decir, superficies más secas. En estas circunstancias una corriente de aire caliente facilitaría la salida del agua.

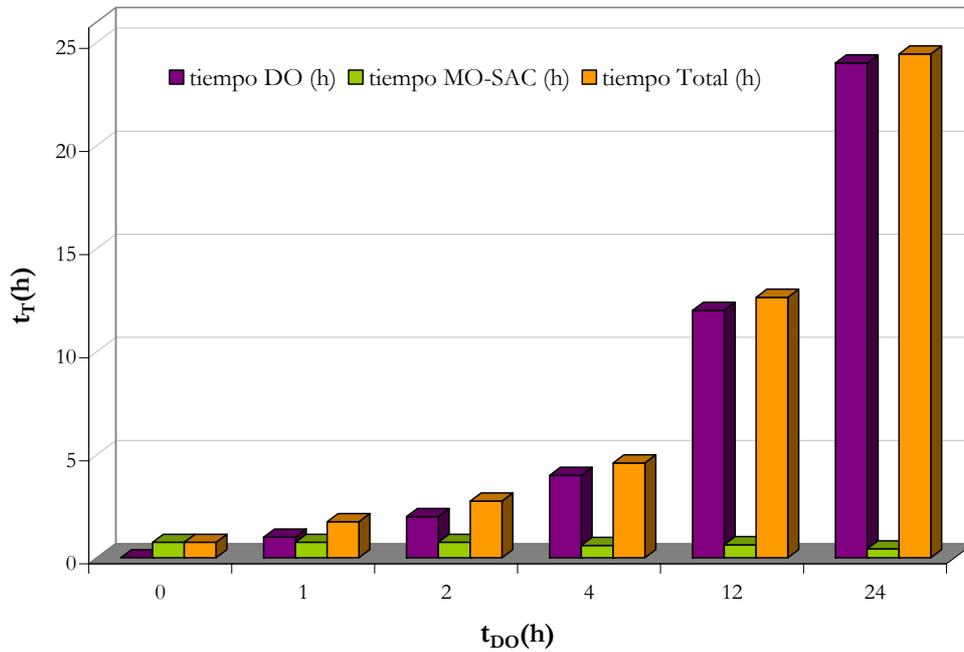
Al utilizar la potencia intermedia, no fue posible establecer diferencias entre ambas tecnologías.

Para ambas potencias, la respuesta de las muestras sin pretratamiento fue la esperada: fases de precalentamiento más cortas cuando se utilizó MO-SAC.

Ahora, analizando la duración de la etapa de DO y de MO-SAC (Figuras 5.6 y 5.7), se pudo comprobar que (salvo para  $t_{DO} = 1$  h a la potencia más baja) la etapa más larga fue siempre la DO, por lo tanto, la duración del proceso global estuvo gobernada por el pretratamiento; resultados similares fueron observados y descritos para el proceso DO-MO. Es decir que la adición de la convección no alteraría el comportamiento general del proceso combinado, aunque si, en algunos casos, reduciría los tiempos de proceso, en particular a potencias bajas de MO.



**Figura 5.6** Duración de cada etapa y del proceso combinado, en función del tiempo de DO. Potencia de secado: 160 W.



**Figura 5.7** Duración de cada etapa y del proceso combinado, en función del tiempo de DO. Potencia de secado: 350 W.

### 5.3.2 Cinética de variación de color durante los procesos combinados

Con respecto al color de los productos finales, se puede notar que a la potencia más baja, las máximas diferencias de color se obtuvieron para las 2 y las 4 h de DO (Figura 5.8), en tanto que MO-SAC promovió los menores cambios de color y prácticamente independientes del tiempo de DO. Vale recordar que para  $t_{DO} = 2$  h se registraron las máximas diferencias en la duración del secado entre MO y con MO-SAC, esta sería la consecuencia del mayor  $\Delta E^*$  para el proceso más largo (MO).

En cambio, cuando se trabajó con  $P = 350$  W, la variación de color fue independiente de la técnica de secado aplicada, sólo dependió del tiempo de DO (en la misma forma descripta para MO en el Capítulo anterior).

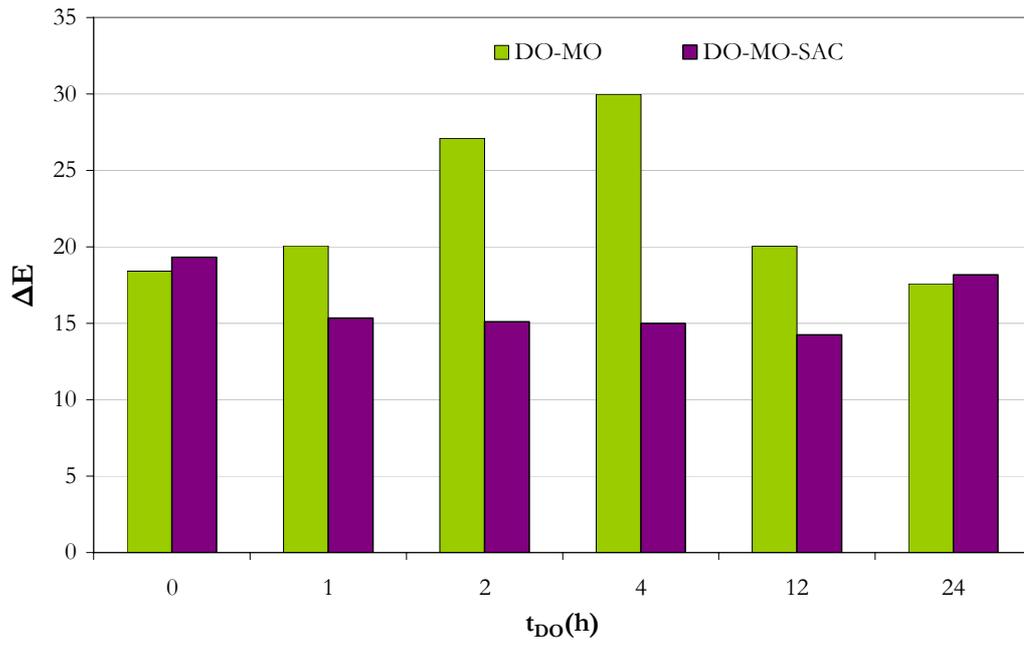


Figura 5.8 Variación total de color al final del proceso combinado ( $\Delta E$ ). Potencia de secado: 160 W.

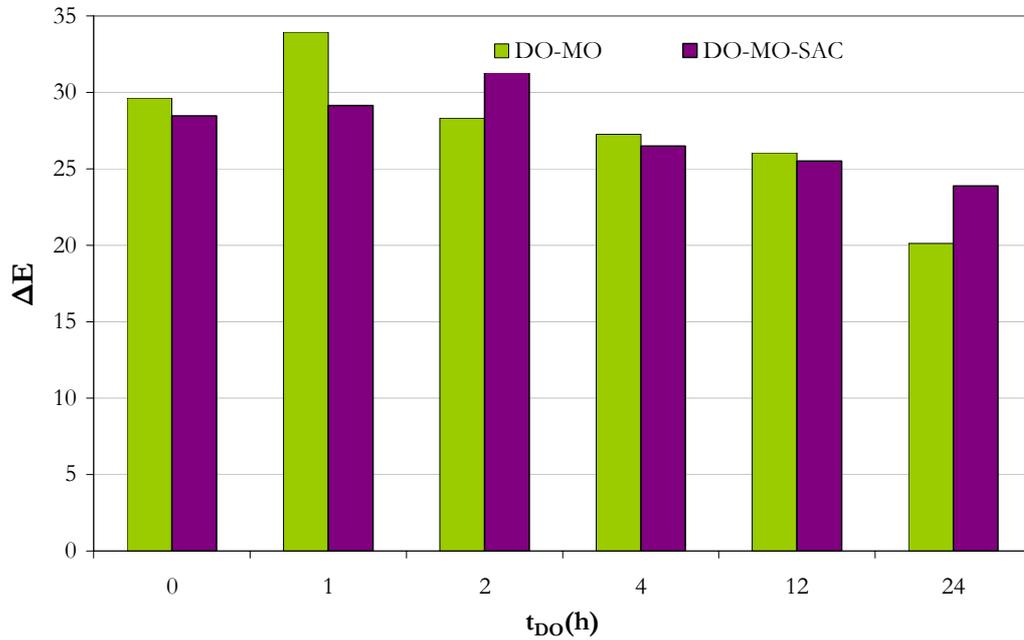


Figura 5.9 Variación total de color al final del proceso combinado ( $\Delta E$ ). Potencia de secado: 350 W.

### 5.3.3 Variación de las propiedades mecánicas de los procesos combinados

En las Figuras 5.10 y 5.11 se muestran los resultados de dureza de las muestras al final de los procesos combinados, para 160 W y 350 W respectivamente.

En el caso de la potencia más baja, tanto los productos secados con MO como los secados con MO-SAC resultaron más blandos que la manzana fresca y en la única condición en la que se expresan las diferencias entre los métodos de secado es en  $t_{DO} = 24$  h, donde MO-SAC promovió muestras más duras que MO. En el resto de las condiciones no se percibieron diferencias entre ambas tecnologías.

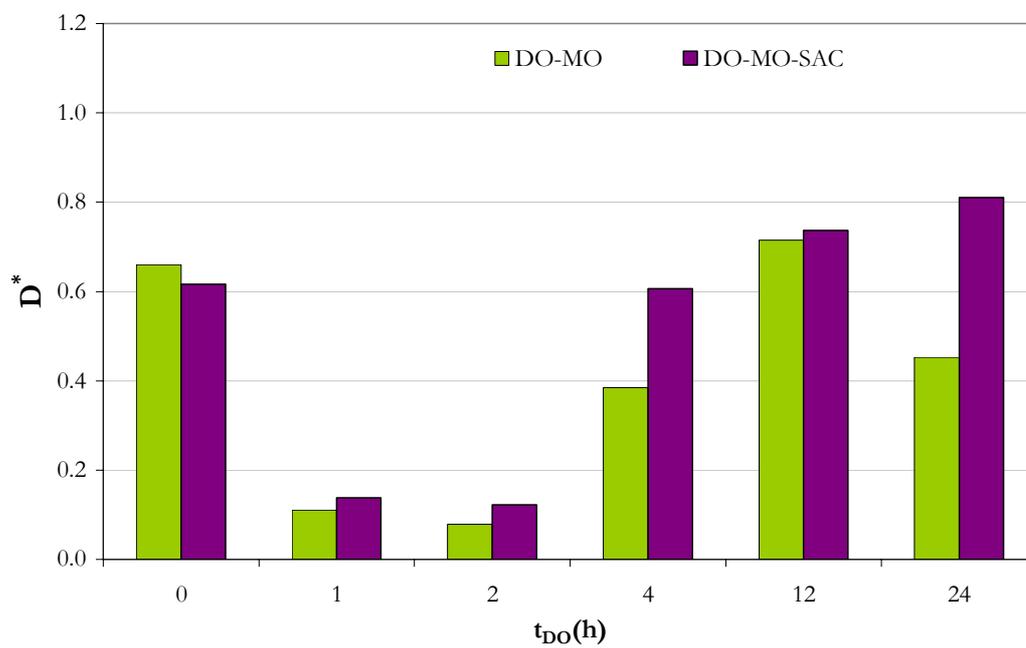
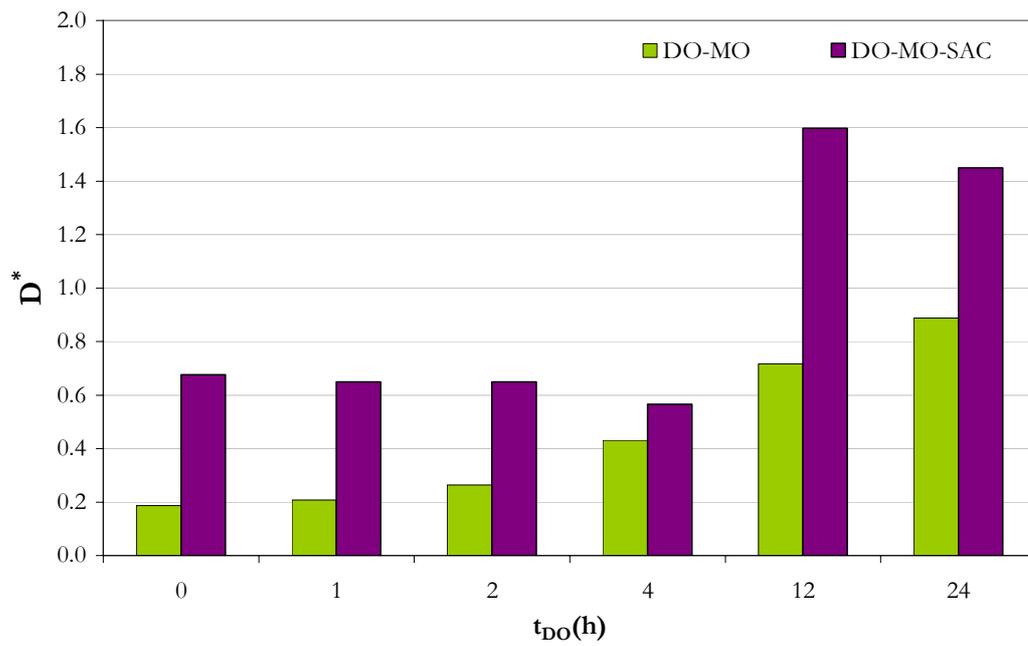


Figura 5.10 Dureza al final de los procesos combinados ( $D^*$ ). Potencia de secado: 160W.



**Figura 5.11** Dureza al final de los procesos combinados ( $D^*$ ). Potencia de secado: 350W.

En cambio, el secado a  $P= 350\text{ W}$  mediante MO-SAC, siempre condujo a productos más duros que los obtenidos con MO y además, para tiempos largos de DO (12-24 h), aún más duros que la manzana fresca (hasta un 45% más).

Por otro lado, los productos no mostraron diferencias marcadas entre sí en cohesividad (Figuras 5.12 y 5.13) ni en adhesividad (Figuras 5.14 y 5.15) en ninguna de las dos potencias analizadas.

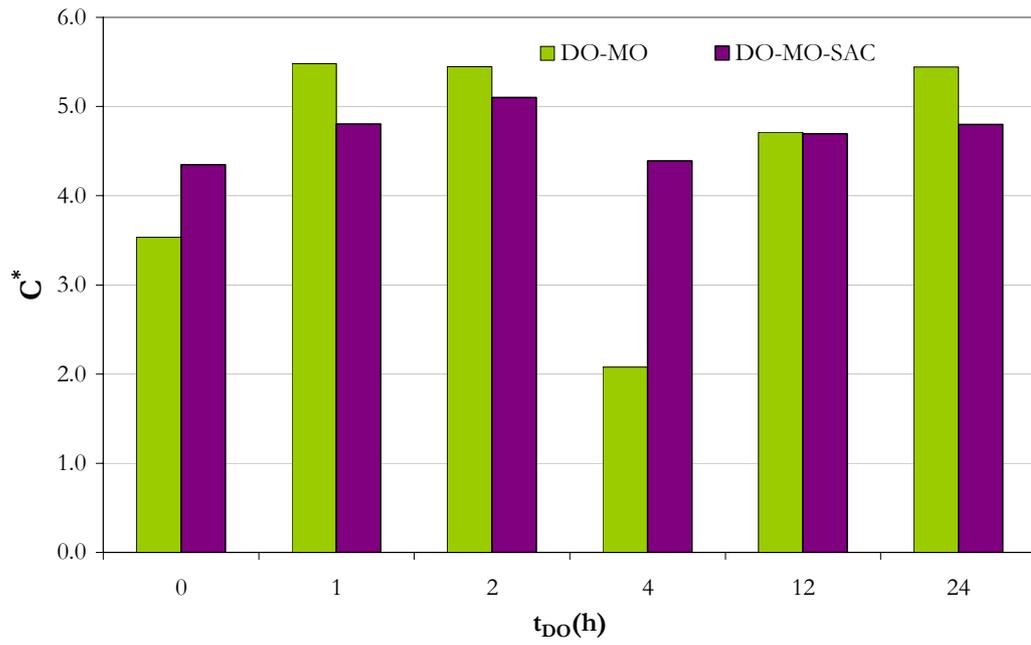


Figura 5.12 Cohesividad al final de los procesos combinados ( $C^*$ ). Potencia de secado: 160 W.

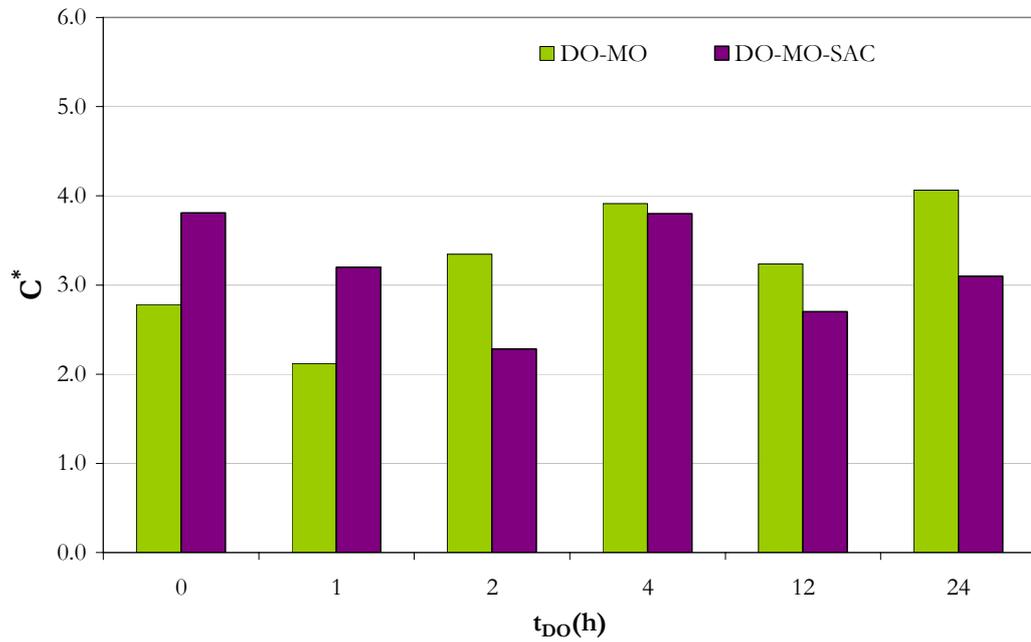


Figura 5.13 Cohesividad al final de los procesos combinados ( $C^*$ ). Potencia de secado: 350 W.

