

DEHIDROCONGELACIÓN DE PRODUCTOS FRUTIHORTÍCOLAS



Claudio M. Marani

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

Departamento de referencia: Ingeniería Química

Dirección de tesis:

Director: Dr. Rodolfo H. Mascheroni

Co-director: Dra. Miriam E. Agnelli

La Plata, Mayo 2014

Parte de los resultados obtenidos en esta tesis fueron publicados en los siguientes trabajos:

- “Osmo-frozen fruits: mass transfer and quality evaluation”. *C. M. Marani, M. E. Agnelli, R. H. Mascheroni*. *Journal of Food Engineering* 79. pp1122 (2007)
- “Modelling of heat and mass transfer during (osmo) dehydrofreezing of fruits”. *M. E. Agnelli, C. M. Marani, R. H. Mascheroni*. *Journal of Food Engineering* 69, pp. 415 (2005)
- “Mass transfer and quality evaluation of osmo-frozen pears and strawberries”. *C. M. Marani, E. A. Spiazzi, M. E. Agnelli, R. H. Mascheroni*. *Ingeniería de Alimentos. Nuevas Fronteras en el siglo XXI, Tomo II*, pp. 467 (2003)
- “Modelling of heat and mass transfer during (osmo) dehydrofreezing. Application to apple cubes processing”. *Rapid Cooling of Food*, pp. 187-196 (2003)
- “Quality of osmo-frozen products”. *C. M. Marani, M. E. Agnelli, R. H. Mascheroni*. *Rapid Cooling of Food*, pp. 253-261 (2003)
- “Coeficientes de Transferencia de Masa durante la deshidratación de manzanas en soluciones de azúcares de distinto peso molecular”. *M. E. Agnelli, C. M. Marani, R. H. Mascheroni*. *CIBIA 2003. IV Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos, Valparaíso – Chile. 5 a 8 de Octubre* (2003)
- “Transferencia de Masa y Evaluación de la Calidad de Manzanas y Kiwis Dehidrocongelados”. *C. M. Marani, M. E. Agnelli, R. H. Mascheroni*. *X Jornada de Jovens Pesquisadores da Associação de Universidades do Grupo Montevideo (AUGM), Florianópolis – Brasil. 20 a 22 de Noviembre* (2002)
- “Efecto de la temperatura y la concentración de la solución osmótica durante la deshidratación de cubos de manzana”. *C. M. Marani, M. E. Agnelli, R. H. Mascheroni*. *IX Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos. Asociación Argentina de Tecnólogos Alimentarios (AATA), Buenos Aires – Argentina. 7 a 9 de Agosto* (2002)
- “Mass transfer and quality evaluation of osmo-frozen pears”. *C. M. Marani, M. E. Agnelli, R. H. Mascheroni*. *CIAR 2001. VI Congreso Iberoamericano de Aire*

Acondicionado y Refrigeración, Buenos Aires – Argentina. 14 a 17 de Agosto (2001)

- “Modelling of heat and mass transfer during (osmo) dehydrofreezing. Application to apple cubes processing”. *M. E. Agnelli, C. M. Marani, R. H. Mascheroni*. Rapid Cooling of Food. International Institute of Refrigeration (IIR), Bristol – Reino Unido. 28 a 30 de Marzo (2001)
- “Quality of osmo-frozen products”. *C. M. Marani, M. E. Agnelli, R. H. Mascheroni*. Rapid Cooling of Food. International Institute of Refrigeration (IIR), Bristol – Reino Unido. 28 a 30 de Marzo (2001)
- “Mass transfer and quality evaluation of osmofrozen strawberries”. *C. M. Marani, M. E. Agnelli, R. H. Mascheroni*. CIBIA 2001. III Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos, Valencia – España. 11 a 15 de Marzo (2001)
- “Simulation of heat and mass transfer of osmo-frozen products”. *E. A. Spiazzi, C. M. Marani, M. E. Agnelli, R. H. Mascheroni*. FOODSIM 2000. 1st International Conference on Simulation in Food and Bio Industries, Nantes – Francia. 26 a 27 de Junio (2000)

Índice

Capítulo 1 Introducción

1.1 Deshidratación de Alimentos	2
1.2 Deshidratación osmótica	4
1.2.1 Fundamentos	4
1.2.2 Descripción del proceso	6
1.2.3 Parámetros del proceso	7
1.2.4 Agentes osmóticos	9
1.2.5 Aspectos tecnológicos	11
1.3 Dehidrocongelación	14
1.4 Objetivos	16

Capítulo 2 Efectos de la temperatura, composición y concentración de la solución osmótica en el proceso de deshidratación

2.1 Introducción	19
2.2 Materiales y Métodos	20
2.3 Resultados y discusión	25
2.3.1 Efecto de la temperatura	25
2.3.2 Efecto de la concentración de la solución	27
2.3.3 Efecto de la composición de la solución (tipo de soluto)	30
2.3.4 Perfiles de concentración	32
2.4 Conclusiones	37

Capítulo 3 Evaluación de la calidad de productos dehidrocongelados

3.1 Introducción	40
3.2 Materiales y Métodos	41
3.2.1 Dehidrocongelación	41
3.2.2 Evaluación de la textura	44
3.2.3 Caracterización del color	45
3.2.4 Evaluación del exudado	47

3.2.5 Cuantificación de ácido ascórbico en kiwis dehidrocongelados	47
3.3 Resultados y discusión	50
3.3.1 Peras	50
3.3.2 Frutillas	56
3.3.3 Kiwis	61
3.3.4 Manzanas	69
3.4 Conclusiones	74

Capítulo 4 Modelado de Transferencia de Masa y Calor durante la dehidrocongelación de frutas

4.1 Introducción	77
4.1.1 Deshidratación osmótica	77
4.1.2 Congelación	79
4.2 Experimental	81
4.3 Modelado del proceso	83
4.3.1 Modelado matemático	83
4.3.2 Coeficientes de transferencia de calor y materia y propiedades físicas	88
4.4 Resultados y discusión	92
4.4.1 Peras	92
4.4.2 Manzanas	98
4.5 Conclusiones	105

Capítulo 5 Conclusiones Generales

5.1 Conclusiones generales	107
5.2 Optimización del proceso	110

Referencias Bibliográficas

Referencias bibliográficas	115
----------------------------	-----

Apéndice

Apéndice	128
----------	-----

Capítulo 1

Introducción

Introducción

1.1 Deshidratación de Alimentos

La deshidratación es una de las principales operaciones unitarias en el procesado y conservación de alimentos. En ella, el descenso en el contenido de agua del producto tiene como objeto prolongar su vida útil, así como disminuir el volumen y peso del mismo para reducir el costo o dificultad de embalaje, manejo, almacenamiento y transporte. Por esta razón, se ha transformado en un tema de continua investigación en lo que respecta a aspectos ingenieriles de aplicación y fundamentos de los cambios físicos, químicos y biológicos que tienen lugar durante este proceso.

Las reacciones más comunes, que afectan las propiedades físicas, químicas y biológicas de los alimentos durante la deshidratación son: reacciones enzimáticas y no enzimáticas, fenómenos físicos (cambios geométricos como contracción o encogimiento), fenómenos estructurales (endurecimiento, textura leñosa o cambios de la viscosidad), cambios de color y apariencia y destrucción de nutrientes, aroma y sabor.

Aunque el contenido de humedad de un alimento puede ser un factor indicativo de su propensión a esas reacciones, también se ha observado que diferentes alimentos con el mismo contenido de agua, pueden tener un comportamiento diverso en lo que respecta a su estabilidad. El contenido de humedad es insuficiente para indicar la perecibilidad de un alimento al no tomar en cuenta las interacciones del agua con otros componentes del mismo.

Así se introdujo el concepto de actividad de agua (a_w). Este término ha resultado muy adecuado para indicar la estabilidad de un producto y toma en cuenta la interacción del agua con otros constituyentes del alimento en condiciones de equilibrio termodinámico. De una forma simple, la a_w puede considerarse una medida indirecta del agua que está disponible en un producto para participar en diferentes reacciones deteriorativas y en el crecimiento microbiano. Puede ser descrita en su forma más simple como la

relación de la presión parcial de vapor de agua del alimento dividida por la presión de vapor del agua pura, ambas medidas a la misma temperatura. Su valor varía entre 0 y 1. En el equilibrio, la a_w también se relaciona con la humedad relativa (HR) del medio ambiente que rodea al producto (Welti y Vergara 1997).

Por otra parte, es importante reconocer que los productos frescos perecederos tienen a_w altas, normalmente superiores a 0,98, mientras que alimentos secos y estables seguramente tienen a_w por debajo de 0,6. En forma intermedia quedan ubicados productos con estabilidad variable (Labuza, 1980).

Para seleccionar el modo en que va a ser deshidratado un alimento es necesario conocer las características de la materia prima (datos físicos, contenido inicial de humedad, temperatura máxima que puede soportar), etapas preliminares de procesado previas a la deshidratación, capacidad de producción y contenido final de humedad requerido.

En los alimentos, la eliminación de agua se consigue esencialmente utilizando aire seco, el cual elimina el agua de la superficie del producto y la lleva hacia fuera del secadero en una sola operación (por ejemplo: secaderos de armario, secaderos de lecho y atomización).

Los secaderos de armario y lecho (tales como los de bandeja, doble cono, rotatorios, flujo en cinta transportadora o de túnel), se utilizan para granos, frutas y verduras. La operación se puede realizar en discontinuo, semicontinuo o continuo, dependiendo del tipo y cantidad de producto y la frecuencia de la operación.