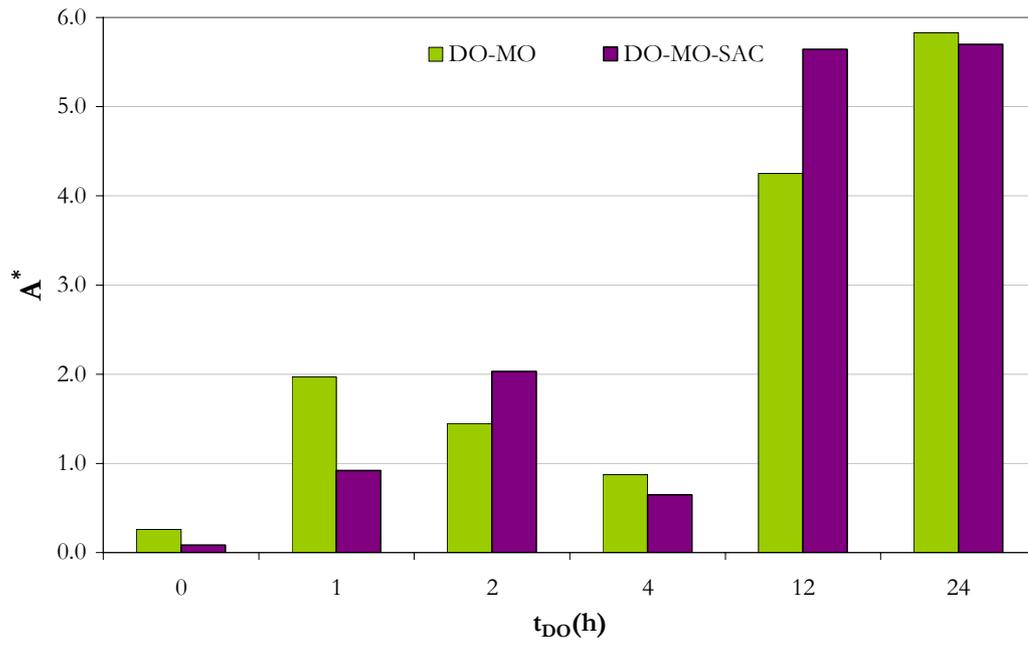


Figura 5.14 Adhesividad al final de los procesos combinados (A\*). Potencia de secado: 160 W.

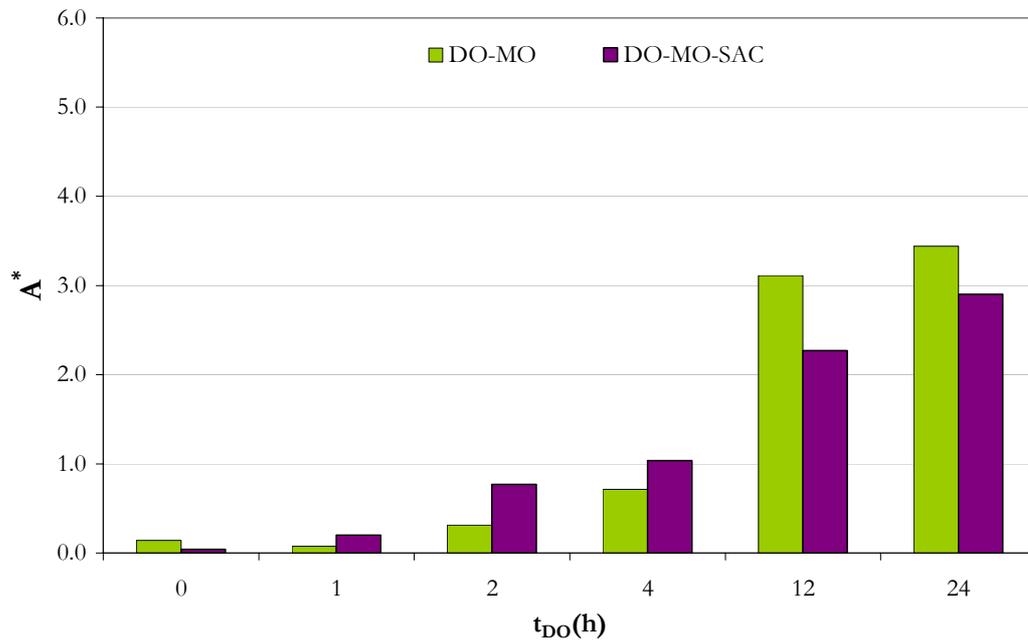


Figura 5.15 Adhesividad al final de los procesos combinados (A\*). Potencia de secado: 350 W.

### 5.3.4 Análisis de caracterización de los productos “target”

Considerando que la adición del SAC al secado por MO no introdujo diferencias marcadas en la calidad de los productos, se decidió realizar un análisis más profundo considerando productos representantes de tiempos cortos de DO ( $t_{DO}= 2$  h) y representantes de tiempos largos de DO ( $t_{DO}= 24$  h). En particular se eligió a  $t_{DO}= 2$  h como representante de tiempos cortos, considerando que en esa condición la adición del SAC redujo significativamente el tiempo de secado a la potencia baja.

Dicha evaluación permitiría comprender el comportamiento de estos productos una vez incorporados en un alimento más complejo (como un cereal de desayuno) que requiera rehidratación. Los productos mencionados correspondientes a  $t_{DO}= 0, 2$  y  $24$  h con una etapa posterior de MO o MO-SAC serán denominados productos “target” en lo que resta de este trabajo.

En la Figura 5.16 se representa la densidad de las muestras obtenidas a la potencia más baja: se puede observar que, los productos tuvieron prácticamente la misma densidad independientemente de la incorporación del proceso de DO y del método de secado usado, es más, la densidad de las muestras al final del proceso fue un 70% menor que la de la manzana fresca.

En cambio, cuando se utilizó la potencia más alta (Figura 5.17), se ve que MO-SAC generó productos algo más densos que MO. Ahora bien, teniendo en cuenta que para un mismo  $t_{DO}$ , las muestras perdieron la misma cantidad de agua (con MO y con MO-SAC), se deduce entonces que los cambios en la densidad obedecieron a cambios en el volumen. Es más, como esta densidad es obtenida a partir del desplazamiento de partículas, se deduce que una mayor densidad implica un menor volumen y, en consecuencia, que MO-SAC produjo mayor encogimiento que MO.

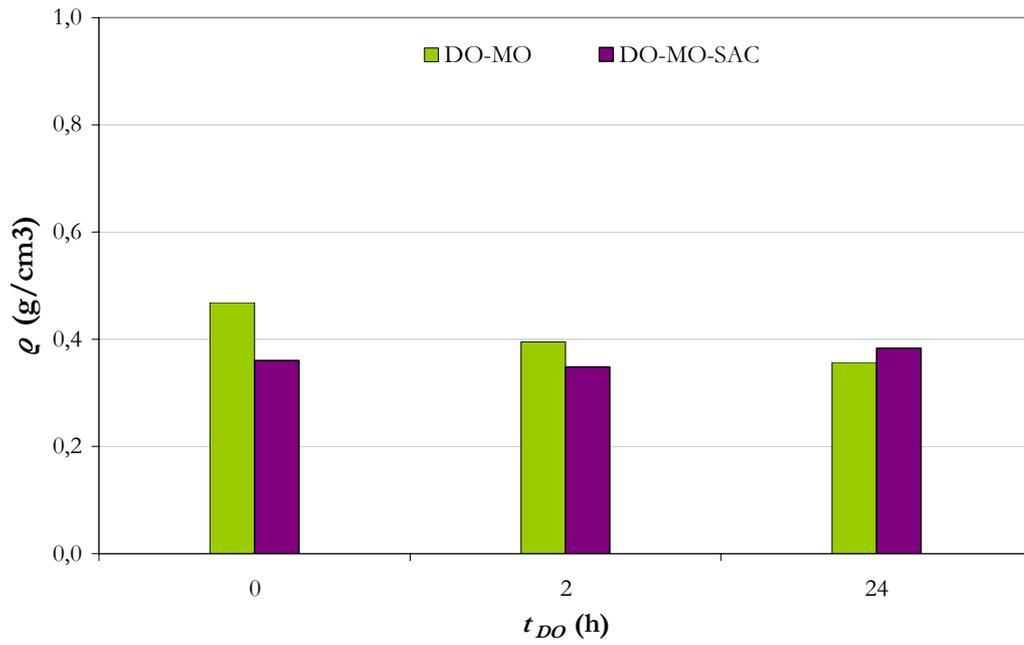


Figura 5.16 Densidad aparente ( $\rho$ ) de los productos target. Potencia de secado: 160 W.

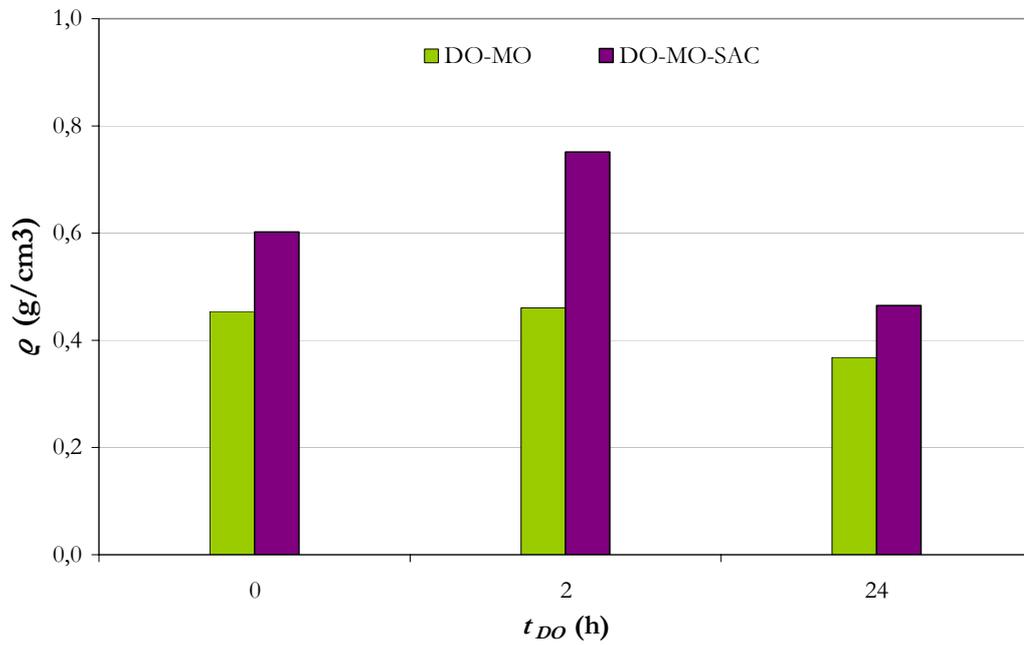


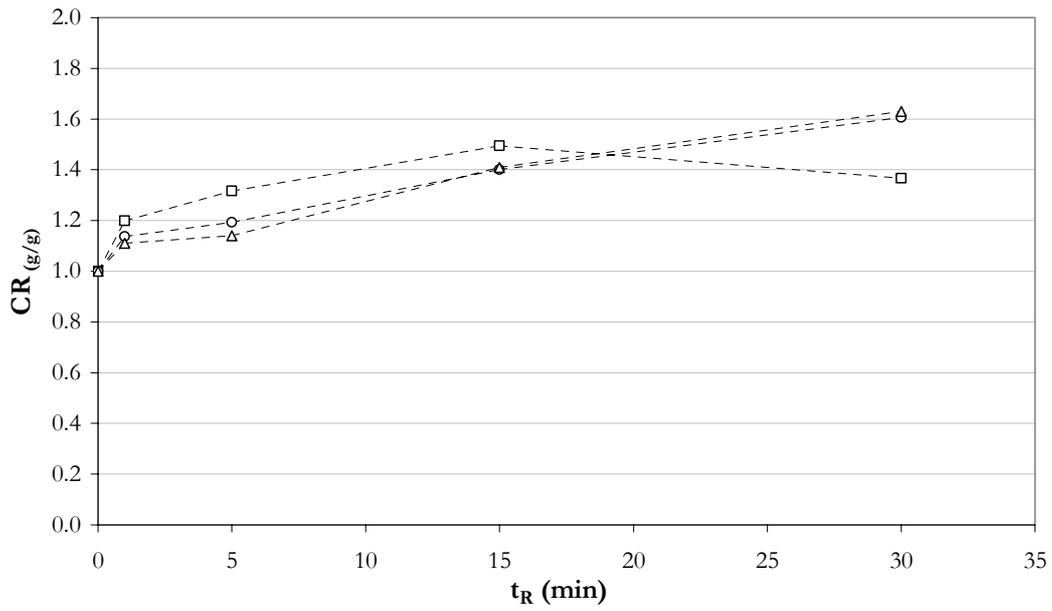
Figura 5.17 Densidad aparente ( $\rho$ ) de los productos target. Potencia de secado: 350 W.

Simultáneamente, para evaluar si las variables del proceso global, generaron diferencias en la rehidratación de los productos (diferencias en los valores de CR), se realizó un análisis de varianza, considerando  $\alpha = 0.05$  (los datos correspondientes se encuentran en el Apéndice B) y los resultados de la rehidratación de los productos target se presentan en las Figuras 5.18 a 5.27.

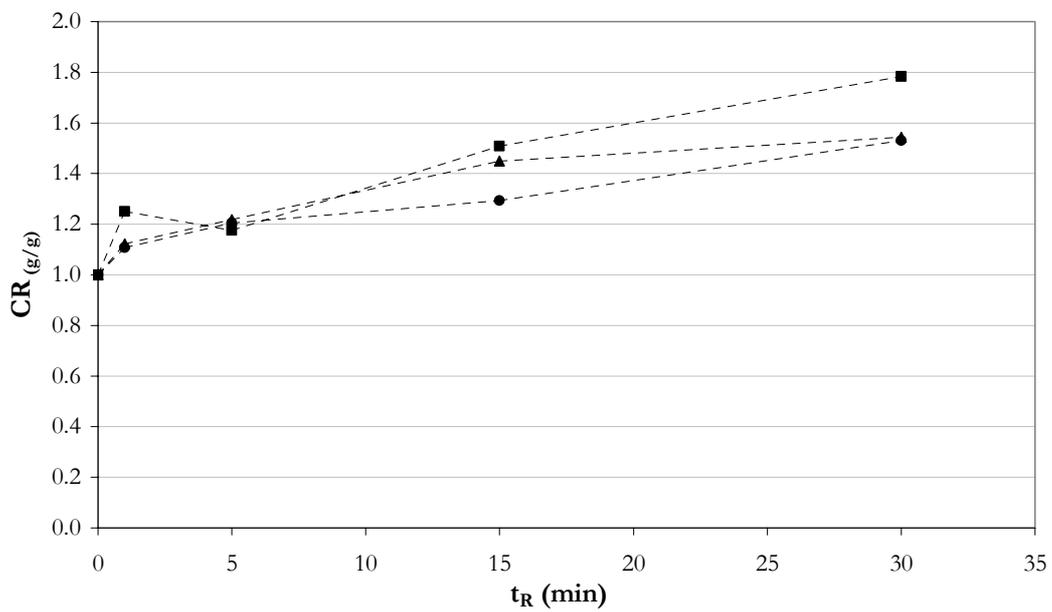
Se observó que todos los productos se comportaron de manera similar, independientemente del tiempo de DO, de la potencia de microondas utilizada y de la aplicación o no de SAC asistiendo a las MO.

Una excepción particular se encontró para los productos DO 2 h y secados a 350 W, que se rehidratarían de manera diferente según hayan sido secados solo con MO o con MO-SAC: los productos obtenidos con MO presentaron coeficientes de rehidratación mayores que los obtenidos con MO-SAC para todo  $t_R$  (Figura 5.25).

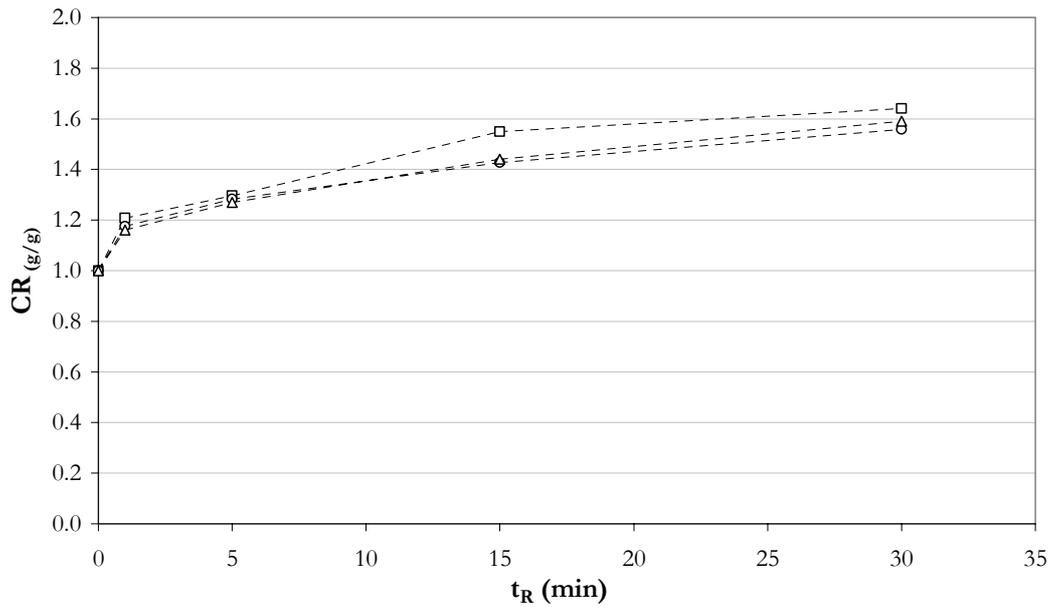
Esta observación puede atribuirse a que los productos resultantes de MO tienen una estructura un tanto más abierta que los propios de MO-SAC, lo que facilitaría el ingreso y retención del líquido de rehidratación. Es más, en el análisis precedente se señaló que a 350 W las mayores diferencias de densidad aparente se obtuvieron para las muestras DO 2 h y se indicó que la mayor densidad obtenida con MO-SAC correspondería a un menor volumen y por lo tanto, a un mayor encogimiento. O, de otra forma, a que MO promovería un menor encogimiento, dando lugar a una matriz más abierta que permitiría el más fácil acceso del líquido de rehidratación.



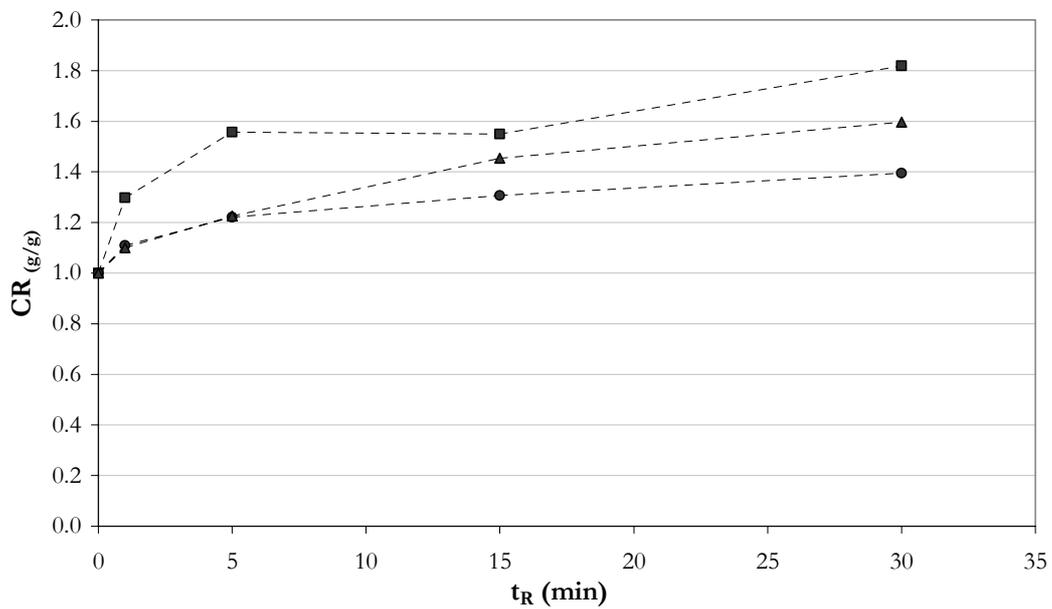
**Figura 5.18** Coeficiente de rehidratación (CR) de los productos target obtenidos con MO. Potencia de secado: 160 W. (□) Sin DO; (○) 2 h; (△) 24 h.



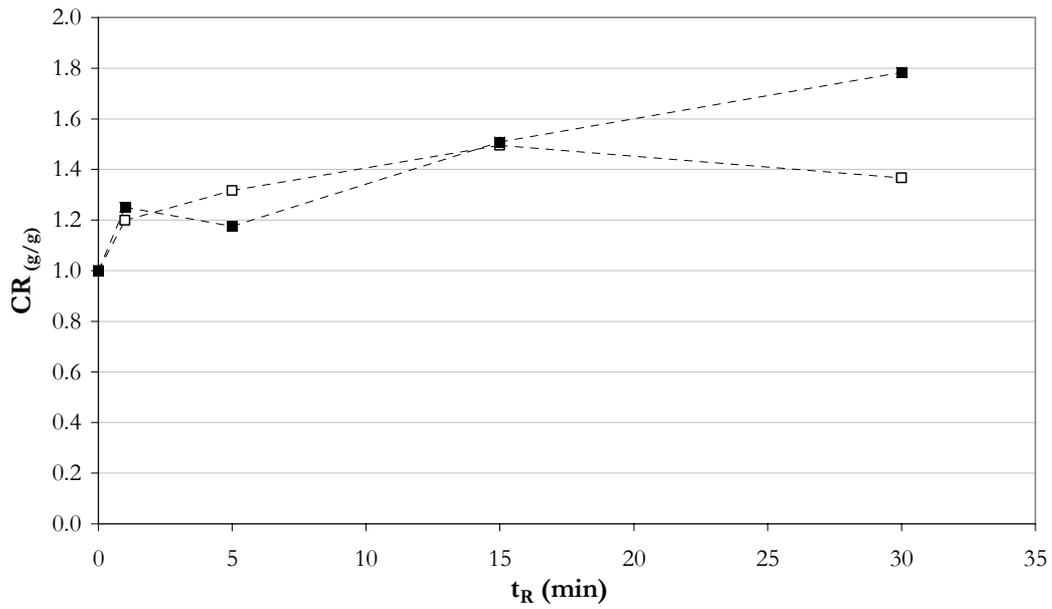
**Figura 5.19** Coeficiente de rehidratación (CR) de los productos target obtenidos con MO-SAC. Potencia de secado: 160 W. (■) Sin DO; (●) 2 h; (▲) 24 h.



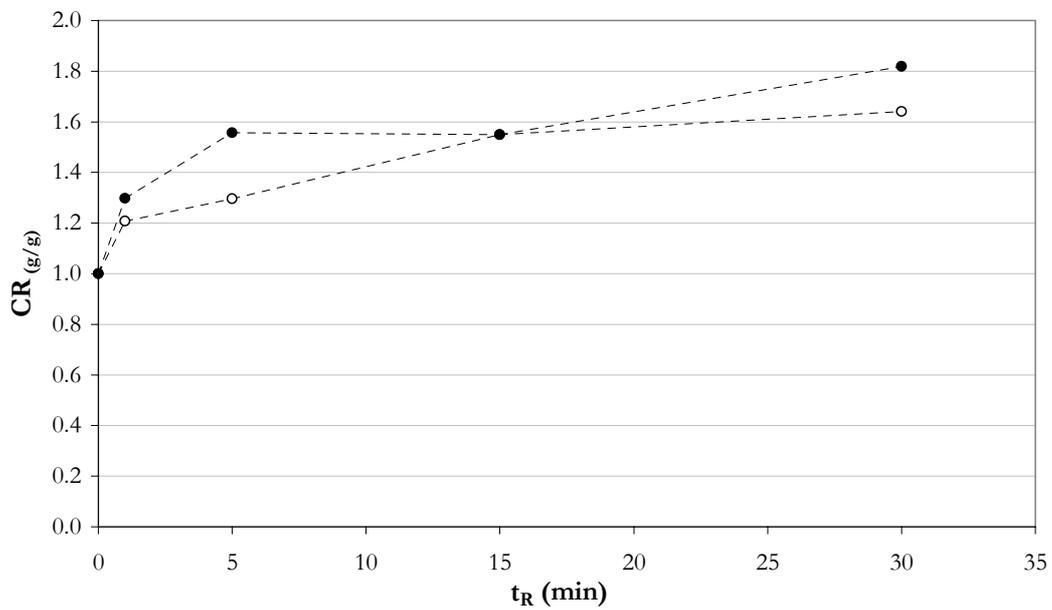
**Figura 5.20** Coeficiente de rehidratación (CR) de los productos target obtenidos con MO. Potencia de secado: 350 W. (□) Sin DO; (○) 2 h; (△) 24 h.



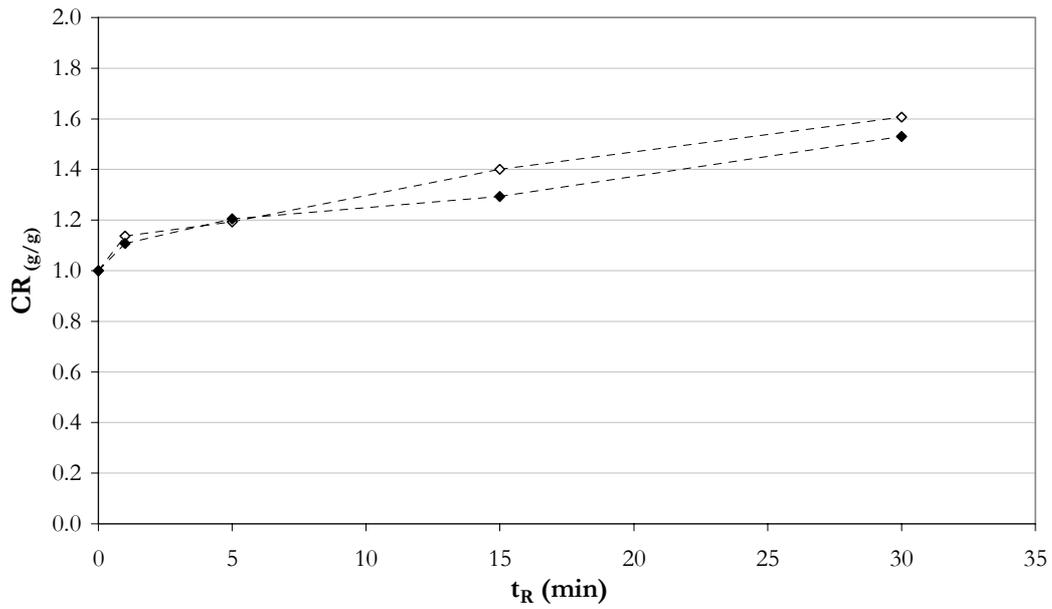
**Figura 5.21** Coeficiente de rehidratación (CR) de los productos target obtenidos con MO-SAC. Potencia de secado: 350 W. (■) Sin DO; (●) 2 h; (▲) 24 h.



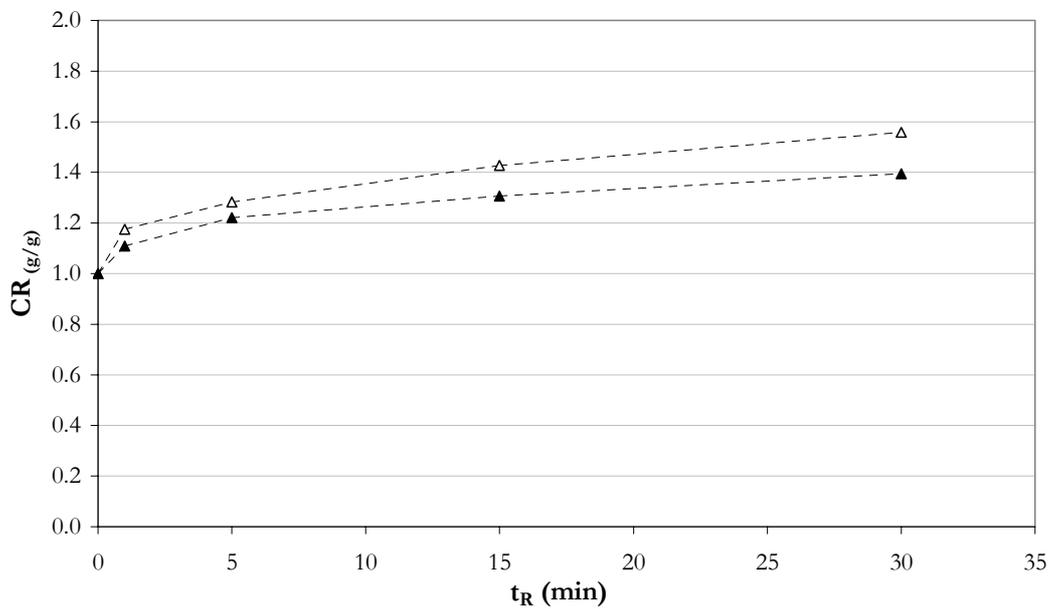
**Figura 5.22** Coeficiente de rehidratación (CR) de manzana sin DO secada con MO (□) y con MO-SAC (■). Potencia de secado: 160 W.



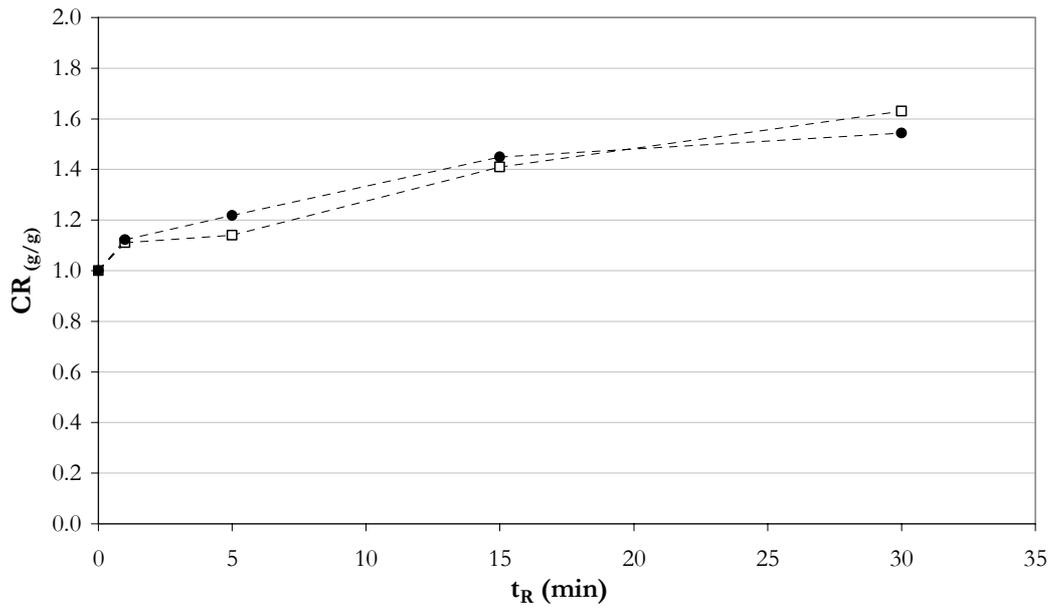
**Figura 5.23** Coeficiente de rehidratación (CR) de manzana sin DO secada con MO (○) y con MO-SAC (●). Potencia de secado: 350 W.



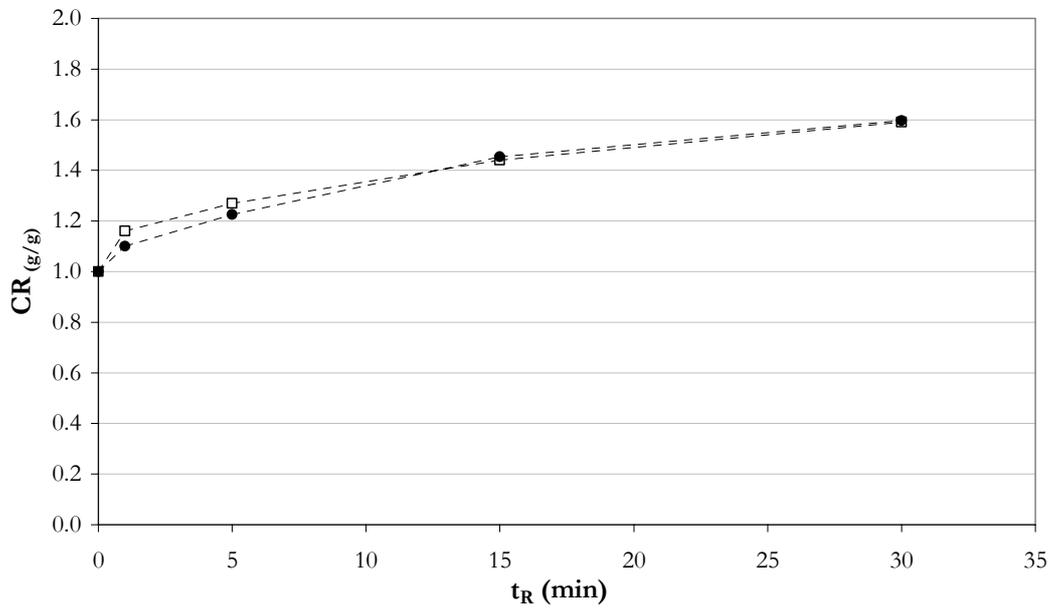
**Figura 5.24** Coeficiente de rehidratación (CR) de manzana DO 2 h secada con MO ( $\diamond$ ) y con MO-SAC ( $\blacklozenge$ ). Potencia de secado: 160 W.



**Figura 5.25** Coeficiente de rehidratación (CR) de manzana DO 2 h secada con MO ( $\triangle$ ) y con MO-SAC ( $\blacktriangle$ ). Potencia de secado: 350 W.



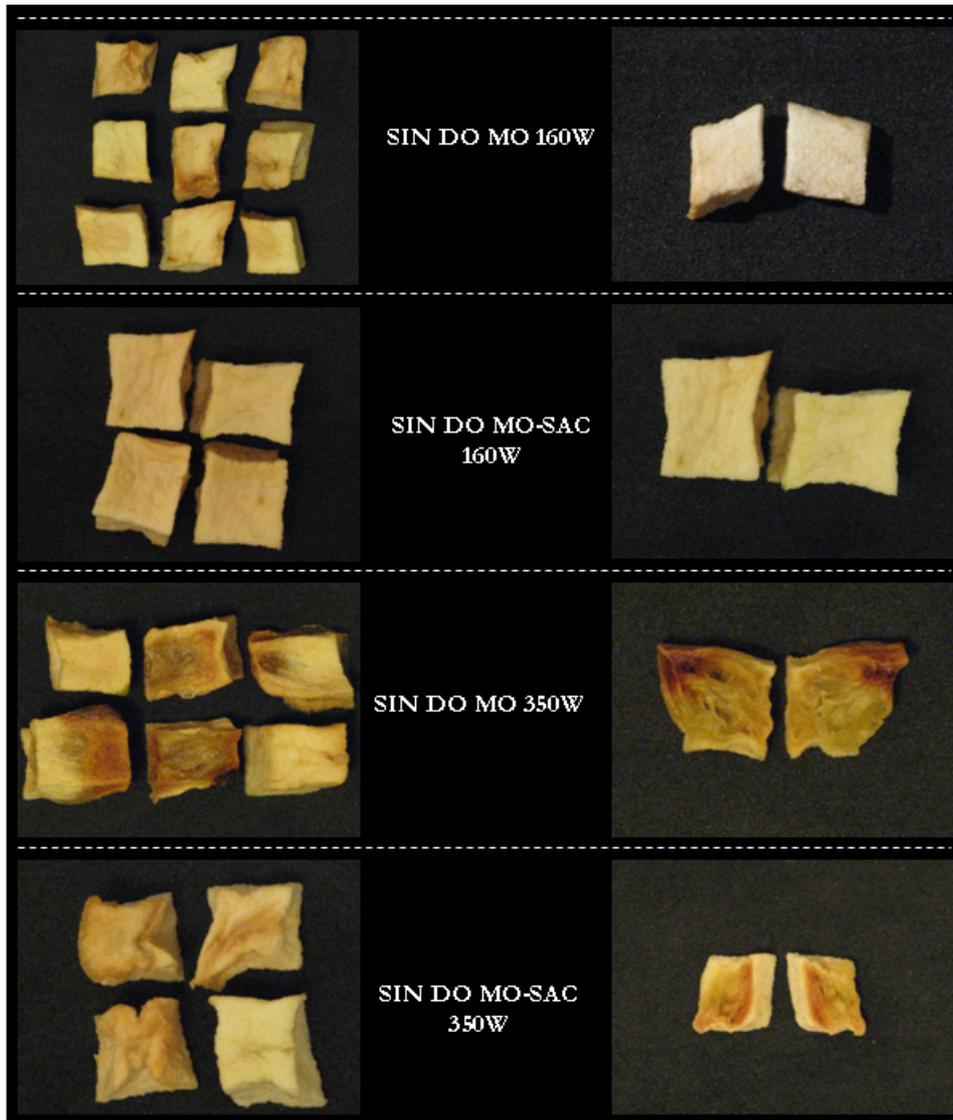
**Figura 5.26** Coeficiente de rehidratación (CR) de manzana DO 24 h secada con MO (□) y con MO-SAC (●). Potencia de secado: 160 W.