La atomización se utiliza para alimentos líquidos con un relativo alto contenido de sólidos. El alimento que se encuentra en estado líquido, es transformado en gotas y luego en partículas secas mediante la atomización continua en un medio caliente de secado. Algunos ejemplos son la leche, huevos, té, café y proteínas de suero. Las ventajas de este método son: la obtención de características técnicas constantes de secado, operación continua y sencilla y una gama de diseños disponibles para el secado de materiales sensibles y resistentes al calor (Masters 1991).

En otros métodos, como la liofilización, no se emplea aire seco para eliminar el agua. Este proceso consiste esencialmente en dos etapas: Primero, el alimento se congela y posteriormente, el producto se seca por sublimación directa del hielo bajo una presión reducida. Se emplea para alimentos sensibles al calor para evitar las pérdidas de los compuestos responsables del sabor y aroma. Algunos productos comerciales obtenidos por liofilización son extractos de café y té, verduras, frutas, carnes y pescado.

Existen otras formas de deshidratación utilizadas en la conservación de alimentos aparte de las anteriormente mencionadas. Ellas son secado solar, secado con vacío elevado, microondas, extrusión y secado neumático. Cada uno posee una aplicación específica para obtener productos con propiedades funcionales adecuadas a sistemas alimenticios determinados (Riva y col. 2005).

En los últimos años se ha desarrollado un método diferente, en el cual se lleva a cabo la concentración del alimento mediante la inmersión del producto en una solución hipertónica. Este proceso se conoce como *deshidratación osmótica* y se describe en detalle a continuación.

1.2 Deshidratación osmótica

1.2.1 Fundamentos

La ósmosis consiste en el flujo de un solvente (generalmente agua) desde una solución diluida hacia una solución más concentrada. Este fenómeno depende de la existencia de una membrana que sea selectiva en el sentido que el solvente pueda pasar a través de ella, mientras que los otros componentes de la solución no puedan hacerlo o lo hagan a una velocidad inferior.

La transferencia de agua por ósmosis se puede aplicar a frutas, verduras u otros alimentos enteros o en piezas dado que contienen solutos (azúcares, ácidos orgánicos, etc.) en solución diluida y su estructura celular actúa, al menos aproximadamente, como una membrana semipermeable. Es así que se

puede lograr una deshidratación parcial del alimento simplemente por inmersión en una solución adecuada de suficiente concentración.

La fuerza impulsora de la deshidratación osmótica consiste en la diferencia de potencial químico (μ) entre el agua del alimento y la del medio que lo rodea. El potencial químico está a su vez directamente relacionado con la actividad del agua (a_w) o la presión osmótica (Π) a través de:

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

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

Donde μ^0 es el potencial químico de referencia a la temperatura en cuestión y V es el volumen molar parcial del agua. Además,

$$a_w = \frac{p}{p_0}$$

Siendo p la presión de vapor del agua en la solución y p_0 la presión de vapor del agua pura a igual temperatura.

El medio circundante debe pues poseer una actividad de agua (a_w) menor que la del alimento y esto causa la migración de agua desde el producto a la solución externa. El flujo de agua va a continuar hasta cumplir con el requisito termodinámico de potencial químico o actividad acuosa igual a ambos lados de la membrana semipermeable.

Además de la migración de agua existe una tendencia simultánea a la difusión de soluto desde la solución externa hacia el producto. Teóricamente, el soluto no puede difundir a través de la membrana por la condición de semipermeabilidad, pero en la práctica esta condición no se da, el soluto difunde aunque con menor velocidad que el agua. De esta manera, y a menos que la velocidad de migración del agua sea superior a la de difusión

del soluto, la deshidratación osmótica traerá aparejada una cierta impregnación de la fruta con el soluto de la solución externa (Chirife 1982).

1.2.2 Descripción del proceso

La deshidratación osmótica consiste en sumergir alimentos de elevada actividad acuosa (frutas, verduras y carnes) enteros o en piezas, en soluciones hipertónicas de baja actividad acuosa. Como resultado de la diferencia de potencial químico, se producen dos flujos opuestos y simultáneos (figura 1.1):

- Flujo de agua del producto a la solución, junto con sustancias naturales (minerales, azúcares y ácidos orgánicos). (Sablani y Rahman 2003)
- Transferencia de solutos de la solución al alimento. (Saurel y col. 1994)

Esto permite reducir el contenido de humedad del producto e incrementar su contenido en sólidos.

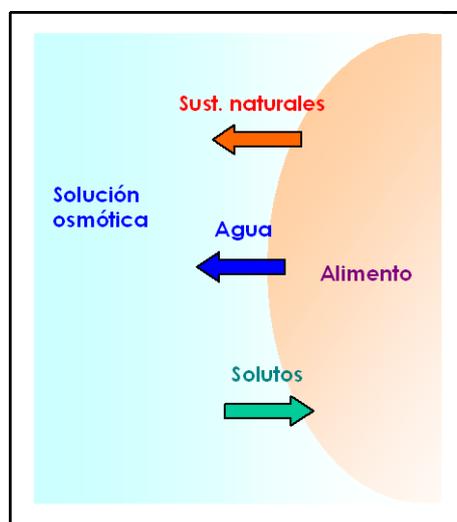


Figura 1.1. Transferencia de masa durante el proceso de Deshidratación Osmótica.

De la doble transferencia se desprenden las principales variables del proceso que son la pérdida de agua (WL) y la ganancia de sólidos (SG). Ellas

muestran un comportamiento diferente y en algunos casos opuesto de acuerdo a como se vean afectadas por los siguientes parámetros del proceso:

- Tamaño y forma de piezas
- Área específica de la muestra
- Características naturales de los tejidos
- Concentración de la solución
- Tiempo de inmersión
- Temperatura
- Agitación
- Relación producto-solución
- Composición de la solución
- Presión

Así, se pueden obtener diferentes relaciones WL/SG de acuerdo a las cualidades del producto final deseadas. Aunque extensos estudios han sido dedicados a este tema, el problema radica en poner en claro las reglas generales, ya que el comportamiento de los tejidos naturales es muy variable.

Para eliminar las variaciones inherentes a los tejidos vegetales, Raoult-Wack y col. 1991, realizaron un estudio experimental de las principales variables sobre la cinética de transferencia de masa en un "modelo gel de alimento". Éste estaba constituido por ágar y sacarosa, proveyendo de esta manera un sistema con estructuras simples (sin estructuras celulares), teniendo en cuenta las restricciones reales del proceso (fragilidad, baja densidad). Comparando los comportamientos del modelo gel y los alimentos, se podría alcanzar un mayor entendimiento del fenómeno de transferencia (Raoult-Wack y col. 1992).

1.2.3 Parámetros del proceso

Como se mencionó antes, las características finales del producto deshidratado y su aceptabilidad por parte del consumidor, van a depender de cómo afecten al proceso osmótico, en menor o mayor grado, los distintos parámetros.

Aunque aún sea pobre su entendimiento, es conocido el hecho que las propiedades de los tejidos del material a deshidratar afectarán el curso del

proceso. Por ejemplo, algunos materiales pierden agua más rápidamente que otros en idénticas condiciones (una diferencia del 25% fue obtenida en la pérdida de peso para dos variedades de papas tratadas bajo las mismas condiciones de ósmosis) (Lewicki y Lenart 1995).

El efecto de la temperatura sobre la velocidad de transferencia de masa, es fundamental durante la deshidratación osmótica. Un ascenso de la misma, produce un aumento en la velocidad del proceso. Además, tiene influencia sobre la composición del producto. Elevadas temperaturas causan un marcado incremento en la pérdida de solutos naturales. Es decir, que la misma puede ser la responsable por incrementar la difusividad del soluto y la pérdida de propiedades selectivas de las membranas celulares, conduciendo a la liberación masiva de los sólidos de los compartimentos celulares.

Esto ha sido estudiado por numerosos autores y han llegado a la conclusión que la temperatura crítica dependerá de la naturaleza del alimento. Por ejemplo: las temperaturas recomendadas para damasco, pera o cereza y banana o papaya, fueron de 20, 40 y 60°C respectivamente (Raoult-Wack y col. 1992). Para carnes y pescado, se sugiere que la temperatura no exceda los 10°C, pero temperaturas elevadas del orden de 85°C han sido también utilizadas (Favetto y col. 1981).

El aumento en la concentración de la solución osmótica, conduce a un incremento en las variables del proceso (Saurel 1994; Conway y col. 1983; Lenart y Lewicki, 1990; Moreira y Sereno 2003; Eren y Kaymak-Ertekin 2007).

Pero, una elevada concentración de azúcar puede tener un efecto significativo sobre la pérdida de agua, mientras la ganancia de sólidos exhibe solo una pequeña variación, lo cual se ve reflejado por un incremento en la pérdida de peso (Raoult y col. 1989).

La elección del tipo de soluto (composición) con el que se va a preparar la solución osmótica, es otro factor a tener en cuenta. Esta va a depender del costo y peso molecular del mismo y las características del producto a deshidratar (Osorio y col. 2007). Generalmente, los requerimientos son conflictivos, por lo tanto, con frecuencia es necesario definir cual soluto o mezcla de ellos es el mejor para un dado producto. En lo que respecta a los

pesos moleculares, solutos de bajo peso penetran rápida y marcadamente en el producto, mientras que los alimentos tratados con azúcares de alto peso solamente muestran una leve impregnación. Este comportamiento puede ser relacionado con la reducción de la difusividad que tiene lugar cuando los pesos moleculares aumentan (Ley de Stokes-Einstein). La tortuosidad y el diámetro de los espacios libres en la pared celular, ayudan a reducir la difusividad aparente cuando el peso molecular del soluto incrementa. Estos efectos serán mayores a medida que el producto a deshidratar se encoja. (Saurel y col. 1994; Rastogi y Raghavarao 1995; Derossi y col. 2008).