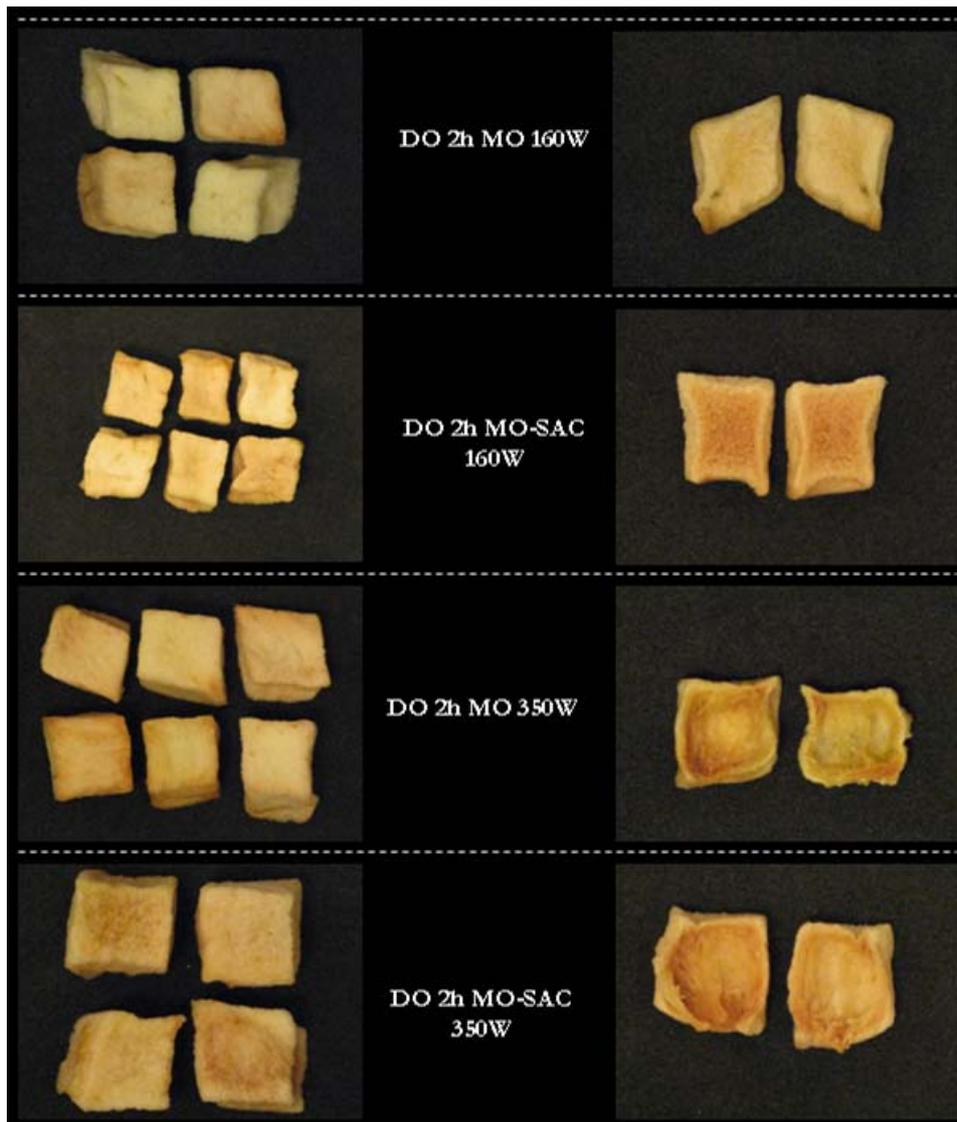
**Figura 5.27** Coeficiente de rehidratación (CR) de manzana DO 24 h secada con MO (□) y con MO-SAC (●). Potencia de secado: 350 W.

Finalmente, en las Galerías de Imágenes 5.1 a 5.3 se muestran las fotografías correspondientes a los productos target.

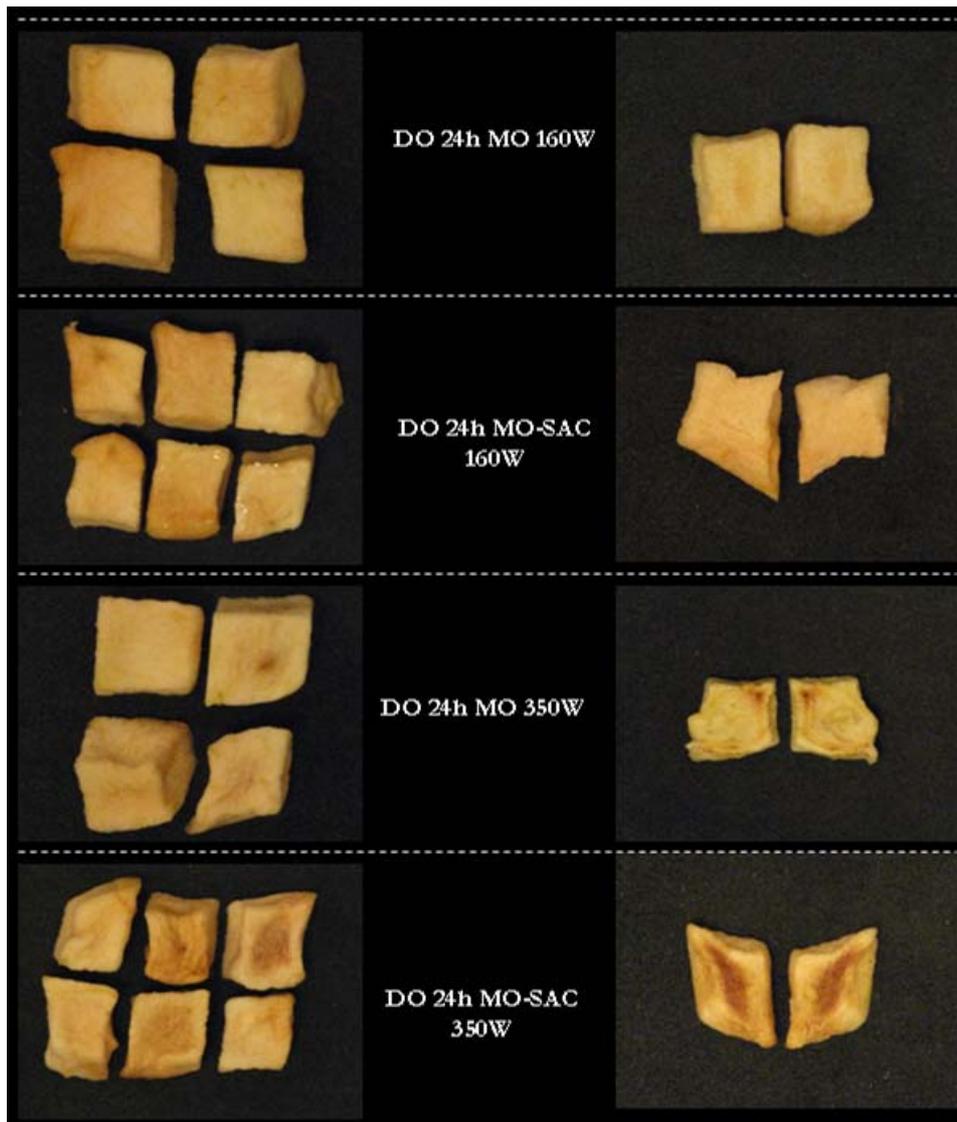
En ellas se puede observar la apariencia esponjosa de aquellos obtenidos al secar a la potencia más baja y más aún cuanto mayor ha sido el  $t_{DO}$  (con y sin SAC) y, por otro lado, los productos huecos resultantes de aplicar la potencia moderada (con o sin SAC).



Galería de Imágenes 5.1 Manzana sin DO secadas con MO a 160 y 350 W y con MO-SAC a 160 y 350 W.



Galería de Imágenes 5.2 Manzana DO 2 h secadas con MO a 160 y 350 W y con MO-SAC a 160 y 350 W.



**Galería de Imágenes 5.3** Manzana DO 24 h secadas con MO a 160 y 350 W y con MO-SAC a 160 y 350 W.

#### **5.4 CONCLUSIONES**

En función de lo expuesto, si se pretende obtener productos macizos, es necesario utilizar la potencia más baja (160 W) y es conveniente asistir al secado MO con SAC por cuanto las etapas de secado son más cortas y los productos obtenidos presentan las menores variaciones de color. En cuanto a las propiedades mecánicas (salvo para  $t_{DO} = 24$  h), es indistinto el uso de cualquiera de las dos tecnologías de secado.

Por otro lado, si la producción se orienta a alimentos huecos, utilizar MO o MO-SAC sobre productos DO, es indistinto en términos de duración del secado y color, pero se debe tener en cuenta que al utilizar MO-SAC, los productos serán más duros que los obtenidos con MO, particularmente para  $t_{DO} \geq 12$  h.

Conjuntamente, la densidad de los productos macizos no depende del método de secado y tampoco de la adición y duración de una etapa previa de DO.

Los productos huecos en cambio, son más densos cuando se los seca con MO-SAC, posiblemente, porque promueven un mayor encogimiento (a  $t_{DO} = 2$  h esta diferencia es la máxima).

Finalmente, al analizar el comportamiento de los productos frente a la rehidratación (equivalente a su incorporación en una preparación como parte de un cereal de desayuno, por ejemplo), se pudo observar que la respuesta es independiente de la duración de la DO, de la potencia de secado y del método de secado, salvo para  $t_{DO} = 2$  h y secados a la potencia más alta, donde el secado por MO condujo a mayores coeficientes de rehidratación. Este resultado se correlaciona con la densidad obtenida para estas muestras, que indicaría un menor encogimiento y podría dar lugar una mayor incorporación de líquido (que se traduce en mayores CR).

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES GENERALES

El objetivo de este capítulo es construir un escenario único para el análisis de la Deshidratación Osmótica (DO) y del Secado por Microondas (MO), individualmente y en combinación, aplicados a la obtención de productos deshidratados en base de manzana.

Una de las fortalezas de la DO es ser una herramienta valiosa para la formulación de alimentos: los productos DO pueden tener características muy diferentes en función de la cantidad de agua que retengan y de la naturaleza y cantidad de solutos que se haya incorporado a su estructura. La elección del medio deshidratante es en sí, un factor de diseño, ya que el tipo de solutos elegido determinará en gran medida las propiedades organolépticas (además de fisicoquímicas y nutricionales) del producto DO.

En esta tesis, el punto de partida fue la obtención de alimentos sobre la base de manzana y la búsqueda de agentes deshidratantes se orientó hacia endulzantes compatibles con los atributos sensoriales de esta fruta. La selección de los agentes osmóticos se realizó considerando fundamentalmente su peso molecular (propiedad del soluto relacionada con su “habilidad” para difundir en el tejido del alimento) y en menor medida, su aporte calórico (frente a la posibilidad de desarrollar alimentos con diferente contenido energético). Seguidamente, el diseño de las soluciones deshidratantes se enfocó en la concentración del medio (o en la actividad acuosa,  $a_w$ ), factor que afecta directamente a la transferencia de materia. De esta forma, las variables del proceso de DO analizadas en este trabajo fueron: la naturaleza del agente deshidratante, la concentración del medio deshidratante y la duración de la DO o, equivalentemente, el tiempo de contacto fruta-solución ( $t_{DO}$ ).

En resumen, las soluciones definidas fueron: sacarosa de 69 y 47 °Brix (SAC69 y SAC47, correspondientemente), xilitol de 47 °Brix (XIL47) y solución de alto peso molecular de 69

°Brix (AAPM69); en tanto que los tiempos de contacto fruta-solución analizados fueron: 0, 1, 2, 4, 12 y 24 horas.

Así, empíricamente se comprobó que se obtienen alimentos con mayor grado de deshidratación (menor  $a_w$ ) cuanto más prolongada es la DO, cuanto más concentrado es el medio deshidratante y cuanto menor es el peso molecular del agente deshidratante. Con respecto a la calidad, un tratamiento más prolongado promueve mayor diferencia de color entre el producto DO y la manzana fresca, empero, es válido aclarar que, aunque diferente del aspecto fresco de la manzana, el color de los productos DO es aceptable en todos de los casos. Particularmente, se advirtió que el oscurecimiento y el enrojecimiento responden a los dos flujos de materia estudiados, pérdida de agua e incorporación de sólidos, mientras que el amarillamiento, solo a la pérdida de agua, permaneciendo indiferente a la ganancia de sólidos. Además, los productos de manzana DO son más blandos, más cohesivos y menos elásticos que la manzana fresca. Conjuntamente, las observaciones realizadas a nivel microscópico sustentan a las de nivel macroscópico: el progreso del tratamiento impulsa la desorganización de la arquitectura inicial del tejido mediante la pérdida de turgencia celular, la reducción de los espacios intercelulares y la aparición de canales.

Más allá de lo descripto, cualquiera sea la combinación de las variables mencionadas, en ningún caso se obtienen al final de la DO productos con  $a_w \leq 0.9$ , por lo que los alimentos DO tienen asociada una corta vida útil.

De acuerdo con esta última observación, para obtener productos con menor actividad acuosa, es necesario sumar una etapa adicional de secado, proyectando procesos combinados que tengan como primera etapa a la DO.

Entonces, es válido replantearse ¿Cuáles son los objetivos de la DO? ¿El proceso de DO diseñado será óptimo cuando esté alineado con cuál de nuestros objetivos?

Es decir, si el objetivo inicial de nuestro análisis consistía en diseñar el proceso de DO que removiera la mayor cantidad de agua en el menor tiempo posible y con la menor pérdida de calidad, la necesidad de sumar una segunda instancia de deshidratación quizás implique redefinir nuestro objetivo.

Reconociendo imperativa la adición de una etapa ulterior de deshidratación (en pos de obtener alimentos de menor  $a_w$ ) y quedando planteado un proceso combinado, los esfuerzos deben dirigirse hacia la optimización de un proceso global y no exclusivamente a la optimización de la DO, ya que los productos deshidratados en mayor medida durante la DO, no necesariamente serán los de mejor desempeño durante la segunda etapa.

En esta tesis, independientemente del método de deshidratación elegido para la segunda etapa, se estableció como meta la obtención de alimentos “estables” en términos microbiológicos y fisicoquímicos, y en este aspecto, se fijó como parámetro de diseño la actividad acuosa de los productos al final del proceso global:  $a_w \leq 0.5$  (adicionalmente, este valor concuerda con el valor de productos sobre base de manzana presentes en el mercado).

Es decir que el punto final de la segunda etapa se consigue una vez que el producto alcanza un valor de  $a_w = 0.5$ . No obstante, la medición de la actividad acuosa no permite realizar un proceso continuo (ya que requiere la destrucción de las muestras), por lo que fue necesario monitorearla a través de la medición de peso (directamente relacionada con la pérdida de agua). Con este fin se construyeron las curvas de la actividad acuosa en función de la pérdida de peso, a partir de las que es factible realizar el control de  $a_w$  durante el secado en forma continua. Estas curvas fueron denominadas “curvas operativas de secado”.

También se comprobó que, en términos de eliminación de agua durante el secado, las cuatro soluciones deshidratantes promueven un comportamiento diferente si la DO se extiende más de 4 h. Sin embargo, si se diseñan pretratamientos de hasta 4 horas de duración, es indistinto (en términos de  $WL_s$ ) utilizar SAC69 o XIL47 y más aún, para procesos de DO de 1 hora, resulta indistinto osmodeshidratar con SAC47 o con AAPM69.

Posteriormente, una vez definida la rutina de monitoreo del secado y la forma de detectar su punto final, el análisis se orientó a la selección de la tecnología de secado a utilizar como complemento de la DO. La evaluación condujo a la tecnología de microondas, considerando que aún es emergente (a nivel industrial) y que se ha usado, generalmente, como técnica de soporte de otros métodos de secado. En el campo de la deshidratación de alimentos, la tecnología de microondas (MO) ha sido acoplada al secado por aire caliente (SAC) para minimizar, exclusivamente, los defectos de calidad de los productos obtenidos por SAC, pero ha sido brevemente juzgado su desempeño como técnica unitaria. En este trabajo se seleccionaron cuatro niveles de potencia: 160, 350, 500 y 650 W.

Los resultados indicaron, en líneas generales, que cuanto mayor es la potencia, menor es el tiempo necesario para alcanzar el valor de  $a_w$  de diseño y que la mayor velocidad de remoción de agua ocurre, generalmente, a expensas de un menoscabo más marcado de la calidad. Simultáneamente (considerando un mismo soluto), haber removido mayor cantidad de agua durante la DO, no necesariamente implica tiempos más cortos de secado. De hecho, los productos DO durante 4 y 12 horas, requieren secados más prolongados que

los restantes, posiblemente, debido a la formación de una costra superficial de solutos propios del medio deshidratante, que constituyen una resistencia a la salida del agua durante esta segunda etapa (se observa esto particularmente con las soluciones de sacarosa).

En cuanto a la calidad, en líneas generales, los tratamientos que generaron las mayores variaciones de color fueron los resultantes de procesos cortos de DO combinados con procesos largos de MO, y los resultantes del uso de potencias altas de trabajo.

También (salvo en el caso de SAC69 a la menor potencia de secado) siempre resulta conveniente utilizar a la DO como etapa de pretratamiento porque evita la pérdida de color durante el secado. En cuanto a la textura, la suma de una etapa de secado, acentúa aún más el ablandamiento promovido en la DO, aunque una mención especial la merecen los tratamientos con las soluciones de sacarosa, para  $t_{DO} = 4-12$  horas y  $P = 160$  W, ya que con esta configuración se obtienen los productos de mayor dureza.

Finalmente, a partir del proceso combinado DO-MO y en función del nivel de potencia utilizado, surgen dos tipos de producto claramente diferentes entre sí:

- Productos “macizos”: su matriz es homogénea y continua, presenta alvéolos pequeños uniformemente distribuidos, con aspecto de esponja. Se obtienen con los niveles de potencia más bajos.
- Productos “huecos”: sus paredes son delgadas (e inclusive transparentes en algunos casos), las capas siguientes del tejido son húmedas y pastosas y en el centro se percibe un hueco de gran magnitud. Estos productos surgen del uso de las potencias intermedias y altas.

Es decir que, a las posibilidades para desarrollar productos innovadores que ofrece la DO, se suman las que ofrece el secado por microondas de acuerdo con la potencia utilizada. Entonces, considerando este campo aún más amplio de diseño, resultó interesante evaluar las oportunidades de mejora del proceso DO-MO. Con este fin, se recurrió a una corriente de aire caliente como herramienta de asistencia al secado por MO y se examinó la eficacia del acoplamiento del SAC al proceso DO-MO.

A partir de aquí se decidió obtener los productos macizos utilizando la potencia más baja ( $P = 160$  W) y los huecos utilizando la potencia intermedia ( $P = 350$  W). Se trabajó con este nivel de potencia medio y no con los dos mayores (500 y 650 W) ya que, de las potencias más altas, es el que permite obtener los productos huecos preservando en mayor medida la calidad. Los resultados indicaron que adicionar una asistencia con SAC es útil

cuando se practica el secado a la potencia más baja debido a que los tiempos de secado disminuyen y el color de los productos obtenidos de DO-MO-SAC es mejor que el de los obtenidos con DO-MO.

Por otro lado, cuando la potencia de trabajo es mayor, no presentan diferencias ambos métodos con respecto a la duración del secado ni al color de los productos. No obstante, sí existe una diferencia en la textura: los productos obtenidos con DO-MO-SAC son más duros que los obtenidos con DO-MO.

Es decir que si el objetivo es obtener productos macizos, entonces incorporar una asistencia con SAC permite optimizar el proceso de DO-MO, en tanto que no redundaría en beneficios incorporar el SAC a un proceso de DO-MO diseñado para obtener productos huecos.