El aumento del área específica del producto (tamaño y forma), va a conducir a un incremento en la velocidad de deshidratación, especialmente para cortos períodos de tratamiento. En cambio, una reducción en ella, puede favorecer la ganancia de sólidos en detrimento de la pérdida de agua (Raoult y col. 1989).

La agitación tiene un efecto favorable en la reducción de peso (especialmente en soluciones concentradas) y sobre la velocidad de intercambio (Hawkes y Flink 1978). La misma asegura que la solución concentrada sea renovada en torno a la pieza de alimento y por lo tanto recrea una diferencia de concentración favorable para la transferencia de masa (Raoult-Wack y col. 1992; Mavroudis y col. 1996; Moreira y Sereno 2003).

Por último, la reducción de la presión durante la DO, va a incrementar la velocidad del proceso (Hawkes y Flink 1978). También ha sido observado que una presión baja facilita la penetración de la sustancia osmoactiva dentro del alimento (Lewicki y Lenart 1995).

1.2.4 Agentes osmóticos

Existe una gran variedad de solutos empleados como agentes osmóticos que pueden reducir la actividad del agua en la solución circundante a los valores necesarios. Sin embargo, las sustancias osmoactivas usadas en alimentos deben cumplir requerimientos especiales, dado que el soluto también difunde al interior de la fruta. Por esto, la elección del mismo debe basarse en los siguientes factores:

- No tóxico.
- Inerte.
- Comestible.
- Características fisicoquímicas y organolépticas similares al producto a deshidratar.
- Altamente soluble (posibilidad de soluciones fuertemente concentradas).
- Difusividad variable de acuerdo a su peso molecular.
- Actividad acuosa elevada.
- Costo (la cantidad de solución concentrada empleada, puede constituir uno de los factores limitantes del proceso) (Raoult-Wack y col. 1992).

Por esta razón los azúcares son los agentes osmóticos por excelencia cuando se considera la deshidratación osmótica de frutas. La sacarosa, glucosa, fructosa, lactosa, maltodextrinas y jarabes de maíz son los que comúnmente se utilizan. La miel, glicerol y cloruro de sodio fueron también testeados (Lewicki y Lenart 1995).

La sacarosa es la más frecuentemente utilizada (Adambounou y Castaigne 1983; Pinnavaia y col. 1983; Ponting 1973), la cual puede ser sustituida en parte por lactosa (Hawkes y Flink 1978); la glucosa y fructosa tienen un efecto de deshidratación similar (Maltini y Torreggiani 1985; Sarosi y Polak 1976); las maltodextrinas tienen un efecto menor que la sacarosa a la misma concentración y los jarabes de maíz producen una pérdida de agua en el producto similar a la sacarosa pero a una menor velocidad de flujo de sólidos dentro de los tejidos, desde la solución (Pinnavaia y col. 1983; Lenart y Gródecka 1989; El-Aouar y col. 2006).

También se han utilizado mezclas de sustancias osmoactivas. Maltini y col. usaron mezclas de sacarosa y jarabe de maíz (Maltini y col. 1983), Lericí y col. deshidrataron manzanas en una solución que contenía fructosa, sacarosa, maltosa, polisacáridos y cloruro de sodio (Lericí y col. 1977) y Mastrocola y col.

usaron soluciones de sacarosa y fructosa en proporciones variables (Mastrocola y col. 1987). La pérdida de agua fue similar para todas las soluciones testeadas pero la penetración de los sólidos fue diferente.

El cloruro de sodio se empleó para deshidratar vegetales. Speck y col. usaron soluciones al 10% para deshidratar zanahorias (Speck y col. 1977), Lewicki y col. la usaron al 15% para papas y zanahorias (Lewicki y col. 1987), Adambounou y col. deshidrataron paprika y tomates con soluciones saturadas de sal para arrojar actividades acuosas de 0,8 (Adambounou y col. 1983).

El uso de cloruro de sodio es cuestionable desde el punto de vista nutricional. Por ello, solo son recomendadas concentraciones muy bajas del mismo. La adición de sustancias de bajo peso molecular tales como cloruro de sodio, ácidos málico y láctico en concentraciones de 1% a 5% en soluciones de azúcar y jarabes de maíz, mejoran el proceso de deshidratación. El cloruro de calcio y el ácido málico fueron agregados en soluciones de sacarosa para mejorar la calidad en la textura de manzanas osmodeshidratadas (Hoover y Miller 1975).

Usualmente son comparadas soluciones saturadas de distintos solutos con la misma concentración. Flink utilizó dos criterios para clasificar diferentes sustancias osmoactivas: Pérdida de agua y cantidad de sustancia que penetra en el material (Flink 1980). El descenso de la actividad acuosa en el material también fue usado como indicador de una sustancia osmoactiva conveniente (Lerici y Mastrocola 1985).

1.2.5 Aspectos tecnológicos

Recientemente ha habido un creciente interés en pretratamientos de alimentos en soluciones concentradas de manera de obtener una significativa remoción de agua con una limitada incorporación de sólidos, lo cual generalmente lleva a una considerable reducción de peso en el proceso (Rastogi y col. 2002).

Existe un amplio campo de aplicación para esta técnica. Los productos obtenidos pueden ir desde snacks o mezclas para aperitivos, a ser

incorporados en pastelería, cereales, yogurt, helados o simplemente como productos congelados o para rehidratar.

El tratamiento complementario, necesario para alcanzar un alimento estable, puede ser una pasteurización, congelación, secado solar, secado con vacío, liofilización, adición de conservantes, acidificación, etc. (figura 1.2).

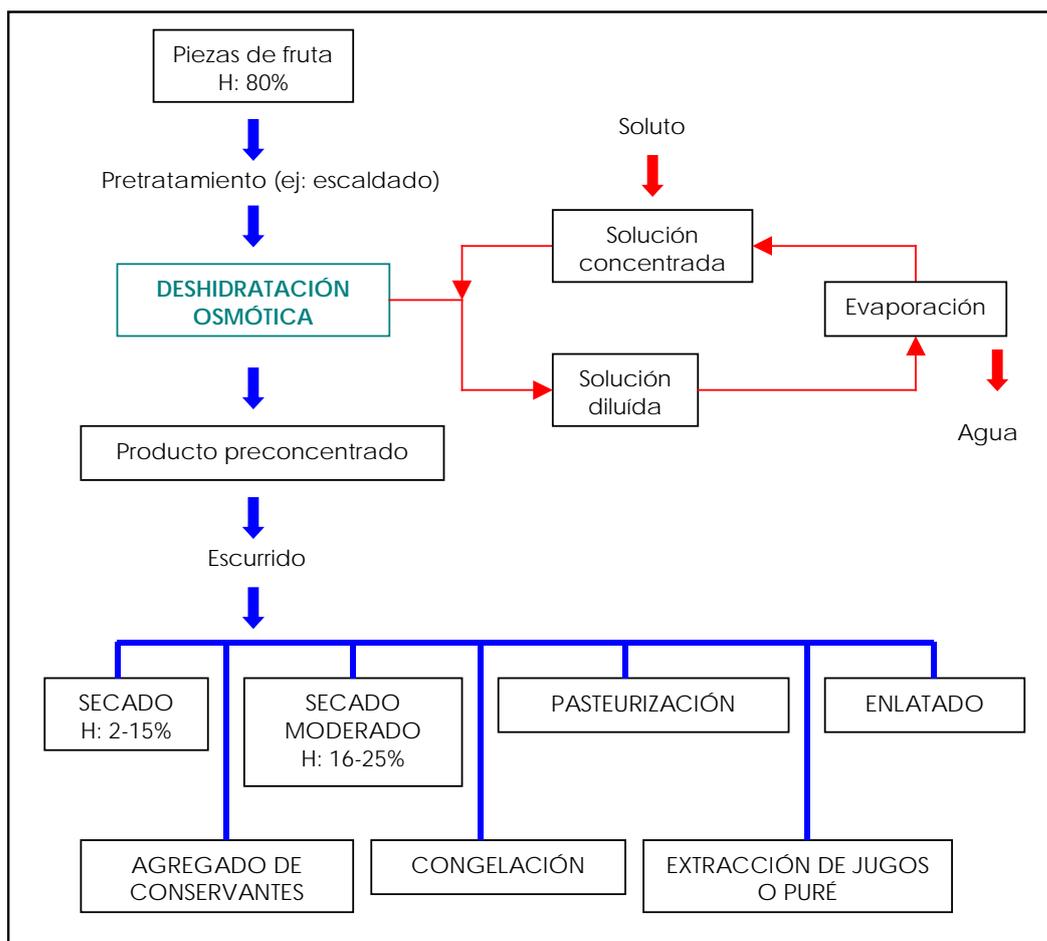


Figura 1.2. Aplicaciones industriales del proceso osmótico en frutas y verduras.

El interés en introducir la DO como pretratamiento reside principalmente en la obtención de un producto final de buena calidad nutricional (vitaminas y minerales) y buenas cualidades organolépticas como por ejemplo, menor daño en el color y el aroma del producto respecto al secado con aire caliente y mejoras en la textura previa a la congelación (Talens y col. 2002 a y b). Esto se puede atribuir a las temperaturas de operación moderadas con las que se trabaja, a la baja pérdida de volátiles y al efecto favorable del ingreso de solutos.

También puede lograrse un substancial ahorro de energía ya que el producto es procesado en fase líquida, dando generalmente buenos coeficientes de transferencia de calor y masa y además, el agua es removida sin cambio de fase. Bajo condiciones regulares de producción industrial, se ha previsto una reducción de costo de un 40-50% (Lenart y Lewicki 1988). De todas maneras, los aspectos ingenieriles del proceso no están aún bien investigados y de aquí que la energía necesaria no sea conocida con exactitud.

La DO puede ser realizada básicamente por dos caminos:

- Proceso estático
- Proceso dinámico

En el proceso estático, el material es mezclado con la sustancia osmoactiva, la cual puede ser usada como cristal o solución. La mezcla permanece inmóvil el tiempo necesario hasta alcanzar la pérdida de agua deseada. Se ha demostrado que la resistencia a la transferencia de masa en este método es más elevada que la observada en el proceso dinámico (Bongirwar y Sreenivasan 1977; Lewicki y Lenart 1995).

En el proceso dinámico, se pueden aplicar diferentes métodos de mezclado. Los que se utilizan con mayor frecuencia son: movimiento de las piezas de alimento en una solución estacionaria, mezclado de toda la suspensión y flujo de la sustancia deshidratante a través de una capa estacionaria de piezas del producto.

La reconcentración de la solución que es, en efecto, la segunda etapa del proceso de deshidratación osmótica, se puede llevar a cabo por técnicas de evaporación tales como evaporadores de multiefecto o recompresión mecánica de vapor (Raoult-Wack y col. 1992).

La eficiencia y velocidad del proceso van a depender tanto del tipo y concentración del alimento a tratar, su tamaño, forma, temperatura y presión del proceso y el pretratamiento del alimento previo a la DO (Lenart y Lewicki 1995).

El pretratamiento osmótico permitirá obtener:

- Un producto final de mejor calidad organoléptica gracias a que se minimiza el daño por calor en el color, flavor y textura, se produce una menor pérdida de componentes volátiles y hay un efecto favorable por la incorporación de solutos;
- Incorporación de aditivos como conservantes y nutrientes a través de la solución osmótica (Gras y col. 2003);
- Disminución en el tiempo de procesado y
- Reducción en el consumo energético, en comparación con los procesos convencionales.

Finalmente, también puede aprovecharse el tratamiento osmótico para difundir dentro del alimento sustancias específicamente agregadas a la solución, tales como sales de Ca, Mg, Zn, etc., utilizadas para fortificar productos especiales (como barras de cereales, mermeladas, etc.) (de Escalada Plá y col. 2009; Bambicha y col. 2010; Salvatori y col. 2011).

1.3 Dehidrocongelación

El incremento en la demanda de frutas y vegetales mínimamente procesados, tanto para el consumo directo como para ingredientes en la elaboración de otros alimentos (Monzini y Maltini 1986), ha llevado al desarrollo de tecnologías alternativas con el objetivo de minimizar los inconvenientes de los procesos tradicionales (por ejemplo durante la congelación se producen cambios químicos y físicos que afectan las características tisulares y nutricionales de estos alimentos, sumado a un importante consumo energético (Huxsoll 1982)).

De aquí que la dehidrocongelación se presente como una técnica de interés para obtener productos congelados de buena calidad. El proceso se divide en dos etapas:

La primera de deshidratación, normalmente hasta una reducción del 50% en peso, de manera de obtener un aumento en la concentración molar de sólidos dentro del alimento y un descenso en el punto crioscópico del

mismo (lo que llevaría a una mejor formación de los núcleos durante la congelación).

La segunda de congelación, en donde se alcanzaría la estabilización del alimento para su conservación con un menor daño del producto, aún en tejidos delicados como las frutas.

El mecanismo de la dehidrocongelación es múltiple:

- La mayor concentración en sólidos, determina condiciones de subenfriamiento y de nucleación intensa con formación de hielo microcristalino;
- La composición del alimento dehidrocongelado es sustancialmente distinta a la correspondiente al alimento congelado. Siendo eliminada la mayor parte del agua, para un producto con el 16% de residuo seco y teniendo en cuenta la fracción no congelable, la relación sustancia seca/hielo pasa de 16:77,5 a 16:21,5 (Monzini y Maltini 1986).
- La presencia de espacios vacíos debido al pretratamiento de deshidratación, permite compensar el aumento de volumen del hielo, reduciendo el daño mecánico de las células.

El conjunto de estos factores hace que durante la descongelación el colapso de la estructura sea minimizado.

Además, desde el punto de vista económico, la necesidad de frío se ve reducida proporcionalmente a la menor cantidad de hielo formado y la disminución de volumen conduce a un menor costo de manejo, conservación y transporte.

Desde el punto de vista de las aplicaciones, las más interesantes resultan, la preparación de ensalada de frutas refrigerada y como ingredientes para la elaboración de helados, yogurt y pastelería (habiendo en esta última una doble ventaja: buena calidad organoléptica y un reducido contenido de agua que limita el riesgo de impregnación de la masa) (Monzini y Maltini 1986).

1.4 Objetivos

En el presente trabajo de tesis, se examinan distintos aspectos vinculados a la Deshidratación Osmótica (DO) y la Dehidrocongelación (DC) de productos frutihortícolas. Los objetivos establecidos se detallan a continuación.

El progreso de la DO se ve afectado por diversas variables tales como tamaño y forma de las piezas, tiempo de inmersión, agitación, temperatura, concentración de la solución, etc. El control de las mismas resulta dificultoso al no conocerse por completo el mecanismo del proceso. Para lograr un mayor entendimiento, se decidió **evaluar los efectos de las variables del proceso, temperatura, concentración y composición de la solución, sobre la cinética de transferencia de materia.**

Para ello, se efectuaron pruebas con cubos de manzana a tres temperaturas (30°C, 40°C y 50°C), dos concentraciones (47 y 69 °Brix) y seis tipos diferentes de solutos (glucosa, fructosa, sacarosa, maltosa, AAPM y maltodextrinas). Los resultados obtenidos se presentan en el *capítulo 2*.

En el *capítulo 3* se exponen los datos obtenidos de la deshidratación de piezas de manzanas, peras, frutillas y kiwis, en distintas soluciones osmóticas y su posterior congelación con el objeto de **alcanzar una mejor comprensión de la transferencia de materia que tiene lugar durante la DO, siguiendo su evolución a través de la pérdida de peso y ganancia de sólidos en el tiempo y analizar el alcance del uso de diferentes agentes osmóticos (glucosa, sacarosa y jarabes de maíz) en el proceso global.**

El menor contenido de agua obtenido con la deshidratación previa, logra un producto que resiste mejor al colapso de la congelación. Este aspecto interesa especialmente en algunos frutos como manzana, pera y frutilla, cuyos tejidos son muy delicados. Buscando entonces alcanzar un producto congelado de buena calidad, se resolvió **estudiar la calidad de distintas frutas dehidrocongeladas a través de los parámetros de calidad (color, exudado y textura), luego de cada etapa del proceso combinado, es decir, después de la DO y posterior a la congelación, y finalmente, determinar**

el contenido de ácido ascórbico en kiwis dehidrocongelados, observando la influencia que ejerce sobre el mismo, la temperatura y tipo de soluto seleccionados.

Para obtener un modelo capaz de describir el proceso combinado, que tenga la facultad de predecir los parámetros del proceso de DO (pérdida de agua, ganancia de sólidos, reducción de volumen y contenido de sólidos solubles), y los perfiles de temperatura para la etapa de congelación, se vinculó un modelo previamente desarrollado basado en la transferencia de materia en tejidos vegetales para la etapa de DO, con una formulación entálpica con un esquema de volumen finito, para el proceso de transferencia de calor que tiene lugar durante la etapa de congelación.

El alcance del modelo se muestra en el *capítulo 4* para cubos de manzana y discos de pera, en distintas soluciones, confrontando los datos calculados con los experimentales.

Con los objetivos planteados y las experiencias realizadas, en el *capítulo 5* se presentan las conclusiones generales.

Capítulo 2

**Efectos de la temperatura,
composición y concentración
de la solución osmótica en el
proceso de deshidratación**

2.1 Introducción

El interés de un pretratamiento por Deshidratación Osmótica (DO) previo a la etapa de conservación (congelación, secado, liofilización, etc.) está ligado esencialmente al mejoramiento de la calidad del producto final.

Como se mencionó en el capítulo 1, la técnica es una simple inmersión de frutas o vegetales en una solución concentrada donde se obtiene una disminución del contenido de agua y un aumento de los sólidos en el producto. Al no conocer por completo el mecanismo que involucra este proceso, se hace difícil controlar las principales variables del mismo.

La DO depende del tamaño y forma de las piezas, área específica de la muestra, tiempo de inmersión, agitación, temperatura, concentración y composición (pesos moleculares de los solutos) de la solución, presión y relación producto-solución.

La temperatura tiene un efecto importante ya que no solo afecta la velocidad del proceso, sino también tiene influencia en la composición química y propiedades del producto. Un incremento de la misma produce un aumento en la velocidad de las reacciones químicas y en la transferencia de masa. Andreotti y col. reconocen como 43°C la temperatura óptima de deshidratación de cerezas y peras con soluciones de glucosa y jarabe de glucosa-fructosa (Andreotti y col. 1983) y de 20°C para damascos. Temperaturas en un rango de 40°C y 60°C fueron empleadas para deshidratar bananas (García y col. 1974; Adambounou y col. 1983) y manzanas en un rango de 35-55°C (Contreras y Smyrl 1981) y 30-90°C (Lenart y Lewicki 1990). Se ha demostrado que un incremento en la temperatura de 40°C a 80°C acorta substancialmente el tiempo de deshidratación (Pavasovic y col. 1986). Sin embargo, un incremento en la temperatura promueve la penetración de sólidos en los tejidos desde la solución.

Con respecto a la concentración de la sustancia osmoactiva, la velocidad del proceso osmótico aumenta con el incremento de la misma (Farkas y Lazar 1969).