En conjunto -entendiendo que este tipo de productos podría ser incorporado a un cereal de desayuno- el comportamiento de aquellos productos obtenidos por DO-MO no difiere del de los obtenidos por DO-MO-SAC cuando son rehidratados en leche. No obstante, una mención especial es necesaria para los productos huecos correspondientes a  $t_{DO} = 2$  h y tratados con MO, que se rehidratarían de mejor manera que los obtenidos con MO-SAC. Estos últimos tendrían una estructura más compacta (menos abierta) resultante de un mayor encogimiento.

En conjunto, cabe rescatar que en esta tesis se analizó el uso del secado por microondas como técnica central de deshidratación y no bajo el enfoque tradicional según el cual la tecnología de MO se concibe como asistencia al SAC.

De hecho se comprobó la validez de esta técnica por sí sola y que en ciertos casos es innecesario combinarla con SAC. Efectivamente, si el objetivo es desarrollar los productos huecos, el SAC es innecesario; en cambio, sí (y bajo ciertas condiciones) tendría sentido incorporar la asistencia del SAC al MO, como en el desarrollo de los productos macizos. No obstante, es necesario reafirmar que el secado por MO utilizado como técnica unitaria -adicionada a la DO-, es suficiente para desarrollar estos productos huecos y macizos y que, el SAC es un factor de optimización de MO bajo la premisa de reducir tiempos de secado. Sin embargo, es fundamental dimensionar cómo impacta una reducción de los tiempos de secado sobre la duración del proceso global. Es decir, si bien se comprobó que incorporar el SAC disminuye los  $t_s$  hasta un 50% (con respecto a los obtenidos con DO-MO), esto implica reducir la duración del secado de 15 a 7 minutos, y estos “minutos” frente a las

“horas” que demanda el proceso completo no representan una disminución tan significativa.

Tal como se vio en los capítulos anteriores, la duración del proceso global está determinada en la mayoría de los casos por la DO y por lo tanto, la incorporación del SAC carece de sentido como elemento de mejora de la etapa no crítica. Claro es que se puede arribar a esta conclusión una vez que se vio que en el resto de las propiedades o atributos, los productos obtenidos por DO-MO y los obtenidos por DO-MO-SAC, prácticamente no guardan diferencias.

En cuanto a la relevancia de la DO como pretratamiento o primera fase del proceso combinado, cabe destacar su capacidad para evitar el deterioro de la calidad de los productos en comparación con los obtenidos mediante un proceso de secado unitario (por MO o SAC). Si bien esta ventaja ha sido discutida en la literatura, en este trabajo se desarrolló un beneficio adicional de la DO: permite obtener productos bien diferenciados (huecos y macizos), los cuales no son posibles en un proceso convencional de secado. Por lo tanto, el diseño de un proceso global que permita obtener productos con estas características, para diferentes aplicaciones, requiere de una etapa previa de DO.

Por otra parte, las clases de productos obtenidos merecen un análisis aún más profundo sobre su performance al ser incorporados a alimentos tradicionales como cereales de desayuno, barras de cereal, galletitas o directamente como *snacks*.

Lo cierto es que desarrollar alimentos innovadores a partir de la implementación de las microondas es un terreno poco estudiado e indudablemente auspicioso y que la deshidratación osmótica ha demostrado una vez más -en esta oportunidad combinada con las MO- su efectividad para preservar la calidad de los alimentos y desarrollar productos novedosos.

Finalmente, vale mencionar la necesidad de búsqueda y/o adaptación de técnicas experimentales para el monitoreo preciso y a nivel microscópico de los procesos de transporte y estructurales que ocurren durante las diferentes etapas de secado. Con el objetivo de diseñar, optimizar y controlar procesos como los desarrollados en este trabajo, es esencial el conocimiento de dichos fenómenos y la influencia de las variables operativas sobre los mismos. De esta manera, se podrá mejorar la calidad de los productos obtenidos, en forma eficiente.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abers, J. E., & Wrolstad, R. E. (1979). Causative factors of colour deterioration in strawberry preserves during processing and storage. *Journal of Food Science*, *44*, 75-78, 81.
- Aguilera, J. M., Oppermann, K., & Sanchez, F. (1987). Kinetics of browning sultana grapes. *Journal of Food Science*, *52*, 990-993, 1025.
- Al-Duri, B., & McIntyre, S. (2005). Comparison of drying kinetics of foods using a fan-assisted convection oven, a microwave oven and a combined microwave/convection oven. *Journal of Food Engineering*, *15*, 139-155.
- Alvarez, C. A., Aguerre, R., Gomez, R., Vidales; S., Alzamora, S. M., & Gerschenson, L. N. (1995). Air dehydration of strawberries: effects of blanching and osmotic pretreatments on the kinetics of moisture transport. *Journal of Food Engineering*, *25*, 167-178.
- Alzamora, S. M., Castro, M. A., Nieto, A. B., Vidales, S. L., & Salvatori, D. M. (2000). *The Role of Tissue Microstructure in the Textural Characteristics of Minimally Processed Fruits*. En S.M. Alzamora, M.S. Tapia, & A. López-Malo (Eds.), *Minimally processed fruits and vegetables*. Aspen Publishers Inc., Maryland, 153-171.
- ANMAT (2004). Código Alimentario Argentino (Capítulo XVII). URL: [http://www.anmat.gov.ar/codigoa/CAPITULO\\_XVII\\_Dieteticos%28actualiz\\_04-07%29.pdf](http://www.anmat.gov.ar/codigoa/CAPITULO_XVII_Dieteticos%28actualiz_04-07%29.pdf)
- AOAC (1995). En K. Helrich, *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists* (5ta ed.). Washington, DC: AOAC.
- Barat, J. M., Chiralt, A., & Fito, P. (1998). Equilibrium in cellular food osmotic solution systems as related to structure. *Journal of Food Science*, *63*, 836-840.
- Barreiro, J. A., Milano, M., & Sandoval, A. J. (1997). Kinetics of colour change of double concentrated tomato paste during thermal treatment. *Journal of Food Engineering*, *33*, 359-371.

- Bilbao-Sainz, C., Andrés, A., & Fito, P. (2005). Hydration kinetics of dried apple as affected by drying conditions. *Journal of Food Engineering*, *68*, 369-376.
- Biswal R. & Bozorgmehr K. (1992). Mass transfer in mixed solute osmotic dehydration of apple rings. *ASAE Journal*, *35*, 257-265.
- Bolin, H. R., & Huxsoll, C. C. (1993). Partial drying of cut pears to improve freeze/thaw texture. *Journal of Food Science*, *58*, 357-360.
- Bolin, H. R., Huxsoll, C. C., Jackson, R., & Ng, K. C. (1983). Effect of osmotic agent and concentration on food quality. *Journal of Food Science*, *48*, 202-205.
- Borginwar, D. R., & Srinivasan, A. (1977). Studies on osmotic dehydration of banana. *Journal of Food Science and Technology*, *14*, 104-112.
- Bouraoui, M., Richard, P., & Durance, T. (1994). Microwave and convective drying of potato slices. *Journal of Food Process Engineering*, *17*, 353-363.
- Bray, E. A., Bailey-Serres, J., & Weretilnyk, E. (2000). *Responses to Abiotic Stresses*. En: B.B. Buchanam, W. Gruissem and R.L. Jones, (Eds), *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. American Society of Plant Physiologists, Maryland, 1158–1203.
- Broyart, B., Trystram, G., & Duquenoy, A. (1998) Predicting colour kinetics during cracker baking. *Journal of Food Engineering*, *35*, 351-368.
- Chafer, M, Gonzales-Martinez, C., Ortola, M. D., & Chiralt, A. (2001). Long term osmotic dehydration of orange peel at atmospheric pressure and by applying a vacuum pulse. *Food Science and Technology International*, *7*, 273-289.
- Chiralt, A., & Fito, P. (2003). Transport mechanisms in osmotic dehydration: the role of the structure. *Food Science and Technology International*, *9*, 179-186.
- Chirife, J., & Resnik, S. (1984). Unsaturated solutions as reference sources of water activity at various temperatures. *Journal of Food Science*, *49*, 1486-1488.
- Christian, J. H. B. (1980). *Reduced Water Activity*. En Silliker, J. H., & Elliott, R. P. (Eds.). *Microbial Ecology of Foods*. Academic Press, Volumen I, 70-90.
- Chua, K. J., Mujumdar, A. S., Hawlader, M. N. A., Chou, S. K., & Ho, J. C. (2001). Batch drying of banana pieces-effect of stepwise change in drying air temperature on drying kinetics and product color. *Food Research International*, *34*, 721-731.
- Contreras, C., Martin, M. E., Martínez-Navarrete, N., & Chiralt, A. (2005). Effect of vacuum impregnation and microwave application on structural changes which occurred during air-drying of apple. *LWT-Food Science and Technology*, *38*, 471-477.

- De los Reyes, R., Heredia, A., Fito, P., De los Reyes, E., & Andrés, A. (2007). Dielectric spectroscopy of osmotic solutions and osmotically dehydrated tomato products. *Journal of Food Engineering*, *80*, 1218-1225.
- de Vries, U., Sluimer, P., & Bloksma, A. H. (1989). *A Quantitative Model for Heat Transport in Dough and Crumb During Baking*. En N. G. Asp., *Cereal Science and Technology in Sweden*. Lund University Chemical Centre, Sweden, 174-188.
- Derossi, A., De Pilli, T., Severini, C., & McCarthy, M. J. (2008). Mass transfer during osmotic dehydration of apples. *Journal of Food Engineering*, *86*, 519-528.
- Dixon, G. M., & Jen, J. J. (1977). Changes of sugar and acid in osmotic dried apple slices. *Journal of Food Science*, *42*, 1126-1131.
- Feng, H., & Tang, J. (1998). Microwave finish drying of diced apples in a spouted bed. *Journal of Food Science*, *63*, 679-683.
- Feng, H., & Tang, J. (1998). Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. *Journal of Food Engineering*, *38*, 353-367.
- Feng, H., Tang, J., Cavalieri, R. P., & Plumb, O. A. (2001). Heat and mass transport in microwave drying of hygroscopic porous material in a spouted bed. *AIChE Journal*, *74*, 1499-1511.
- Fennema, O. R. (1996). *Water and Ice*. En Owen R. Fennema, (Ed.), *Food Chemistry*. Marcel Dekker, Inc., Madison, Wisconsin, 18-88.
- Ferrando, M., & Spiess, W. E. L. (2001). Cellular response of plant tissue during the osmotic treatment with sucrose, maltose and threolose solutions. *Journal of Food Engineering*, *49*, 115-127.
- Food and Drug Administration, Division of Dockets Management. (2005). URL: <http://www.fda.gov/ohrms/dockets/dockets/05n0120/05N-0120-EC5-Attach-1.pdf>
- Forni, E., Torreggiani, D., Battistin, P., & Polesello, A. (1986). Research into changes of pectic substances in apricots and peaches processed by osmotic dehydration. *Carbohydrate Polymers*, *6*, 379-393.
- Funebo, T., & Ohlsson, T. (1998). Microwave assisted air dehydration of apple and mushroom. *Journal of Food Engineering*, *38*, 353-367.
- García-Viguera, C., Zafrilla, P., Romero, F., Abellan, P., Artes, F., & Tomas-Barberan, F. A. (1999). Colour stability of strawberry jam as affected by cultivar and storage temperature. *Journal of Food Science*, *64*, 243-247.

- Gekas, V., Baralla, G., & Flores, V. (1998). Applications of membrane technology in the food industry. *Food Science Technology International*, 4, 311-328.
- Giangiaco, R., Torregiani, D., & Abbo, E. (1987). Osmotic dehydration of fruit. Part I: sugar exchange between fruit and extracting syrup. *Journal of Food Processing and Preservation*, 11, 183-195.
- Giraldo, G., Vázquez, R., Martín-Esparza, M. E., & Chiralt, A. (2006). Rehydration kinetics and soluble solids lixiviation of candied mango fruit as affected by sucrose concentration. *Journal of Food Engineering*, 77, 825-834.
- Haard, N., & Chism, G. W. (1996). *Characteristics of Edible Plants Tissues*. En Owen R. Fennema (Ed.), Food Chemistry. Marcel Dekker, Inc., Madison, Wisconsin, 943-1007.
- Hawkes, J., & Flink, J. M. (1978). Osmotic concentration of fruits slices prior to freeze dehydration. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2, 265-284.
- Ibarz, A., Pagan, J., & Garza, S. (1999). Kinetic model for colour changes in pear puree during heating at relatively high temperatures. *Journal of Food Engineering*, 39, 415-422.
- Ilker, R., & Szczesniak, A. S. (1990). Structural and chemical bases for texture plant food. *Journal of Texture Studies*, 21, 1-36.
- Islam, M. N., & Flink, J. N. (1982). Dehydration of potato II. Osmotic concentration and its effect on air drying behaviour. *Journal of Food Technology*, 17, 387-403.
- Isse M., & Schubert T. (1991). *Osmotic Dehydration of Mango*. Proceedings of Fourth World Congress of Chemical Engineering. Karlsruhe, Germany, 738-745.
- Jackman, R. L., Marangoni, A. G., & Stanley, D. W. (1992). The effects of turgor pressure on puncture and viscoelastic properties of tomato tissue. *Journal of Texture Studies*, 23, 491-505.
- Jia, L. W., Islam, M. R., & Mujumdar, A. S. (2003). A simulation study on convection and microwave drying of different food products. *Drying Technology*, 21, 1549-1574.
- Karathanos, V. T. Kostaropoulos, A. E., & Saravakos, G. D. (1995). Air drying kinetics of osmotically dehydrated fruits. *Drying Technology*, 13, 1503-1521.
- Kelen, A., Ress, S., Nagy, T., Pallai, E., & Pintye-Hodi, K. (2006). Mapping of temperature distribution in pharmaceutical microwave vacuum drying. *Powder Technology*, 162, 133-137.
- Keurentjes, J. T. F., Janssen, A. E. M., A. P. Broek, A. P., Van der Padt, A. P., Wesselingh, J. A., & Van T'Riet, K. (1992). Multicomponent diffusion in dialysis membranes. *Chemical Engineering Science*, 47, 1963-1971.

- Khraisheh, M. A. M; Cooper T. J. R., & Magee, T. R. A. (1997). Microwave and air drying. Fundamental considerations and assumptions for the simplified thermal calculations of volumetric power absorption. *Journal of Food Engineering*, 33, 207-219.
- Kim, M. H., & Toledo, R. T. (1987). Effect of osmotic dehydration and high temperature fluidized bed drying on properties of dehydrated rabbiteye blueberries. *Journal of Food Science*, 52, 980-889.
- Kostaropoulos, A. E., & Saravacos, G. D. (1995). Microwave pretreatment for sun-dried raisins. *Journal of Food Science*, 60, 344-347.
- Lazarides, H. N., & Mavroudis, N. E. (1996). Kinetics of osmotic dehydration of a highly shrinking vegetable tissue in a salt-free medium. *Journal of Food Engineering*, 30, 61-74.
- Lee, H. S., & Coates, G. A. (1999). Thermal pasteurization effects on colour of red grapefruit juices. *Journal of Food Science*, 64, 663-665.
- Lenart, A. (1996). Osmo-convective drying of fruits and vegetables: Technology and application. *Drying Technology*, 14, 391-413.
- Lenart, A., & Flink, J. M. (1984). Osmotic concentration of potato: I. Criteria for end point of the osmotic process. *Journal of Food Technology*, 19, 45-63.
- Lerici, C. L., Pinnavaia, G., Dalla Rosa, M., & Bartolucci, L. (1985). Osmotic dehydration of fruit: influence of osmotic agents on drying behaviour and product quality. *Journal of Food Science*, 50, 1217-1219.
- Lewicki, P. P., & Porzecka-Pawlak; R. (2005). Effect of osmotic dewatering on apple tissue structure. *Journal of Food Engineering*, 66, 43-50.
- Lewicki, P. P., Vu Le, H., & Pomaranska-Lazuka, W. (2001). Effect of pre-treatment on convective drying of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, 54, 141-146.
- Lin, T. M., Durante, T. D., & Scaman, C. H. (1998). Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices. *Food Research International*, 4, 111-117.
- Lindsay, R. C. (1996). Food Additives. En Owen R. Fennema (Ed.), *Food Chemistry*. Marcel Dekker, Inc., Madison, Wisconsin, 768-821.
- Lozano, J. E., & Ibarz, A. (1997). Colour changes in concentrated fruit pulp during heating at high temperatures. *Journal of Food Engineering*, 44, 71-78.
- Lozano, J. E., Rotstein, E., & Urbicain, M., J. (1983): Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. *Journal of Food Science*, 48, 1947-1502, 1553.

- Mandala, I. G., Anagnostaras, E. F., & Oikonomou, C. K. (2005). Influence of osmotic dehydration conditions on apple air-drying kinetics and their quality characteristics. *Journal of Food Engineering*, *69*, 307-316.
- Marani, C. M. (2007). Dehidrocongelación de productos frutihortícolas. Universidad Nacional de La Plata. Informe inédito.
- Marani, C. M., Agnelli, M. E., & Mascheroni, R. H. (2006). Osmo-frozen fruits: mass transfer and quality evaluation. *Journal of Food Engineering*, *79*, 1122-1130.
- Martínez, V. Y., Nieto, A. B., Castro, M. A., Salvatori, D., & Alzamora, S. M. (2007). Viscoelastic characteristics of Granny Smith apple during glucose osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, *83*, 394-403.
- Maskan, M. (2000a). Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, *48*, 169-175.
- Maskan, M. (2000b). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, *44*, 71-78.
- Maskan, M. (2001). Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, *48*, 177-182.
- Mastrocola, D., & Lericci, C. R. (1991). Colorimetric measurements of enzymatic and nonenzymatic browning in apple purees. *Journal of Food Science*, *3*, 219-229.
- Mavroudis, N. E., Dejmek, P., & Sjöholm, I. (2004). Osmotic-treatment-induced cell death and osmotic processing kinetics of apples with characterised raw material properties. *Journal of Food Engineering*, *63*, 47-56.
- Mavroudis, N. E., Gekas, V., & Sjöholm, I., 1996. Osmotic dehydration of apples-effects of agitation and raw material characteristics. *Journal of Food Engineering*, *35*, 191-209.
- Mayor, L., & Sereno, A. M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, *61*, 373-386.
- Mayor, L., Pissarra, J., & Sereno, A. M. (2007). Microstructural changes during osmotic dehydration of parenchymatic pumpkin tissue. *Journal of Food Engineering*, *85*, 326-339.
- Mizrahi, S., Eichler, S., & Ramon, O. (2001). Osmotic dehydration phenomena in gel systems. *Journal of Food Engineering*, *49*, 87-96.
- Monsalve-Gonzalez, A., Barbosa-Cánovas, G. V., & Cavalieri, R. P. (1993). Mass transfer and textural changes during processing of apples by combined methods. *Journal of Food Science*, *58*, 1118-1124.
- Mousa, N., & Farid, M. (2002). Microwave vacuum drying of banana slices. *Drying Technology*, *20*, 2055-2066.

- Mudgett, T. E., & Westphal, W. B. (1989). Dielectric behavior of an aqueous cation exchanger. *Journal of Microwave Power*, 24, 33-37.
- Muhr A., & Blanshard J. (1982). Diffusion in gels. *Polymer*, 23, 1012-1026.
- Mullin, J., & Bows, J. (1993). Temperature measurements during microwave cooking. *Food Additives Contamination*, 10, 663-672.
- Nieto, A. B., Salvatori, D. M., Castro, M. A., & Alzamora, S. M. (2003). Structural changes in apple tissue during glucose and sucrose osmotic dehydration: shrinkage, porosity, density and microscopic features. *Journal of Food Engineering*, 61, 269-278.
- Nieto, A., Salvatori, D., Castro, M. A., & Alzamora, S. M. (1998). Air drying behaviour of apples as affected by blanching and glucose impregnation. *Journal of Food Engineering*, 36, 63-79.
- Nijhuis, H. H., Torringa, E., Luyten, H., René, F., Jones, P., Funebo, T., & Ohlsson, T. (1996). Research needs and opportunities in the dry conservation of fruits and vegetables. *Drying Technology*, 14, 1429-1457.
- Nijhuis, H. H., Torringa, H. M., Muresan, S., Yuksel, D., Leguijt C., & Kloek, W. (1998). Approaches to improving the quality of dried fruit and vegetables. *Food Science and Technology*, 9, 13-20.
- Nindo, C., Ting, S., Wang, S. W., Tang, J., & Powers, J. R. (2003). Evaluation of drying technologies for retention of physical and chemical quality of green asparagus (*Asparagus officinalis* L.). *LWT-Food Science and Technology*, 36, 507-516.
- Osorio, C., Franco, M. S., Castaño, M. P., González-Miret, M. L., Heredia, F. J., & Morales, A. L. (2007). Colour and flavour changes during osmotic dehydration of fruits. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 8, 353-359.
- Ponting, J. D., Walters, G. G., Forrey, R. R., Jackson, R., & Stanley, W. L. (1966). Osmotic dehydration of fruits. *Food Technology*, 20, 125-128.
- Prabhanjan, D. G., Ramaswamy, H. S., & Raghavan, G. (1995). Microwave-assisted convective air drying of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering*, 25, 283-293.
- 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*, 34, 95-101.
- Purlis, E., & Salvadori, V. O. (2007). Bread browning kinetics during baking. *Journal of Food Engineering*, 80, 1107-1115.
- Purlis, E., & Salvadori, V. O. (2009). Modelling the browning of bread during baking. *Journal of Food Engineering*, 42, 865-870.

- Rahman, S., & Lamb, J. (1991). Air drying behavior of fresh and osmotically dehydrated pineapple. *Journal of Food Process Engineering*, *14*, 163-171.
- Ramaswamy, H. S., & Nsonzi, F. (1998). Convective air drying kinetics of osmotically pre-treated blueberries. *Drying Technology*, *16*, 743-759.
- 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. *Drying Technology*, *9*, 589-612.
- Raoult-Wack, A. L. (1994). Recent advances in the osmotic dehydration of foods. *Trends in Food Science & Technology*, *5*, 255-260.
- Rastogi, N. K., & Raghavarao, K. S. M. S. (1995). Kinetics of osmotic dehydration of coconut. *Journal of Food Process Engineering*, *18*, 187-197.
- Rastogi, N. K., Raghavarao, K., Niranjana, K., & Knorr, D. (2002). Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. *Trends in Food Science & Technology*, *13*, 48-59.
- Rastogi, N., Angersbach, A., & Knorr, D. (2000). Synergistic effect of high hydrostatic pressure pretreatment and osmotic stress on mass transfer during osmotic dehydration. *Journal of Food Engineering*, *4*, 25-31.
- Reppa, A., Mandala, J., Kostaropoulos, A. E., & Saravacos, G. D. (1999) Influence of solute temperature and concentration on the combined osmotic and air drying. *Drying Technology*, *17*, 1449-1458.
- Riva, M., Campolongo, S., Leva, A., Maestrelli, A., & Torregiani, D. (2005). Structure-property relationships in osmodehydrated apricot cubes. *Food Research International*, *38*, 533-542.
- Romero Baranco, C., Brenes Balbuena, M., García García, P., & Garrido Fernández, A. (2001). Management of spent brines or osmotic solutions. *Journal of Food Engineering*, *49*, 237-246.
- Rosenthal, A. J. (1999). *Food Texture: Measurement and Perception*. Maryland: Aspen Publishers Inc.
- Sacchetti, G., Gianotti, A., & Dalla Rosa, M. (2001). Sucrose-salt combined effects on mass transfer kinetics and product acceptability. Study on apple osmotic treatments. *Journal of Food Process Engineering*, *49*, 163-173.
- Sajnin, C., Gerschenson, L. N., & Rojas, A. M. (1999). Turgor pressure in vegetable tissues: comparison of the performance of incipient plasmolysis technique using mannitol and polyethylenglycol. *Food Research International*, *32*, 531-537.

- Salvatori, D., Andrés, A., Albors, A., Chiralt, A., & Fito, P. (1998). Structural and compositional profiles in osmotically dehydrated apple. *Journal of Food Science*, *63*, 606-610.
- Sankat, C. K., Castaigne, F., & Maharaj, R. (1996). The air drying behaviour of fresh and osmotically dehydrated banana slices. *International Journal of Food Science and Technology*, *31*, 123-135.
- Saurel, R., Raoult-Wack, A. L., Ríos, G., & Guilbert, S. (1994). Mass transfer phenomena during osmotic dehydration of apple. I: Fresh plant tissue. *International Journal of Food Science and Technology*, *29*, 531-542.
- Schiffmann, R. F. (1995). Microwave and dielectric drying. *Handbook of Industrial Drying*, *1*, 345-371.
- Sereno, A. M., Moreira, R., & Martinez, E. (2001). Mass transfer coefficients during osmotic dehydration of apple in single and combined aqueous solutions of sugar and salt. *Journal of Food Engineering*, *47*, 43-49.
- Sharma, G. P., & Prasad, S. (2001). Drying of garlic (*Allium sativum*) cloves by microwave-hot air combination. *Journal of Food Engineering*, *50*, 99-105.
- Shibukawa, S., Sigiya, K., & Yano, T. (1989). Effects of heat transfer by radiation and convection on browning of cookies at baking. *Journal of Food Science*, *54*, 621-624.
- Silliker, J. H., Elliott, R. P., Baird-Parker, A. C., Bryan, F. L., Christian, J. H. B., Clark, D. S., Olson, J. C., & Roberts, T. A. (1980). *Microbial Ecology of Foods*. Volumen II, 606-635. Academic Press.
- Simal, S., Deyá, E., Frau, M., & Roselló, C. (1997). Simple modelling of air-drying curves of fresh and osmotically pre-dehydrated apple cubes. *Journal of Food Engineering*, *33*, 139-150.
- Skedre, G. (1985). Colour quality of blankcurrant syrups during storage evaluated by Hunter. *Journal of Food Science*, *50*, 514-517, 525.
- Sluimer, P., & Krist-Spit, C. E. (1987). *Heat Transport in Dough During the Baking of Bread*. En I. D. Morton, *Cereals in a European Context*. Chichester, UK: Ellis Horwood Ltd., 355-363.
- Spiazzi, E., & 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*, 387-410.
- Torreggiani, D. (1993). Osmotic dehydration in fruits and vegetable processing. *Food Research International*, *26*, 59-68.

- Torreggiani, D., Forni, D., Maestrelli, A., & Quadri, F. (1998). Influence of osmotic dehydration on texture and pectic composition of kiwifruit slices. Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS'98), Halkidiki, Greece, 930-937.
- Torrington, E., Esveld, E., Scheewe, I., van der Berg, R., & Bartels, P. (2001). Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot-air drying mushrooms. *Journal of Food Engineering*, *49*, 185-191.
- Tregunno, N. B., & Goff, H. D. (1996). Osmodehydrofreezing of apples: structural and textural effects. *Food Research International*, *29*, 471-479.
- Vadivambal, R., & Jayas, D. S. (2007). Changes in quality of microwave-treated agricultural products – a review. *Biosystems Engineering*, *98*, 1-16.
- Valentines, M. C., Vilaplana, R., Torres, R., Usall, J., & Larrigaudière, C. (2005). Specific role of enzymatic browning and lignification in apple disease resistance. *Postharvest Biology and Technology*, *36*, 227-234.
- Vega-Mercado, H., Góngora-Nieto, M. M., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2001). Advances in dehydration of foods. *Journal of Food Engineering*, *49*, 271-289.
- Venkatachalapathy, K., & Raghavan, G. S. V. (1998). Microwave drying of osmotically dehydrated blueberries. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, *33*, 95-102.
- Venkatesh, M. S., & Raghavan, G. S. V. (2004). An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. *Biosystems Engineering*, *88*, 1-18.
- Wang, J., & Sheng, K. (2006). Far-infrared and microwave drying of peach. *LWT-Food Science and Technology*, *39*, 247-255.
- Warczok, J., Ferrando, M., López, F., Pihlajamäki, A., & Güell, C. (2007). Reconcentration of spent solutions from osmotic dehydration using direct osmosis in two configurations. *Journal of Food Engineering*, *80*, 317-326.
- Yao, Z., & Le Maguer, M. (1997). Osmotic dehydration: an analysis of fluxes and shrinkage in cellular structure, *Trans. ASAE*, *39*, 2211-2216.
- Yongsawatdigul, J., & Gunasekaran, S. (1996). Microwave vacuum drying of cranberries, part I: energy use and efficiency. *Journal of Food Processing and Preservation*, *20*, 121-143.
- 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.

## APÉNDICE A

### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS SOLUTOS DESHIDRATANTES

**Tabla A.1.** Especificaciones fisicoquímicas y microbiológicas del azúcar Común Tipo A, Marca Ledesma, utilizado para efectuar la DO ([www.ledesma.com.ar/azucar\\_tipoa.html](http://www.ledesma.com.ar/azucar_tipoa.html)).

Especificaciones Fisicoquímicas	
Aspecto	Cristales blancos transparentes duros.
Sabor	Dulce característico.
Olor	Libre de olores extraños.
Polarización	$\geq 99.7$ .
Humedad (%)	$\leq 0.05$ .
Azúcar Invertido (%)	$\leq 0.05$ .
Ceniza Conductimétrica (%)	$\leq 0.05$ .
Color (°I)	$\leq 105$ .
SO <sub>2</sub> (ppm)	$\leq 40$ .
Arsénico (ppm)	$\leq 1$ .
Cobre (ppm)	$\leq 2$ .
Plomo (ppm)	$\leq 0.5$ .
Especificaciones Microbiológicas	
Bacterias aerobias totales (ufc/10 g)	$\leq 200$ .
Hongos (ufc/10g)	$\leq 10$ .
Levaduras (ufc/10g)	$\leq 10$ .

**Tabla A.2.** Especificaciones fisicoquímicas del xilitol, Marca XYLISORB de Roquette (Francia) utilizado para efectuar la DO ([www.roquette-food.com/delia-CM](http://www.roquette-food.com/delia-CM)).

Apariencia: polvo blanco, dulce y cristalino. Sin olor
Poder endulzante: 1 (igual al de la sacarosa).
Alta disolución en agua.
Poder calorífico: 2.4 cal/g.
No cariogénico.
No fermentable.
Densidad= 0.5-0.85 g/cm <sup>3</sup> dependiendo del tamaño de partícula.
Peso molecular: 152 g/mol.
Temperatura de fusión: 90-95 °C.

**Tabla A.3.** Especificaciones fisicoquímicas y microbiológicas del jarabe de alto peso molecular (AAPM), Marca Globe 1024 de Productos de Maíz, utilizado para efectuar la DO.

Composición de azúcares (HPLC)	% de sólidos solubles
Glucosa (Dextrosa)	16
Maltosa	12
Maltotriosa	10
Azúcares superiores	62
Especificaciones Microbiológicas	
Bacterias aerobias totales (ufc/g)	≤ 500
Hongos (ufc/g)	≤ 50
Levaduras (ufc/g)	≤ 100
Coliformes NMP/g	< 10

## APÉNDICE B

### ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA REHIDRATACIÓN

#### Influencia de la potencia utilizada en el secado por MO sobre la rehidratación

**Tabla B1:** Coeficientes de rehidratación de las muestras frescas secadas por MO a 160W y 350W ( $t_R$ : tiempo de rehidratación).

$t_R$ (min)	$t_{D0} = 0$ h	
	MO 160W	MO 350W
1.00	1.00	1.00
1.20	1.20	1.21
1.32	1.32	1.30
1.50	1.50	1.55
1.37	1.37	1.64

**Tabla B2:** Análisis de varianza (ANOVA) correspondiente a las muestras frescas secadas por MO a 160W y 350W.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
$t_R$ (min)	0.380	4	0.095	12.984	0.015	6.388
Potencia	0.010	1	0.010	1.361	0.308	7.709
Error	0.029	4	0.007			
<b>Total</b>	0.419	9				

No existen diferencias significativas durante la rehidratación, de las muestras frescas secadas por MO utilizando 160 y 350W.

**Tabla B3:** Coeficientes de rehidratación de las muestras DO 2h secadas por MO a 160W y 350W ( $t_R$ : tiempo de rehidratación).

$t_R$ (min)	$t_{DO} = 2 \text{ h}$	
	MO 160W	MO 350W
1.00	1.00	1.00
1.20	1.14	1.18
1.32	1.19	1.28
1.50	1.40	1.43
1.37	1.61	1.56

**Tabla B4:** Análisis de varianza (ANOVA) correspondiente a las muestras DO 2h secadas por MO a 160W y 350W.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
$t_R$ (min)	0.410	4	0.103	77.868	0.000	6.388
Potencia	0.001	1	0.001	0.845	0.410	7.709
Error	0.005	4	0.001	77.868	0.000	6.388
<b>Total</b>	0.416	9				

No existen diferencias significativas durante la rehidratación, de las muestras DO 2 h secadas por MO utilizando 160 y 350W.

**Tabla B5:** Coeficientes de rehidratación de las muestras DO 24 h secadas por MO a 160W y 350W ( $t_R$ : tiempo de rehidratación).

$t_R$ (min)	$t_{DO} = 24$ h	
	MO 160W	MO 350W
1.00	1.00	1.00
1.20	1.11	1.16
1.32	1.14	1.27
1.50	1.41	1.44
1.37	1.63	1.59

**Tabla B6:** Análisis de varianza (ANOVA) correspondiente a las muestras DO 24 h secadas por MO a 160W y 350W.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
$t_R$ (min)	0.470	4	0.117	58.275	0.001	6.388
Potencia	0.003	1	0.003	1.434	0.297	7.709
Error	0.008	4	0.002			
<b>Total</b>	0.481	9				

No existen diferencias significativas durante la rehidratación, de las muestras DO 24h secadas por MO utilizando 160 y 350W.

**Influencia de la potencia utilizada en el secado por MO-SAC sobre la rehidratación**

**Tabla B7:** Coeficientes de rehidratación de las muestras frescas secadas por MO-SAC a 160W y 350W ( $t_R$ : tiempo de rehidratación).

<b><math>t_{DO} = 0</math> h</b>		
$t_R$ (min)	MO-SAC 160W	MO-SAC 350W
1.00	1.00	1.00
1.20	1.25	1.30
1.32	1.18	1.56
1.50	1.51	1.55
1.37	1.78	1.82

**Tabla B8:** Análisis de varianza (ANOVA) correspondiente a las muestras frescas secadas por MO-SAC a 160W y 350W.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
$t_R$ (min)	0.709	4	0.177	14.225	0.012	6.388
Potencia	0.025	1	0.025	2.046	0.226	7.709
Error	0.050	4	0.012			
<b>Total</b>	<b>0.784</b>	<b>9</b>				

No existen diferencias significativas durante la rehidratación, de las muestras frescas secadas por MO-SAC utilizando 160 y 350W.

**Tabla B9:** Coeficientes de rehidratación de las muestras DO 2 h secadas por MO-SAC a 160W y 350W ( $t_R$ : tiempo de rehidratación).

<b><math>t_{DO} = 2 \text{ h}</math></b>		
$t_R$ (min)	MO-SAC 160W	MO-SAC 350W
1.00	1.00	1.00
1.20	1.11	1.11
1.32	1.20	1.22
1.50	1.29	1.31
1.37	1.53	1.39

**Tabla B10:** Análisis de varianza (ANOVA) correspondiente a las muestras DO 2 h secadas por MO-SAC a 160W y 350W.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
$t_R$ (min)	0.252	4	0.063	30.436	0.003	6.388
Potencia	0.001	1	0.001	0.523	0.509	7.709
Error	0.008	4	0.002			
<b>Total</b>	<b>0.261</b>	<b>9</b>				

No existen diferencias significativas durante la rehidratación, de las muestras DO 2h secadas por MO-SAC utilizando 160 y 350W.

**Tabla B11:** Coeficientes de rehidratación de las muestras DO 24 h secadas por MO-SAC a 160W y 350W ( $t_R$ : tiempo de rehidratación).

$t_{DO} = 24 \text{ h}$		
$t_R$ (min)	MO-SAC 160W	MO-SAC 350W
1.00	1.00	1.00
1.20	1.12	1.10
1.32	1.22	1.22
1.50	1.45	1.45
1.37	1.54	1.60

**Tabla B12:** Análisis de varianza (ANOVA) correspondiente a las muestras DO 24 h secadas por MO-SAC a 160W y 350W.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
$t_R$ (min)	0.447	4	0.112	297.585	0.000	6.388
Potencia	0.000	1	0.000	0.538	0.504	7.709
Error	0.002	4	0.000			
<b>Total</b>	<b>0.449</b>	<b>9</b>				

No existen diferencias significativas durante la rehidratación, de las muestras DO 24h secadas por MO-SAC utilizando 160 y 350W.

**Influencia del tipo de secado utilizado (MO o MO-SAC) sobre la rehidratación, cuando la potencia fue 160W**

**Tabla B13:** Coeficientes de rehidratación de las muestras frescas secadas por MO y por MO-SAC. Potencia de secado: 160W ( $t_R$ : tiempo de rehidratación).

$t_R$ (min)	$t_{D0} = 0$ h	
	MO 160W	MO-SAC 160W
1.00	1.00	1.00
1.20	1.20	1.25
1.32	1.32	1.18
1.50	1.50	1.51
1.37	1.37	1.78

**Tabla B14:** Análisis de varianza (ANOVA) correspondiente a las muestras frescas secadas por MO y MO-SAC a 160W.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
$t_R$ (min)	0.429	4	0.107	4.917	0.076	6.388
Tipo de secado	0.012	1	0.012	0.529	0.507	7.709
Error	0.087	4	0.022			
<b>Total</b>	<b>0.528</b>	<b>9</b>				

No existen diferencias significativas durante la rehidratación, de las muestras frescas secadas por MO y por MO-SAC utilizando 160W.

**Tabla B15:** Coeficientes de rehidratación de las muestras DO 2 h secadas por MO y por MO-SAC. Potencia de secado: 160W ( $t_R$ : tiempo de rehidratación).