Efectos de la temperatura, composición y concentración de la solución

Varios autores han demostrado que al modificar la concentración de la solución osmótica, varía la velocidad del proceso tanto en la pérdida de agua como en la ganancia de solutos (Pinnavaia y col. 1983; Contreras y Smyrl 1981; Lenart y Flink 1983). Por ejemplo, ensayos realizados en mangos y papayas arrojaron resultados en los cuales la pérdida de agua era linealmente dependiente de la concentración de sacarosa por encima del 60% (Moy y col. 1978).

El tipo de solución también juega un rol muy importante en el tratamiento osmótico de alimentos. Principalmente tres tipos de soluciones han sido usadas: sales, azúcares y jarabes de maíz, los cuales disminuyen la presión osmótica de la solución. Numerosos trabajos, entre ellos los de Lerici y col. (1985) y Biswal y Bozorgmehr (1992), comparan diferentes tipos de soluciones osmóticas.

Nuestro objetivo fue evaluar los efectos de la temperatura, concentración y composición de la solución sobre la cinética de transferencia de materia durante la deshidratación de cubos de manzana, siguiendo en el tiempo las variables Pérdida de agua (WL) y Ganancia de sólidos (SG).

2.2 Materiales y Métodos

El equipo de deshidratación osmótica (fig. 2.1) consiste en una cuba de acero inoxidable con capacidad de 20 litros, provista de un serpentín por el que recircula una mezcla de agua-etilenglicol desde un criostato con el objetivo de calefaccionar la solución osmótica. El conjunto se completa con un agitador.

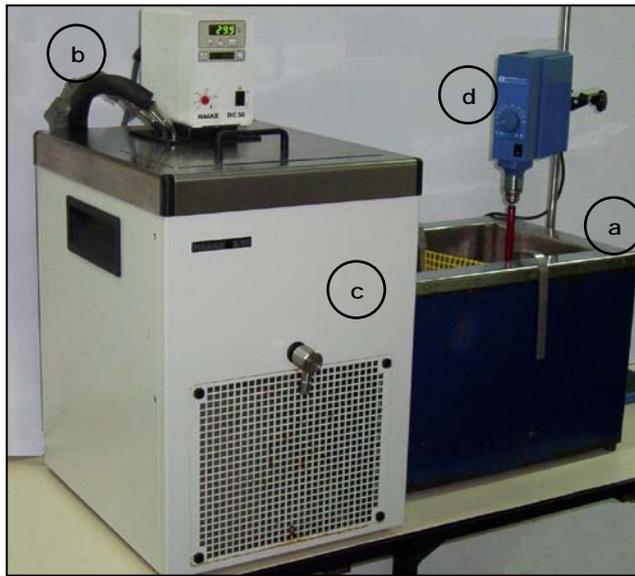


Figura 2.1. Fotografía de equipo completo de deshidratación osmótica.
(a) cuba, (b) sistema de recirculación; (c) criostato; (d) agitador.

Las experiencias se realizaron con manzanas variedad Granny Smith, adquiridas en el mercado regional de La Plata provenientes del Alto Valle de Río Negro. Las mismas se almacenaron hasta su uso en cámara a 10°C.

Para estudiar el efecto del tipo de soluto y concentración de la solución, se trabajó con las composiciones y concentraciones que se detallan en la tabla 2.1. Los agentes osmóticos fueron suministrados por Productos de Maíz S.A. Las soluciones se prepararon con anterioridad a las experiencias, utilizando agua corriente en las concentraciones dadas en la tabla. Para su mejor conservación, luego de preparadas se colocaron dentro de bidones en cámara a 0°C.

Tabla 2.1. Composición porcentual de azúcares en agentes osmóticos.

Agente osmótico	Composición	°Brix
Sacarosa	Grado comercial	47 y 69
Glucosa	Glucosa (99,5%)	47
Jarabe de Fructosa	Fructosa (19%); Glucosa (33%); Maltosa (8%); AAPM(*) (40%)	47 y 69
Jarabe de Maltosa	Glucosa (5%); Maltosa (45%); AAPM(*) (50%)	47
Jarabe de AAPM(*)	Glucosa (16%); Maltosa (12%); AAPM(*) (72%)	47 y 69
Maltodextrinas	Glucosa (2%); Maltosa (3%); AAPM(*) (95%)	47

(*) Azúcares de alto peso molecular

Los frutos se cortaron en cubos de 1,5 cm de lado, se pesaron porciones de 80 - 100 gramos y luego de colocarlos dentro de canastas de plástico (de malla muy abierta), se sumergieron en las soluciones osmóticas dentro de la cuba, bajo las siguientes condiciones de ensayo:

- Agitación constante: 280 rpm.
- Temperaturas: 30°C, 40°C y 50°C.
- Tiempos de inmersión: 1, 2, 4, 12 y 24 horas.

Una vez transcurrido el tiempo de inmersión, las muestras fueron retiradas de la cuba, enjuagadas de manera intermitente durante 30 segundos en agua, secadas con papel absorbente y pesadas.

La evolución de la transferencia de masa fue seguida a través de la variación en el tiempo de:

Contenido de sólidos solubles (°Brix) obtenido a través de mediciones en refractómetro Abbe (Bellinham+Stanley Limited).

Pérdida de peso (WR) calculada por diferencia de pesada antes y después del tratamiento.

$$WR(\%) = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} * 100 \quad (2.1)$$

m_i : masa inicial (muestra sin tratar)

m_f : masa final (muestra tratada)

Sólidos totales (TS) determinados en estufa de vacío a 58°C, durante 72 horas o hasta alcanzar masa constante.

$$TS(\%) = \left(\frac{m_s}{m_o} \right) * 100 \quad (2.2)$$

m_s : peso de muestra seca.

m_o : peso de muestra antes de secar.

Todas las determinaciones se realizaron por duplicado.

Con estos valores se pudieron evaluar los parámetros generalmente usados para seguir el proceso de deshidratación osmótica mediante las siguientes expresiones:

Pérdida de agua

$$WL(\%) = \left[\left(1 - \frac{TS^o}{100} \right) - \left(1 - \frac{TS}{100} \right) * \left(1 - \frac{WR}{100} \right) \right] * 100 \quad (2.3)$$

Ganancia de sólidos

$$SG(\%) = \left[\left(1 - \frac{WR}{100} \right) * \frac{TS}{100} - \frac{TS^o}{100} \right] * 100 \quad (2.4)$$

donde TS^o es el contenido de sólidos inicial de la fruta.

Para determinar los perfiles de concentración, se cortaron cubos de manzana de 1,5 cm y 2,0 cm de lado. Las muestras fueron sometidas a DO a

Efectos de la temperatura, composición y concentración de la solución

tres tiempos diferentes (2, 4 y 12 horas) con soluciones de glucosa, sacarosa y AAPM a 47 °Brix y 30°C.

Luego del tratamiento, se procedió de la misma manera que en las experiencias anteriores y una vez hecha la pesada para evaluar la pérdida de peso, se cortaron las seis caras de los cubos en capas de 1 mm de espesor (fig. 2.2), determinando con cada una de ellas los sólidos totales y sólidos solubles (°Brix). Posteriormente, con los datos así obtenidos, tomando los valores promedio en cada capa, se pudieron elaborar los perfiles y estimar la ganancia de sólidos y la pérdida de agua desde el borde hacia el centro de los cubos, con las ecuaciones previamente expuestas.

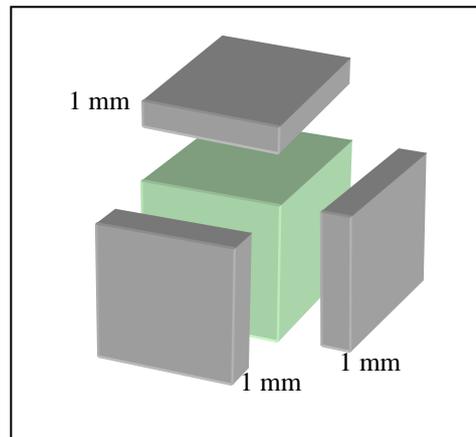


Figura 2.2. Esquema de corte de manzana.

El cálculo del volumen de los cubos de manzana se llevó a cabo tomando las medidas de cada lado con un calibre. El valor representado corresponde al promedio de seis piezas de fruta fresca y tratada para cada tiempo de deshidratación con cada una de las soluciones.

2.3 Resultados y discusión

2.3.1 Efecto de la temperatura

Durante la deshidratación osmótica de los cubos de manzana, los resultados obtenidos mostraron un incremento en la pérdida de agua (WL) y en algunos casos en la ganancia de sólidos (SG) cuando la temperatura de la solución crecía, lo cual concuerda con estudios previos realizados en manzanas (Conway y col. 1983, Magee y col. 1983, Lenart y Lewicki 1990, Saurel y col. 1994).

Las figuras 2.3 a 2.6 exhiben el efecto de la temperatura durante el proceso osmótico a 30°C, 40°C y 50°C en cubos de manzana tratados con soluciones de glucosa, sacarosa, azúcares de alto peso molecular (AAPM) y maltodextrinas a 47°Brix. Sus valores también son presentados en la tabla 1 del Apéndice.

Un aumento en la temperatura, ocasionó un incremento en los parámetros WL y SG, el cual no fue significativo entre los 30°C y 40°C.

Tratamientos realizados a más de 40°C afectaron principalmente a las muestras deshidratadas con solutos de alto peso molecular y maltodextrinas (fig. 2.5 y 2.6), resultando en una substancial pérdida de agua y una marcada disminución en el contenido de sólidos naturales de la muestra (indicada por los SG negativos) a tiempos prolongados del proceso.