<b><math>t_{DO} = 2 \text{ h}</math></b>		
$t_R$ (min)	MO 160W	MO-SAC 160W
1.00	1.00	1.00
1.20	1.14	1.11
1.32	1.19	1.20
1.50	1.40	1.29
1.37	1.61	1.53

**Tabla B16:** Análisis de varianza (ANOVA) correspondiente a las muestras DO 2 h secadas por MO y MO-SAC a 160W.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
$t_R$ (min)	0.385	4	0.096	74.400	0.001	6.388
Tipo de secado	0.004	1	0.004	3.127	0.152	7.709
Error	0.005	4	0.001			
<b>Total</b>	<b>0.394</b>	<b>9</b>				

No existen diferencias significativas durante la rehidratación, de las muestras DO 2 h secadas por MO y por MO-SAC utilizando 160W.

**Tabla B17:** Coeficientes de rehidratación de las muestras DO 24 h secadas por MO y por MO-SAC. Potencia de secado: 160W ( $t_R$ : tiempo de rehidratación).

<b><math>t_{DO} = 24 \text{ h}</math></b>		
$t_R$ (min)	MO 160W	MO-SAC 160W
1.00	1.00	1.00
1.20	1.11	1.12
1.32	1.14	1.22
1.50	1.41	1.45
1.37	1.63	1.54

**Tabla B18:** Análisis de varianza (ANOVA) correspondiente a las muestras DO 24 h secadas por MO y MO-SAC a 160W.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
$t_R$ (min)	0.461	4	0.115	62.221	0.001	6.388
Tipo de secado	0.000	1	0.000	0.093	0.776	7.709
Error	0.007	4	0.002			
<b>Total</b>	<b>0.468</b>	<b>9</b>				

No existen diferencias significativas durante la rehidratación, de las muestras DO 24 h secadas por MO y por MO-SAC utilizando 160W.

**Influencia del tipo de secado utilizado (MO o MO-SAC) sobre la rehidratación, cuando la potencia fue 350W**

**Tabla B19:** Coeficientes de rehidratación de las muestras frescas secadas por MO y por MO-SAC. Potencia de secado: 350W ( $t_R$ : tiempo de rehidratación).

$t_R$ (min)	$t_{D0} = 0$ h	
	MO 350W	MO-SAC 350W
1.00	1.00	1.00
1.20	1.21	1.30
1.32	1.30	1.56
1.50	1.55	1.55
1.37	1.64	1.82

**Tabla B20:** Análisis de varianza (ANOVA) correspondiente a las muestras frescas secadas por MO y MO-SAC a 350W.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
$t_R$ (min)	0.625	4	0.156	24.086	0.005	6.388
Tipo de secado	0.028	1	0.028	4.313	0.106	7.709
Error	0.026	4	0.006			
<b>Total</b>	<b>0.679</b>	<b>9</b>				

No existen diferencias significativas durante la rehidratación, de las muestras frescas secadas por MO y por MO-SAC utilizando 350W.

**Tabla B21:** Coeficientes de rehidratación de las muestras DO 2 h secadas por MO y por MO-SAC. Potencia de secado: 350W ( $t_R$ : tiempo de rehidratación).

<b><math>t_{DO} = 2 \text{ h}</math></b>		
$t_R$ (min)	MO 160W	MO-SAC 160W
1.00	1.00	1.00
1.20	1.18	1.11
1.32	1.28	1.22
1.50	1.43	1.31
1.37	1.56	1.39

**Tabla B22:** Análisis de varianza (ANOVA) correspondiente a las muestras DO 2 h secadas por MO y MO-SAC a 350W.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
$t_R$ (min)	0.278	4	0.069	36.015	0.002	6.388
Tipo de secado	0.017	1	0.017	8.741	0.042	7.709
Error	0.008	4	0.002			
<b>Total</b>	<b>0.302</b>	<b>9</b>				

Existen diferencias significativas durante la rehidratación, de las muestras DO 2 h secadas por MO y por MO-SAC utilizando 350W.

**Tabla B23:** Coeficientes de rehidratación de las muestras DO 24 h secadas por MO y por MO-SAC. Potencia de secado: 350W ( $t_R$ : tiempo de rehidratación).

<b><math>t_{DO} = 24 \text{ h}</math></b>		
$t_R$ (min)	MO 160W	MO-SAC 160W
1.00	1.00	1.00
1.20	1.16	1.10
1.32	1.27	1.22
1.50	1.44	1.45
1.37	1.59	1.60

**Tabla B24:** Análisis de varianza (ANOVA) correspondiente a las muestras DO 24 h secadas por MO y MO-SAC a 350W.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
$t_R$ (min)	0.456	4	0.114	205.002	0.000	6.388
Tipo de secado	0.001	1	0.001	1.257	0.325	7.709
Error	0.002	4	0.001			
<b>Total</b>	<b>0.459</b>	<b>9</b>				

No existen diferencias significativas durante la rehidratación, de las muestras DO 24 h secadas por MO y por MO-SAC utilizando 350W.

## APÉNDICE C

### ERRORES TÍPICOS

**Tabla C1:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana fresca (sin DO y sin MO).

Variable	N	Error Típico
<i>Hbs</i>	3	0.413
<i>Hbb</i>	3	0.007
<i>a<sub>w</sub></i>	3	0.001
<i>L*</i>	10	0.415
<i>a*</i>	10	0.251
<i>b*</i>	10	0.617
<i>D</i>	10	4.771
<i>C</i>	10	1.377
<i>A</i>	10	0.131

**Tabla C2:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana fresca secada con microondas.

Variable	N	160W		350 W		500 W		650W	
		Exp. 1	Exp. 2						
<i>Hbs</i>	2	0.022	0.014	0.019	0.016	0.150	0.007	0.095	0.102
<i>Hbb</i>	2	0.014	0.008	0.011	0.008	0.070	0.003	0.055	0.043
<i>a<sub>w</sub></i>	3	0.023	0.018	0.021	0.034	0.017	0.024	0.013	0.018
<i>L*</i>	10	2.171	2.411	2.070	1.937	1.269	2.295	2.472	2.044
<i>a*</i>	10	0.269	0.365	0.660	0.474	0.590	1.124	0.645	1.261
<i>b*</i>	10	0.810	0.865	1.380	1.499	1.200	1.012	1.181	0.736
<i>D</i>	10	2.442	3.309	2.415	1.664	4.480	4.533	3.392	2.226
<i>C</i>	10	0.049	0.007	0.016	0.038	0.036	0.024	0.037	0.044
<i>A</i>	10	0.006	0.007	0.036	0.027	0.039	0.005	0.012	0.041
<i>t<sub>s</sub></i>	2	0.000		0.000		0.000		0.000	
<i>WL(%)</i>	2	0.203		0.323		0.692		2.550	

**Tabla C3:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana DO con SAC69.

Variable	N	$t_{DO} = 1$ h		$t_{DO} = 2$ h		$t_{DO} = 4$ h		$t_{DO} = 12$ h		$t_{DO} = 24$ h	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
<i>Hbs</i>	2	0.116	0.066	0.305	0.342	0.159	0.106	0.033	0.066	0.005	0.098
<i>Hbb</i>	2	0.004	0.004	0.011	0.013	0.010	0.005	0.005	0.004	0.001	0.028
<i>a<sub>w</sub></i>	3	0.002	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.001	0.002	0.001
<i>L*</i>	10	1.411	1.264	0.866	0.860	0.341	0.279	1.021	1.264	1.152	1.415
<i>a*</i>	10	0.196	0.290	0.437	0.101	0.251	1.460	0.415	0.290	0.446	0.709
<i>b*</i>	10	0.701	0.677	0.791	0.481	0.296	0.296	0.460	0.677	0.614	1.287
<i>D</i>	10	3.931	2.819	3.502	2.853	2.913	1.054	3.051	2.541	3.143	2.584
<i>C</i>	10	0.004	0.004	0.006	0.005	0.008	0.011	0.024	0.014	0.012	0.009
<i>A</i>	10	0.076	0.063	0.121	0.146	0.090	0.080	0.069	0.054	0.045	0.063
<i>TS(%)</i>	3	0.361	0.354	1.132	1.293	0.790	0.419	0.527	0.354	0.101	2.270
<i>WR(%)</i>	4	0.694		0.226		0.512		0.895		0.949	

**Tabla C4:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana DO con SAC69 y secada con MO a 160W.

Variable	N	$t_{DO} = 1$ h		$t_{DO} = 2$ h		$t_{DO} = 4$ h		$t_{DO} = 12$ h		$t_{DO} = 24$ h	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
<i>Hbs</i>	2	0.003	0.135	0.026	0.012	0.014	0.007	0.001	0.135	0.005	0.001
<i>Hbb</i>	2	0.001	0.057	0.012	0.006	0.008	0.004	0.001	0.057	0.004	0.001
<i>a<sub>w</sub></i>	3	0.007	0.009	0.029	0.026	0.013	0.027	0.011	0.009	0.006	0.063
<i>L*</i>	10	2.466	0.802	1.220	0.988	1.340	1.722	1.107	0.802	1.415	1.004
<i>a*</i>	10	0.675	0.345	0.417	0.349	0.591	0.846	0.220	0.345	0.709	0.509
<i>b*</i>	10	0.875	0.749	0.755	0.905	0.920	1.006	0.608	0.749	1.287	1.086
<i>D</i>	10	0.493	1.408	3.141	1.126	1.789	1.582	1.941	4.628	6.566	8.980
<i>C</i>	10	0.004	0.010	0.010	0.006	0.020	0.014	0.020	0.008	0.008	0.017
<i>A</i>	10	0.071	0.179	0.194	0.135	0.942	0.659	1.040	1.388	1.283	1.064
<i>t<sub>s</sub></i>	3	0.000		0.125		0.000		0.058		0.042	
<i>WL(%)</i>	4	0.084		0.976		0.304		0.310		0.161	

**Tabla C5:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana DO con SAC69 y secada con MO a 350W.

Variable	N	$t_{DO} = 1$ h		$t_{DO} = 2$ h		$t_{DO} = 4$ h		$t_{DO} = 12$ h		$t_{DO} = 24$ h	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
<i>Hbs</i>	2	0.116	0.013	0.036	0.135	0.043	0.030	0.004	0.015	0.010	0.009
<i>Hbb</i>	2	0.004	0.010	0.021	0.059	0.029	0.015	0.003	0.009	0.008	0.007
<i>a<sub>w</sub></i>	3	0.002	0.024	0.008	0.023	0.009	0.016	0.025	0.012	0.026	0.025
<i>L*</i>	10	1.411	1.059	1.212	1.319	1.447	1.333	1.718	0.955	0.668	1.502
<i>a*</i>	10	0.196	0.574	0.360	0.446	0.784	0.915	0.319	0.399	0.404	0.333
<i>b*</i>	10	0.701	0.705	0.824	0.682	0.693	0.722	0.591	1.053	1.007	1.043
<i>D</i>	10	6.335	4.954	3.776	6.408	1.690	2.087	3.694	2.430	2.676	2.565
<i>C</i>	10	0.058	0.025	0.030	0.034	0.039	0.021	1.673	0.869	0.019	0.030
<i>A</i>	10	0.023	0.017	0.187	0.104	0.330	0.257	0.091	0.017	0.995	0.501
<i>t<sub>s</sub></i>	3	0.000		0.000		0.283		0.000		0.000	
<i>WL(%)</i>	4	0.474		0.470		0.921		0.259		0.330	

**Tabla C6:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana DO con SAC69 y secada con MO a 500W.

Variable	N	$t_{DO} = 1$ h		$t_{DO} = 2$ h		$t_{DO} = 4$ h		$t_{DO} = 12$ h		$t_{DO} = 24$ h	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
$Hbs$	2	0.003	0.040	0.019	0.009	0.000	0.058	0.063	0.014	0.010	0.023
$Hbb$	2	0.002	0.020	0.012	0.006	0.000	0.036	0.041	0.011	0.008	0.016
$a_w$	3	0.011	0.019	0.027	0.026	0.023	0.028	0.023	0.023	0.015	0.003
$L^*$	10	2.258	2.518	1.221	1.508	1.471	1.350	1.049	1.484	1.907	1.336
$a^*$	10	0.406	0.550	0.574	0.477	0.952	1.028	0.445	0.555	0.604	0.589
$b^*$	10	0.842	0.784	0.822	0.959	0.898	0.997	1.800	1.178	1.276	1.239
$D$	10	3.984	2.400	3.228	5.137	3.700	2.713	1.837	1.226	4.155	2.608
$C$	10	0.039	0.024	0.038	0.031	0.028	0.035	0.031	0.023	0.022	0.034
$A$	10	0.046	0.032	0.017	0.127	0.036	0.146	0.911	0.454	0.919	0.498
$t_s$	3	0.000		0.000		0.000		0.000		0.008	
$WL(\%)$	4	0.211		0.790		0.761		1.334		0.333	

**Tabla C7:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana DO con SAC69 y secada con MO a 650W.

Variable	N	$t_{DO} = 1$ h		$t_{DO} = 2$ h		$t_{DO} = 4$ h		$t_{DO} = 12$ h		$t_{DO} = 24$ h	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
<i>Hbs</i>	2	0.012	0.119	0.062	0.014	0.017	0.006	0.024	0.061	0.018	0.037
<i>Hbb</i>	2	0.009	0.054	0.044	0.011	0.011	0.004	0.014	0.033	0.014	0.026
<i>a<sub>w</sub></i>	3	0.022	0.025	0.014	0.025	0.027	0.016	0.023	0.025	0.018	0.015
<i>L*</i>	10	5.860	1.651	2.241	1.190	1.650	1.783	1.619	2.509	2.951	1.234
<i>a*</i>	10	0.847	0.214	0.933	0.775	1.024	1.006	0.388	0.367	0.400	0.252
<i>b*</i>	10	1.491	0.612	2.117	0.926	0.766	0.895	0.872	1.462	0.539	0.544
<i>D</i>	10	1.335	4.523	3.851	5.137	2.769	5.470	14.786	3.526	18.489	6.379
<i>C</i>	10	0.043	0.040	0.022	0.029	0.035	0.025	0.027	0.074	0.027	0.038
<i>A</i>	10	0.306	0.081	0.008	0.071	0.028	0.243	0.723	0.805	1.046	0.500
<i>t<sub>s</sub></i>	3	0.000		0.000		0.017		0.017		0.025	
<i>WL(%)</i>	4	0.725		0.569		1.642		0.580		0.365	

**Tabla C8:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana DO con SAC47.

Variable	N	$t_{DO} = 1$ h		$t_{DO} = 2$ h		$t_{DO} = 4$ h		$t_{DO} = 12$ h		$t_{DO} = 24$ h	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
<i>Hbs</i>	2	0.190	0.295	0.289	0.134	0.120	0.016	0.121	0.034	0.236	0.041
<i>Hbb</i>	2	0.007	0.009	0.011	0.005	0.007	0.001	0.011	0.003	0.030	0.005
<i>a<sub>w</sub></i>	3	0.002	0.002	0.002	0.003	0.005	0.001	0.005	0.001	0.003	0.002
<i>L*</i>	10	1.150	1.401	0.906	0.935	1.059	0.739	1.059	1.234	1.154	1.099
<i>a*</i>	10	0.284	0.194	0.198	0.156	0.263	0.155	0.263	0.336	0.659	0.609
<i>b*</i>	10	0.676	0.485	0.493	0.412	0.577	0.583	0.577	0.571	0.584	0.734
<i>D</i>	10	3.844	4.593	3.136	2.752	2.156	3.419	3.209	4.005	4.960	4.415
<i>C</i>	10	0.005	0.006	0.013	0.007	0.022	0.005	0.017	0.029	0.008	0.011
<i>A</i>	10	0.096	0.115	0.155	0.239	0.060	0.151	0.072	0.164	0.066	0.080
<i>TS(%)</i>	3	0.576	0.751	0.879	0.410	0.537	0.069	0.537	0.222	2.462	0.434
<i>WR(%)</i>	4	0.341		0.038		1.057		0.906		1.128	

**Tabla C9:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana DO con SAC47 y secada con MO a 160W.

Variable	N	$t_{DO} = 1$ h		$t_{DO} = 2$ h		$t_{DO} = 4$ h		$t_{DO} = 12$ h		$t_{DO} = 24$ h	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
<i>Hbs</i>	2	0.007	0.050	0.011	0.037	0.011	0.020	0.011	0.004	0.013	0.019
<i>Hbb</i>	2	0.003	0.024	0.008	0.019	0.008	0.014	0.008	0.003	0.010	0.014
<i>a<sub>w</sub></i>	3	0.040	0.026	0.019	0.020	0.019	0.015	0.019	0.015	0.024	0.025
<i>L*</i>	10	0.838	1.517	2.221	1.766	2.221	1.768	2.221	1.151	1.975	2.159
<i>a*</i>	10	0.836	0.552	0.412	0.652	0.412	0.483	0.412	0.205	0.523	0.801
<i>b*</i>	10	0.931	0.863	0.715	0.287	0.715	0.998	0.715	0.761	1.235	0.961
<i>D</i>	10	0.831	1.589	1.911	5.086	7.845	8.218	16.056	18.049	13.866	15.089
<i>C</i>	10	0.011	0.013	0.009	0.013	0.007	0.003	0.011	0.052	0.020	0.009
<i>A</i>	10	0.188	0.210	0.128	0.277	0.135	0.853	0.134	1.035	0.824	2.132
<i>t<sub>s</sub></i>	3	0.000		0.000		0.000		0.000		0.000	
<i>WL(%)</i>	4	0.560		1.131		0.941		1.568		1.019	

**Tabla C10:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana DO con SAC47 y secada con MO a 350W.

Variable	N	$t_{DO} = 1$ h		$t_{DO} = 2$ h		$t_{DO} = 4$ h		$t_{DO} = 12$ h		$t_{DO} = 24$ h	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
<i>Hbs</i>	2	0.007	0.020	0.042	0.050	0.032	0.042	0.006	0.019	0.018	0.003
<i>Hbb</i>	2	0.006	0.014	0.027	0.025	0.021	0.028	0.005	0.013	0.015	0.002
<i>a<sub>w</sub></i>	3	0.014	0.014	0.024	0.023	0.021	0.018	0.007	0.021	0.014	0.003
<i>L*</i>	10	1.038	1.267	1.209	1.183	1.835	1.011	1.228	0.779	0.919	2.187
<i>a*</i>	10	0.306	0.174	0.781	0.426	0.481	0.204	0.280	0.361	0.460	0.553
<i>b*</i>	10	0.916	0.614	1.081	0.764	0.865	0.844	0.762	0.618	0.890	0.447
<i>D</i>	10	5.337	8.985	14.027	8.387	9.581	11.706	14.030	11.006	14.638	12.817
<i>C</i>	10	0.015	0.035	0.049	0.008	0.081	0.025	0.017	0.038	0.055	0.045
<i>A</i>	10	0.081	0.060	0.290	0.212	0.808	1.318	0.163	1.195	1.723	2.477
<i>t<sub>s</sub></i>	3	0.042		0.000		0.000		0.000		0.000	
<i>WL(%)</i>	4	0.847		0.964		0.697		2.293		0.744	