Si bien un ascenso en la temperatura origina un aumento en la difusión de los solutos, cuando la temperatura es muy elevada, ocurren cambios estructurales destructivos en la membrana celular (un efecto de hinchazón/plasticidad) que promovería una rápida pérdida de agua, arrastrando sólidos naturales a través de la misma. A su vez, la rápida pérdida de agua evitaría una proporcional velocidad de difusión de azúcares de la solución a la fruta (Lazarides y col. 1995).

Además se puede apreciar en las figuras que la WL en las experiencias realizadas a 50°C alcanza el equilibrio a partir de las 12 horas de tratamiento, mientras que a menores temperaturas (a excepción de la glucosa), luego de 24 horas de proceso la WL no arribó a un valor constante.

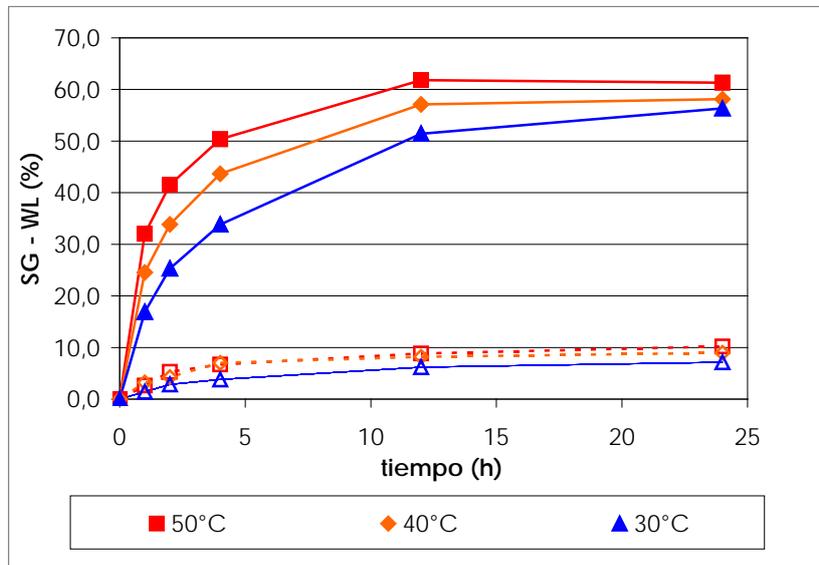


Figura 2.3. Efecto de la temperatura durante la DO de cubos de manzana con solución de glucosa a 47°Brix (SG: líneas discontinuas; WL: líneas continuas).

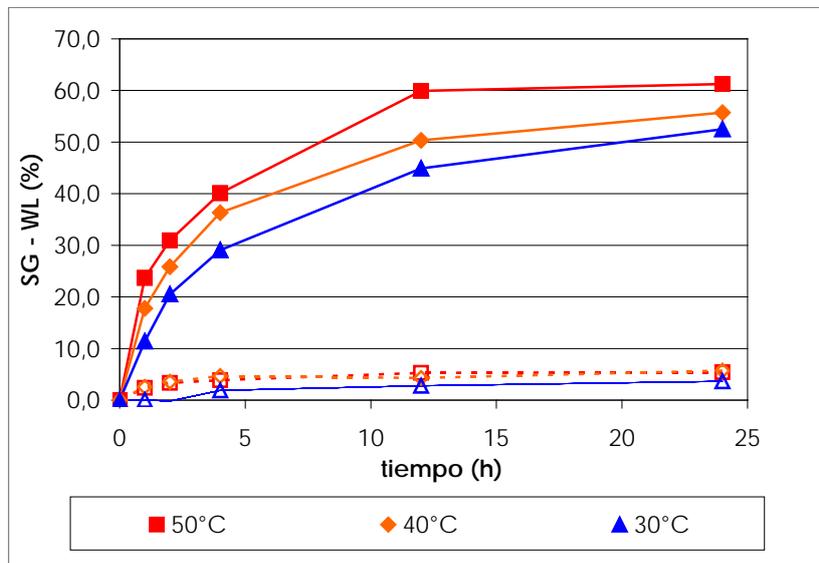


Figura 2.4. Efecto de la temperatura durante la DO de cubos de manzana con solución de sacarosa a 47°Brix (SG: líneas discontinuas; WL: líneas continuas).

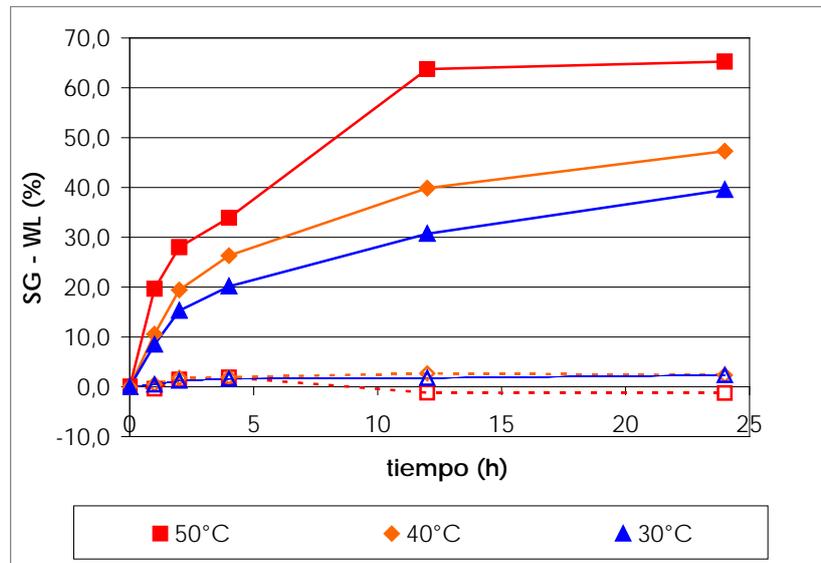


Figura 2.5. Efecto de la temperatura durante la DO de cubos de manzana con solución de AAPM a 47°Brix (SG: líneas discontinuas; WL: líneas continuas).

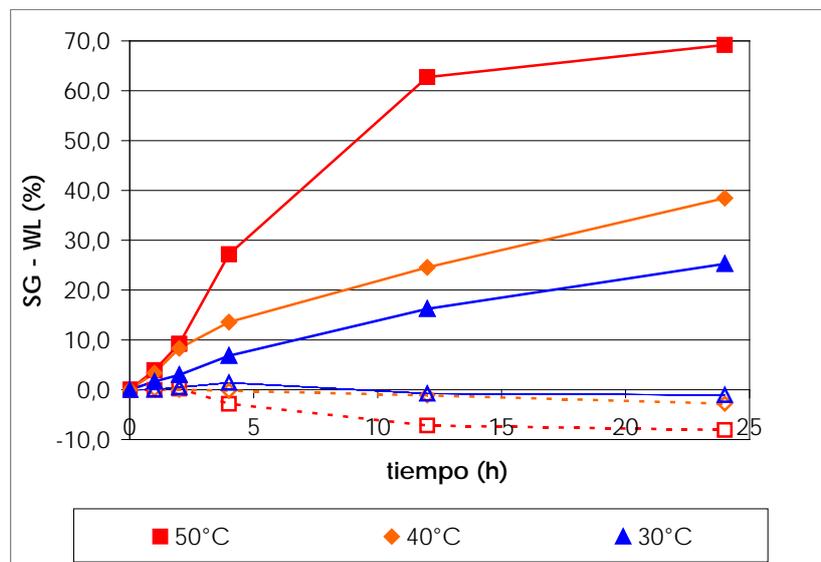


Figura 2.6. Efecto de la temperatura durante la DO de cubos de manzana con solución de maltodextrinas a 47°Brix (SG: líneas discontinuas; WL: líneas continuas).

2.3.2 Efecto de la concentración de la solución

Al igual que en el caso de la temperatura, Conway y col. (1983), Magee y col. (1983), Lenart y Lewicki (1990) y Saurel y col. (1994), comprobaron que un

Efectos de la temperatura, composición y concentración de la solución

incremento en la concentración de la solución osmótica, conduce a un aumento en los parámetros WL y SG.

Los resultados de transferencia de masa durante la DO a 30°C, con soluciones de sacarosa, glucosa, fructosa y AAPM a 47°Brix y 69°Brix, se muestran en las figuras 2.7 y 2.8 y en la tabla 2 del Apéndice.

Para todas las soluciones testeadas, coincidiendo con los autores anteriormente mencionados, un aumento en la concentración de la solución hipertónica llevó a un ascenso en ambos parámetros. La diferencia más significativa se observó en la pérdida de agua (fig. 2.7), donde la variación de 47° a 69°Brix, condujo a un aumento de más del 50%.

En la ganancia de sólidos (fig. 2.8), los cambios fueron poco significativos. La solución de glucosa de 47°Brix es la de máxima saturación y con ella se obtienen valores que duplican a los alcanzados inclusive con aquellas soluciones de 69°Brix.

La pérdida de solutos naturales, a diferencia de lo visto con la temperatura, se redujo cuando la concentración de la solución externa aumentó. Este efecto limitante de incrementar la concentración sobre la pérdida de solutos de la fruta fue previamente comprobado por Heng y col. 1990, los cuales demostraron que los niveles de ácido ascórbico en piezas de papaya fueron máximos cuando se utilizaron soluciones más concentradas.

Con todo lo anteriormente expuesto, se comprueba la teoría que a una mayor concentración, se produce un ascenso en la presión osmótica, incrementando así la velocidad de migración del agua de la fruta a la solución y sólidos en sentido inverso.