**Tabla C11:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana DO con SAC47 y secada con MO a 500W.

Variable	N	$t_{DO} = 1$ h		$t_{DO} = 2$ h		$t_{DO} = 4$ h		$t_{DO} = 12$ h		$t_{DO} = 24$ h	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
<i>Hbs</i>	2	0.082	0.116	0.061	0.086	0.005	0.016	0.050	0.030	0.021	0.010
<i>Hbb</i>	2	0.040	0.075	0.024	0.065	0.004	0.012	0.037	0.022	0.016	0.008
<i>a<sub>w</sub></i>	3	0.022	0.019	0.024	0.013	0.022	0.021	0.018	0.016	0.014	0.012
<i>L*</i>	10	1.736	1.625	2.009	2.511	2.032	1.963	2.033	1.465	2.742	2.043
<i>a*</i>	10	0.411	0.281	0.528	0.302	0.750	0.336	0.394	0.551	0.636	0.743
<i>b*</i>	10	0.702	0.771	0.884	0.454	1.655	0.693	0.689	0.971	0.668	0.892
<i>D</i>	10	4.513	7.461	3.794	3.454	8.251	6.717	8.007	5.231	11.176	14.843
<i>C</i>	10	0.041	0.044	0.028	0.032	0.044	0.041	0.050	0.039	0.033	0.050
<i>A</i>	10	0.075	0.110	0.298	0.479	0.671	1.385	2.253	0.488	1.927	0.913
<i>t<sub>s</sub></i>	3	0.042		0.010		0.000		0.000		0.017	
<i>WL(%)</i>	4	1.334		0.752		2.221		0.133		0.082	

**Tabla C12:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana DO con SAC47 y secada con MO a 650W.

Variable	N	$t_{DO} = 1$ h		$t_{DO} = 2$ h		$t_{DO} = 4$ h		$t_{DO} = 12$ h		$t_{DO} = 24$ h	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
<i>Hbs</i>	2	0.088	0.105	0.073	0.095	0.030	0.021	0.079	0.047	0.016	0.008
<i>Hbb</i>	2	0.055	0.053	0.023	0.038	0.022	0.015	0.055	0.032	0.013	0.007
<i>a<sub>w</sub></i>	3	0.025	0.018	0.021	0.014	0.023	0.017	0.021	0.014	0.014	0.005
<i>L*</i>	10	1.886	1.753	2.431	1.338	1.753	1.833	1.953	1.350	1.735	1.910
<i>a*</i>	10	0.444	0.467	0.623	0.380	0.357	0.254	0.617	0.567	0.446	0.511
<i>b*</i>	10	1.057	0.895	1.056	0.589	1.533	0.950	0.975	0.876	0.564	0.798
<i>D</i>	10	6.271	2.515	3.884	2.919	3.150	8.287	7.137	5.568	9.209	8.937
<i>C</i>	10	0.026	0.036	0.034	0.097	0.031	0.109	0.018	0.056	0.039	0.027
<i>A</i>	10	0.123	0.114	0.203	0.740	0.649	1.429	0.722	0.325	1.408	1.313
<i>t<sub>s</sub></i>	3	0.033		1.012		0.017		0.017		0.000	
<i>WL(%)</i>	4	1.046		0.863		1.234		0.242		0.989	

**Tabla C13:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana DO con XII47.

Variable	N	$t_{DO} = 1$ h		$t_{DO} = 2$ h		$t_{DO} = 4$ h		$t_{DO} = 12$ h		$t_{DO} = 24$ h	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
<i>Hbs</i>	2	0.295	0.084	0.121	0.002	0.011	0.011	0.031	0.041	0.015	0.026
<i>Hbb</i>	2	0.011	0.004	0.006	0.000	0.001	0.001	0.005	0.006	0.004	0.007
<i>a<sub>w</sub></i>	3	0.001	0.001	0.001	0.009	0.001	0.001	0.002	0.011	0.001	0.001
<i>L*</i>	10	1.063	1.306	1.179	0.002	1.358	0.835	0.566	1.069	1.442	1.426
<i>a*</i>	10	0.235	0.157	0.250	0.000	0.382	0.300	0.381	0.262	0.810	0.818
<i>b*</i>	10	0.500	0.484	0.551	0.001	0.617	0.439	0.489	0.500	0.692	0.755
<i>D</i>	10	4.654	0.658	3.859	3.314	4.575	3.238	2.889	3.371	2.847	2.445
<i>C</i>	10	0.009	0.012	0.016	0.013	0.013	0.012	0.006	0.004	0.004	0.008
<i>A</i>	10	0.139	0.163	0.039	0.066	0.073	0.079	0.085	0.086	0.071	0.074
<i>TS(%)</i>	3	0.888	0.321	0.507	0.009	0.062	0.069	0.381	0.476	0.317	0.550
<i>WR(%)</i>	4	0.370		0.744		1.012		0.842		0.766	

**Tabla C14:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana DO con XIL47 y secada con MO a 160W.

Variable	N	$t_{DO} = 1$ h		$t_{DO} = 2$ h		$t_{DO} = 4$ h		$t_{DO} = 12$ h		$t_{DO} = 24$ h	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
<i>Hbs</i>	2	0.071	0.034	0.033	0.034	0.009	0.022	0.022	0.030	0.013	0.007
<i>Hbb</i>	2	0.042	0.022	0.020	0.018	0.006	0.013	0.014	0.017	0.010	0.005
<i>a<sub>w</sub></i>	3	0.015	0.022	0.023	0.014	0.014	0.021	0.020	0.024	0.022	0.011
<i>L*</i>	10	1.405	2.155	1.742	1.009	1.478	1.493	1.444	1.510	2.166	1.395
<i>a*</i>	10	0.703	0.577	0.547	0.392	0.351	0.591	0.450	1.105	0.612	0.834
<i>b*</i>	10	0.383	1.047	0.708	0.638	0.936	0.736	0.665	1.086	1.102	1.039
<i>D</i>	10	2.135	2.876	3.316	1.661	3.823	2.459	0.923	0.822	3.144	1.246
<i>C</i>	10	0.009	0.013	0.005	0.004	0.006	0.008	0.012	0.009	0.006	0.007
<i>A</i>	10	0.144	0.148	0.078	0.211	0.151	0.150	0.241	0.201	0.281	0.366
<i>t<sub>s</sub></i>	3	0.167		0.000		0.000		0.000		0.042	
<i>WL(%)</i>	4	0.791		0.027		0.640		0.942		0.362	

**Tabla C15:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana DO con XIL47 y secada con MO a 350W.

Variable	N	$t_{DO} = 1$ h		$t_{DO} = 2$ h		$t_{DO} = 4$ h		$t_{DO} = 12$ h		$t_{DO} = 24$ h	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
<i>Hbs</i>	2	0.005	0.009	0.018	0.003	0.002	0.003	0.013	0.005	0.007	0.012
<i>Hbb</i>	2	0.004	0.005	0.014	0.002	0.001	0.002	0.010	0.004	0.006	0.009
<i>a<sub>w</sub></i>	3	0.014	0.002	0.024	0.001	0.002	0.002	0.015	0.020	0.013	0.008
<i>L*</i>	10	2.009	2.951	1.128	1.197	2.762	0.969	1.610	0.946	2.107	1.208
<i>a*</i>	10	0.477	0.790	0.654	0.364	0.802	0.507	0.380	0.487	0.867	0.651
<i>b*</i>	10	1.105	1.025	0.741	1.047	0.972	0.745	0.916	0.920	0.938	0.995
<i>D</i>	10	1.302	4.789	1.423	6.266	4.573	7.224	8.837	6.443	6.231	7.480
<i>C</i>	10	0.007	0.053	0.029	0.042	0.031	0.015	0.016	0.022	0.007	0.012
<i>A</i>	10	0.068	0.135	0.154	0.215	0.369	0.291	0.639	0.450	0.541	0.388
<i>t<sub>s</sub></i>	3	0.050		0.000		0.000		0.000		0.000	
<i>WL(%)</i>	4	2.818		0.631		1.434		0.172		0.470	

**Tabla C16:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana DO con XIL47 y secada con MO a 500W.

Variable	N	$t_{DO} = 1$ h		$t_{DO} = 2$ h		$t_{DO} = 4$ h		$t_{DO} = 12$ h		$t_{DO} = 24$ h	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
<i>Hbs</i>	2	0.014	0.009	0.048	0.007	0.014	0.004	0.060	0.026	0.006	0.017
<i>Hbb</i>	2	0.011	0.008	0.031	0.004	0.010	0.003	0.036	0.017	0.005	0.014
<i>a<sub>w</sub></i>	3	0.014	0.025	0.014	0.013	0.025	0.012	0.019	0.017	0.019	0.020
<i>L*</i>	10	3.134	3.246	3.102	3.670	3.063	2.574	2.481	1.982	1.143	1.696
<i>a*</i>	10	0.688	0.795	0.725	0.826	0.676	0.681	0.668	0.328	0.540	0.545
<i>b*</i>	10	0.846	1.072	1.262	0.773	1.213	1.537	1.210	0.627	0.727	1.073
<i>D</i>	10	4.221	5.167	4.452	5.065	4.687	7.067	5.021	3.207	4.890	3.868
<i>C</i>	10	0.036	0.016	0.046	0.026	0.040	0.025	0.023	0.025	0.013	0.010
<i>A</i>	10	0.038	0.219	0.060	0.138	0.245	0.337	0.581	0.382	0.248	0.199
<i>t<sub>s</sub></i>	3	0.017		0.000		0.000		0.000		0.000	
<i>WL(%)</i>	4	0.906		0.004		1.149		0.038		0.812	

**Tabla C17:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana DO con XIL47 y secada con MO a 650W.

Variable	N	$t_{DO} = 1$ h		$t_{DO} = 2$ h		$t_{DO} = 4$ h		$t_{DO} = 12$ h		$t_{DO} = 24$ h	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
<i>Hbs</i>	2	0.002	0.039	0.104	0.008	0.012	0.009	0.010	0.008	0.029	0.006
<i>Hbb</i>	2	0.001	0.032	0.064	0.007	0.008	0.006	0.007	0.006	0.024	0.005
<i>a<sub>w</sub></i>	3	0.024	0.015	0.024	0.013	0.016	0.014	0.014	0.016	0.023	0.017
<i>L*</i>	10	2.040	1.938	2.331	2.794	2.192	2.889	1.642	1.899	1.717	2.044
<i>a*</i>	10	0.658	0.659	0.731	0.493	0.655	0.310	0.629	0.875	0.564	0.735
<i>b*</i>	10	1.169	1.083	1.400	1.324	0.979	1.443	1.045	1.155	1.223	1.170
<i>D</i>	10	6.054	5.742	5.169	5.068	5.983	4.977	6.186	1.628	9.044	8.603
<i>C</i>	10	0.026	0.022	0.038	0.039	0.024	0.047	0.024	0.010	0.012	0.011
<i>A</i>	10	0.027	0.334	0.116	0.170	0.203	0.420	0.285	0.038	0.490	0.284
<i>t<sub>s</sub></i>	3	0.033		0.017		0.033		0.000		0.017	
<i>WL(%)</i>	4	0.858		0.769		0.724		0.112		0.451	

**Tabla C18:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana DO con AAPM69.

Variable	N	$t_{DO} = 1$ h		$t_{DO} = 2$ h		$t_{DO} = 4$ h		$t_{DO} = 12$ h		$t_{DO} = 24$ h	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
<i>Hbs</i>	2	0.241	0.224	0.129	0.062	0.110	0.133	0.121	0.030	0.060	0.063
<i>Hbb</i>	2	0.008	0.007	0.005	0.002	0.005	0.006	0.008	0.002	0.005	0.006
<i>a<sub>w</sub></i>	3	0.001	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001
<i>L*</i>	10	0.794	1.014	0.684	1.247	1.167	1.003	1.047	0.791	0.866	1.193
<i>a*</i>	10	0.200	0.194	0.124	0.252	0.183	0.152	0.168	0.190	0.292	0.431
<i>b*</i>	10	0.603	0.529	0.518	0.653	0.475	0.590	0.674	0.557	0.651	0.641
<i>D</i>	10	2.575	3.165	3.234	3.389	3.437	2.216	6.920	5.422	2.432	3.262
<i>C</i>	10	0.006	0.003	0.005	0.007	0.010	0.016	0.099	0.048	0.048	0.149
<i>A</i>	10	0.103	0.159	0.063	0.106	0.163	0.185	0.085	0.059	0.046	0.089
<i>TS(%)</i>	3	0.834	0.655	0.514	0.195	0.544	0.588	0.806	0.191	0.522	0.601
<i>WR(%)</i>	4	0.291		0.567		0.146		0.302		0.920	

**Tabla C19:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana DO con AAPM69 y secada con MO a 160W.

Variable	N	$t_{DO} = 1$ h		$t_{DO} = 2$ h		$t_{DO} = 4$ h		$t_{DO} = 12$ h		$t_{DO} = 24$ h	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
<i>Hbs</i>	2	0.002	0.001	0.012	0.002	0.033	0.169	0.007	0.005	0.031	0.015
<i>Hbb</i>	2	0.001	0.001	0.007	0.001	0.017	0.123	0.004	0.003	0.018	0.009
<i>a<sub>w</sub></i>	3	0.015	0.012	0.022	0.017	0.007	0.012	0.014	0.015	0.013	0.015
<i>L*</i>	10	2.667	1.246	1.132	1.425	1.437	1.333	1.647	1.481	0.976	0.815
<i>a*</i>	10	0.262	0.284	0.192	0.335	0.470	0.597	0.420	0.335	0.513	0.468
<i>b*</i>	10	1.526	0.478	0.695	0.826	0.570	0.706	0.468	0.603	1.151	0.747
<i>D</i>	10	5.910	4.320	6.628	4.434	5.460	4.250	5.701	4.108	2.632	5.690
<i>C</i>	10	0.022	0.015	0.012	0.018	0.005	0.571	0.011	0.015	0.007	0.007
<i>A</i>	10	0.032	0.047	0.299	0.475	2.188	1.969	0.186	0.131	0.194	0.272
<i>t<sub>s</sub></i>	3	0.000		0.000		0.000		0.000		0.000	
<i>WL(%)</i>	4	0.274		0.293		0.922		0.477		1.418	

**Tabla C20:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana DO con AAPM69 y secada con MO a 350W.

Variable	N	$t_{DO} = 1$ h		$t_{DO} = 2$ h		$t_{DO} = 4$ h		$t_{DO} = 12$ h		$t_{DO} = 24$ h	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
<i>Hbs</i>	2	0.038	0.079	0.004	0.005	0.018	0.065	0.003	0.007	0.032	0.111
<i>Hbb</i>	2	0.023	0.048	0.003	0.003	0.014	0.039	0.002	0.005	0.023	0.071
<i>a<sub>w</sub></i>	3	0.016	0.013	0.015	0.022	0.019	0.020	0.012	0.021	0.015	0.023
<i>L*</i>	10	1.957	1.322	2.483	1.872	2.046	1.659	1.302	1.115	2.777	1.611
<i>a*</i>	10	0.399	0.391	0.557	0.501	0.471	0.296	0.155	0.241	0.671	0.406
<i>b*</i>	10	0.624	1.323	0.798	0.730	0.970	0.858	0.562	0.489	0.836	1.142
<i>D</i>	10	5.289	5.453	3.455	5.806	6.307	3.764	4.167	3.284	4.509	3.782
<i>C</i>	10	0.052	0.040	0.064	0.020	0.045	0.057	0.063	0.040	0.052	0.045
<i>A</i>	10	0.043	0.019	0.012	0.034	0.192	0.189	0.384	1.295	0.955	0.244
<i>t<sub>s</sub></i>	3	0.000		0.042		0.000		0.000		0.000	
<i>WL(%)</i>	4	0.871		1.889		0.497		0.615		1.110	

**Tabla C21:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana DO con AAPM69 y secada con MO a 500W.

Variable	N	$t_{DO} = 1$ h		$t_{DO} = 2$ h		$t_{DO} = 4$ h		$t_{DO} = 12$ h		$t_{DO} = 24$ h	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
$Hbs$	2	0.026	0.102	0.026	0.013	0.015	0.015	0.019	0.030	0.072	0.066
$Hbb$	2	0.016	0.042	0.013	0.007	0.014	0.018	0.012	0.021	0.051	0.036
$a_w$	3	0.022	0.009	0.014	0.017	0.023	0.014	0.021	0.023	0.211	0.000
$L^*$	10	1.173	1.549	1.364	1.633	2.117	0.999	2.130	1.254	1.575	1.669
$a^*$	10	0.286	0.445	0.536	0.629	0.836	1.084	0.384	0.716	0.486	0.335
$b^*$	10	1.056	1.139	1.254	0.901	0.987	1.109	0.818	1.049	0.827	0.639
$D$	10	4.325	3.045	4.958	5.542	3.812	4.139	4.364	4.197	3.726	3.819
$C$	10	0.036	0.071	0.029	0.047	0.078	0.066	0.047	0.034	0.044	0.033
$A$	10	0.024	0.253	0.030	0.021	0.164	0.173	0.110	0.149	0.027	0.436
$t_s$	3	0.000		0.183		0.015		0.000		0.000	
$WL(\%)$	4	0.619		0.044		0.084		0.654		1.970	

**Tabla C22:** Errores típicos para los valores promedio informados correspondientes a manzana DO con AAPM69 y secada con MO a 650W.

Variable	N	$t_{DO} = 1$ h		$t_{DO} = 2$ h		$t_{DO} = 4$ h		$t_{DO} = 12$ h		$t_{DO} = 24$ h	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
<i>Hbs</i>	2	0.055	0.064	0.072	0.054	0.016	0.039	0.066	0.063	0.058	0.011
<i>Hbb</i>	2	0.033	0.031	0.039	0.036	0.012	0.024	0.033	0.034	0.037	0.009
<i>a<sub>w</sub></i>	3	0.010	0.013	0.011	0.009	0.021	0.012	0.021	0.018	0.002	0.017
<i>L*</i>	10	1.808	1.689	1.743	1.257	2.891	2.217	1.453	0.869	2.385	2.385
<i>a*</i>	10	0.769	0.707	0.857	0.355	0.376	0.378	0.421	0.308	0.671	0.671
<i>b*</i>	10	0.877	0.498	1.479	1.028	0.465	1.025	0.601	0.658	0.838	0.838
<i>D</i>	10	2.995	4.111	3.851	5.490	0.557	2.745	6.188	2.025	4.452	4.762
<i>C</i>	10	0.033	0.033	0.042	0.033	0.072	0.031	0.041	0.053	0.046	0.049
<i>A</i>	10	0.070	0.024	0.014	0.083	0.880	0.052	0.384	0.231	0.248	0.810
<i>t<sub>s</sub></i>	3	0.000		0.017		0.015		0.000		0.000	
<i>WL(%)</i>	4	0.936		0.044		0.084		1.544		0.935	