Además se formaría una capa superficial de sólidos más concentrada en la interfase solución-fruta, obteniéndose un mayor gradiente de concentración. La formación de dicha capa tiene un efecto superior sobre el control de la transferencia de masa durante la DO, favoreciendo la pérdida de agua, limitando la impregnación y reduciendo la pérdida de solutos solubles naturales de la fruta tales como ácido ascórbico y fructosa. Por otro lado la presencia de la capa concentrada puede tener influencia durante el

proceso complementario o durante su posterior almacenamiento (Raoult-Wack y col. 1991 (3)).

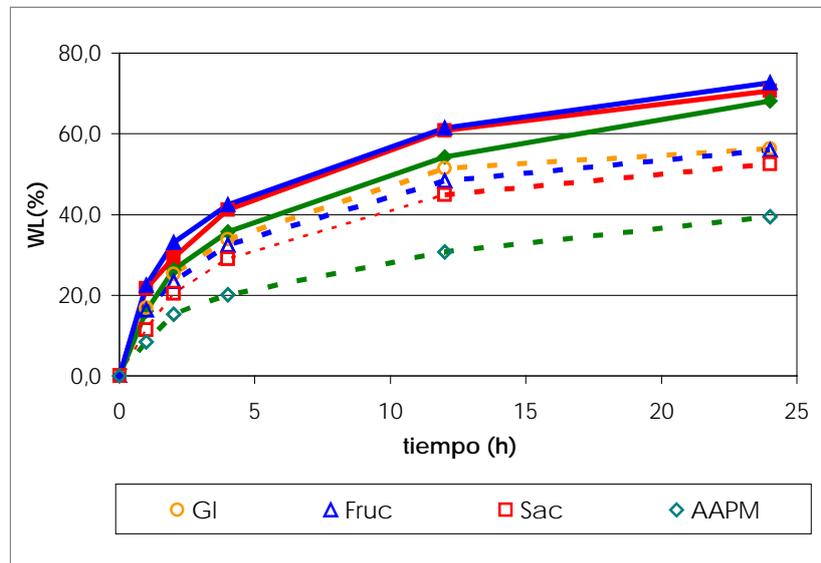


Figura 2.7. Pérdida de agua durante la DO de cubos de manzana con distintas soluciones a 47°Brix (líneas discontinuas) y 69°Brix (líneas continuas) y 30°C.

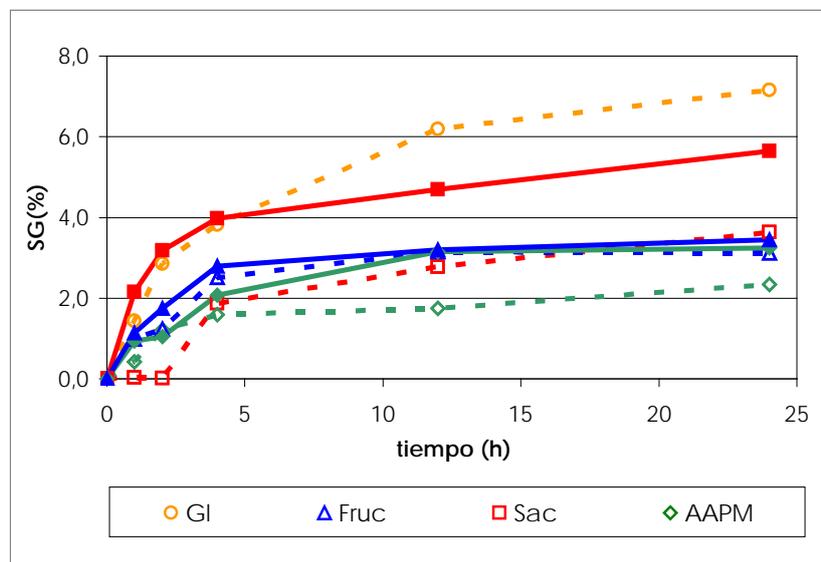


Figura 2.8. Ganancia de sólidos durante la DO de cubos de manzana con distintas soluciones a 47°Brix (líneas discontinuas) y 69°Brix (líneas continuas) y 30°C.

2.3.3 Efecto de la composición de la solución (tipo de soluto)

Similares resultados se presentaron al disminuir el peso molecular de los solutos (fig. 2.9 y 2.10 y tabla 3 del Apéndice).

Para las soluciones preparadas con azúcares de bajo peso molecular, la difusión de sólidos en la fruta fue más rápida y marcada. Con solutos de alto peso molecular, el efecto fue menor e inclusive arrojó valores negativos de SG, indicando que la incorporación de azúcar en la muestra era inferior a los sólidos lixiviados. Este comportamiento se puede relacionar con la reducción de difusividad efectiva de los solutos cuando su tamaño aumenta (ley Stokes-Einstein).

Por otro lado, las características de la pared celular (tortuosidad y diámetro de espacios libres) ayudan a reducir la difusividad aparente cuando el peso molecular del soluto se incrementa (Muhr y Bloushard 1982). Estos efectos se acentúan a medida que los productos deshidratados se encogen. Ise y Shubert (1991) notaron que durante la DO de piezas de mango fresco, los diámetros de los poros en las paredes celulares se redujeron de 10nm inicialmente a 4nm en el equilibrio, aproximadamente. Además demostraron que un encogimiento de la pared celular reduce la difusividad de la sacarosa en forma más notoria que para la glucosa (dos veces menor en tamaño respecto a la primera).

Respecto a WL, inmediatamente después de comenzado el tratamiento, la deshidratación fue más rápida con soluciones de solutos de menor peso molecular. Esto se puede comprender por el hecho que a dichos solutos, le corresponden mayores presiones osmóticas, lo cual favorecería la plasmólisis de las células. Por consiguiente, facilitaría la entrada de solutos de menor peso molecular resultando en una extensión de la plasmólisis a través de los tejidos, deshidratando gradualmente las diferentes capas celulares.

El agua celular liberada por la ósmosis, simplemente difunde de los tejidos hacia el medio concentrado externo (Saurel 1994; Raoult-Wack 1994).

Efectos de la temperatura, composición y concentración de la solución

En la figura 2.10 se confirma lo anteriormente expuesto en el punto 2.3.1: a 40°C, con solución de glucosa y luego de 12 horas de tratamiento, la WL se hace constante mientras con las restantes soluciones continúa en ascenso.

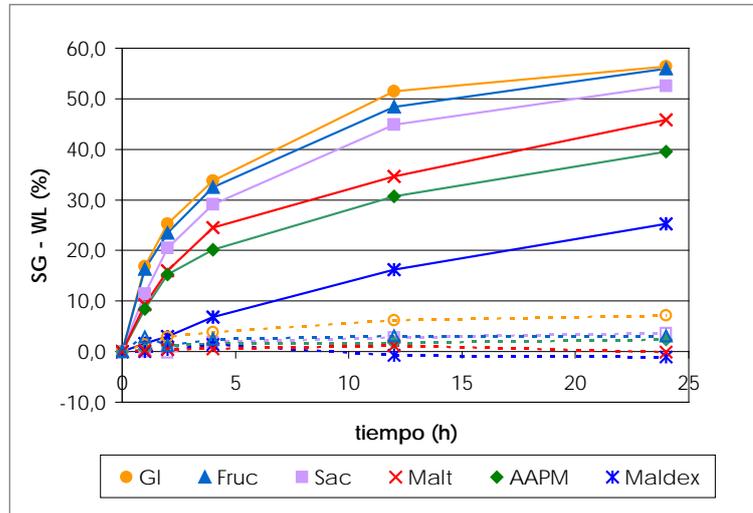


Figura 2.9. WL y SG durante la DO de cubos de manzana con distintas soluciones (solutos de variado peso molecular) a 47°Brix y 30°C.

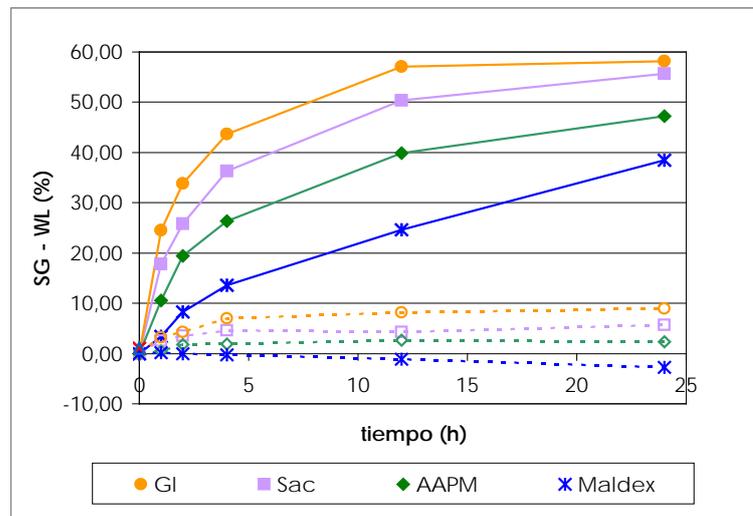


Figura 2.10. WL y SG durante la DO de cubos de manzana con distintas soluciones (solutos de variado peso molecular) a 47°Brix y 40°C.

2.3.4 Perfiles de concentración

Ha sido demostrado que en un proceso osmótico existe una distribución espacial significativa de sólidos y agua en los tejidos y que dicha distribución depende de un número de factores tales como tipo de soluto, concentración de la solución, tiempo de ósmosis, temperatura y uso de agitación (Lenart y Flink 1984). En particular, nuestro objetivo fue observar los cambios en el mecanismo de difusión como una función del tipo de soluto utilizado. En las figuras 2.11 a 2.16 se exponen los perfiles de concentración de cubos de manzana de 1,5 cm y 2,0 cm de lado, tratados con soluciones de sacarosa, glucosa y AAPM a 30°C, 47°Brix y agitación constante.

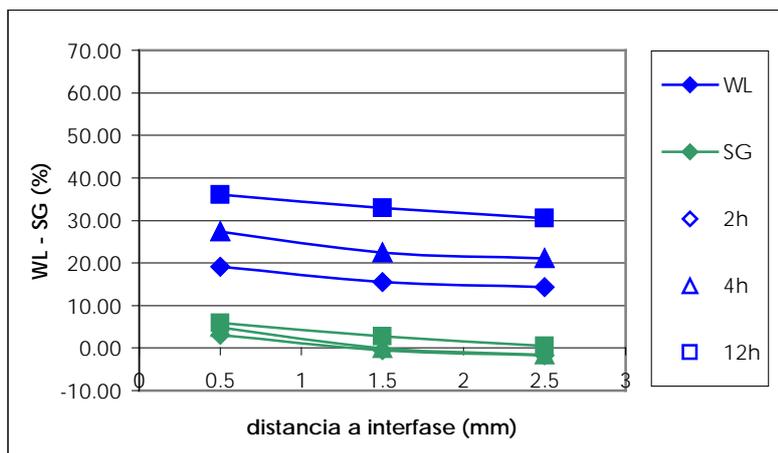
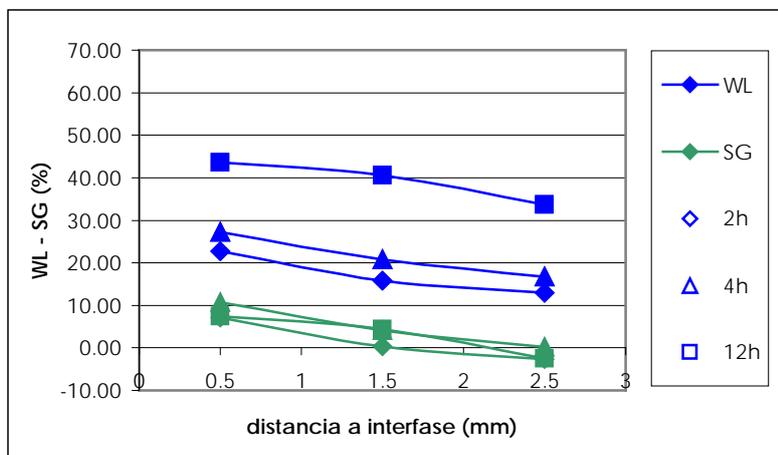
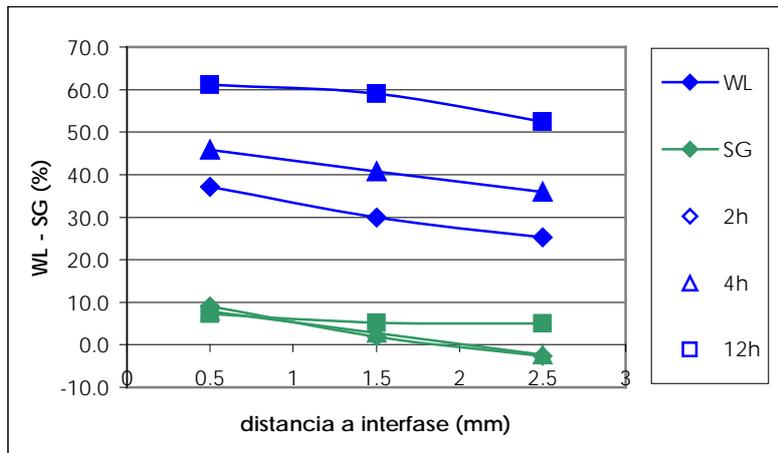
Un aumento en el tiempo de deshidratación ocasionó un cambio en la forma de los perfiles, principalmente en la pérdida de agua. Al inicio del proceso WL fue rápida en los bordes del cubo. Luego de 12 horas de tratamiento, los flujos decrecieron progresivamente en los bordes, haciéndose más veloces hacia el centro.

En la ganancia de sólidos se observaron dos comportamientos:

Los solutos provenientes de la solución osmótica que penetran en los tejidos del material a deshidratar, se localizaron fundamentalmente en una capa superficial de la interfase solución-producto (2-3 mm de profundidad), lo cual se mantuvo casi constante a lo largo del proceso, es decir, aún luego de largos períodos de inmersión (puntos concordantes). De acuerdo a algunos autores, la entrada de solutos estaría limitada a los espacios extracelulares (Hawkes y Flink 1978; Bohn y col. 1983 y Marcotte 1988).

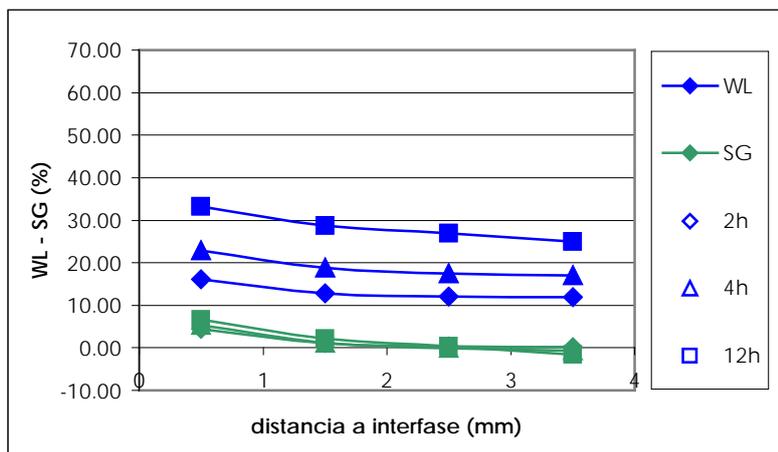
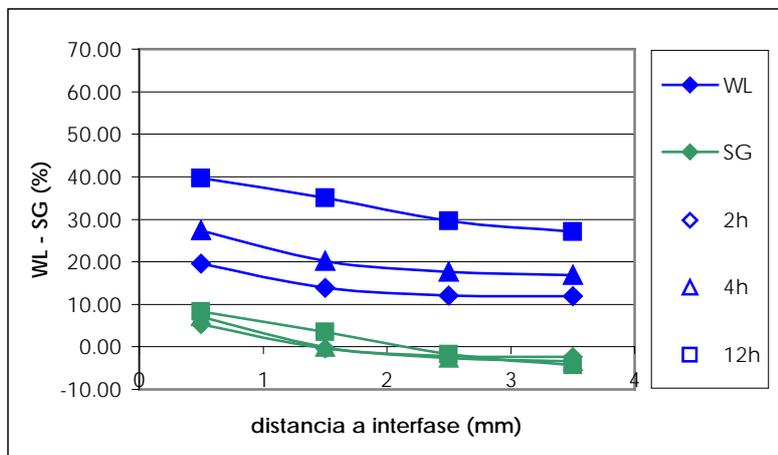
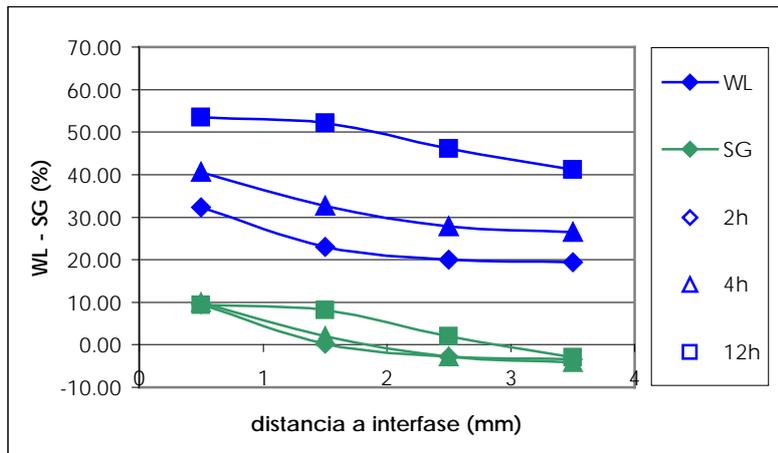
En el interior del cubo los niveles de SG cayeron en forma pronunciada (a excepción de las muestras de 1,5 cm a las 12 horas de tratamiento con solución de glucosa). Este descenso obedeció, como se dijo antes, a que la lixiviación de los sólidos naturales de la fruta fue mucho más rápida que la difusión de los solutos de la solución osmótica.

Efectos de la temperatura, composición y concentración de la solución



Figuras 2.11, 2.12 y 2.13. Perfiles de concentración durante la DO de cubos de manzana de 1,5 cm de lado con soluciones de glucosa, sacarosa y AAPM respectivamente, a 47°Brix y 30°C.

Efectos de la temperatura, composición y concentración de la solución



Figuras 2.14, 2.15 y 2.16. Perfiles de concentración durante la DO de cubos de manzana de 2,0 cm de lado, con soluciones de glucosa, sacarosa y AAPM respectivamente, a 47°Brix y 30°C.

Efectos de la temperatura, composición y concentración de la solución

Se ha sugerido que la formación de una capa superficial concentrada de solutos en el alimento deshidratado al comenzar el proceso, sería perjudicial para la incorporación de sólidos, mientras conduciría al desarrollo de un pronunciado gradiente de concentración dentro del alimento que aumentaría la transferencia de agua desde el centro del producto hacia el exterior. Además la salida del agua iría acompañada de una marcada reducción de volumen y el gradiente interno decrecería volviéndose desfavorable para la difusión de solutos (Raoult-Wack y col. 1991 (1)).

Los cambios en el volumen de los cubos de manzana (encogimiento) observados durante el proceso de deshidratación, se presentan en las figuras 2.17 y 2.18. En ellas se exponen los resultados del efecto de la temperatura y tipo de solutos utilizados respectivamente, representando la relación del volumen al tiempo t de deshidratación respecto al inicial de la muestra.

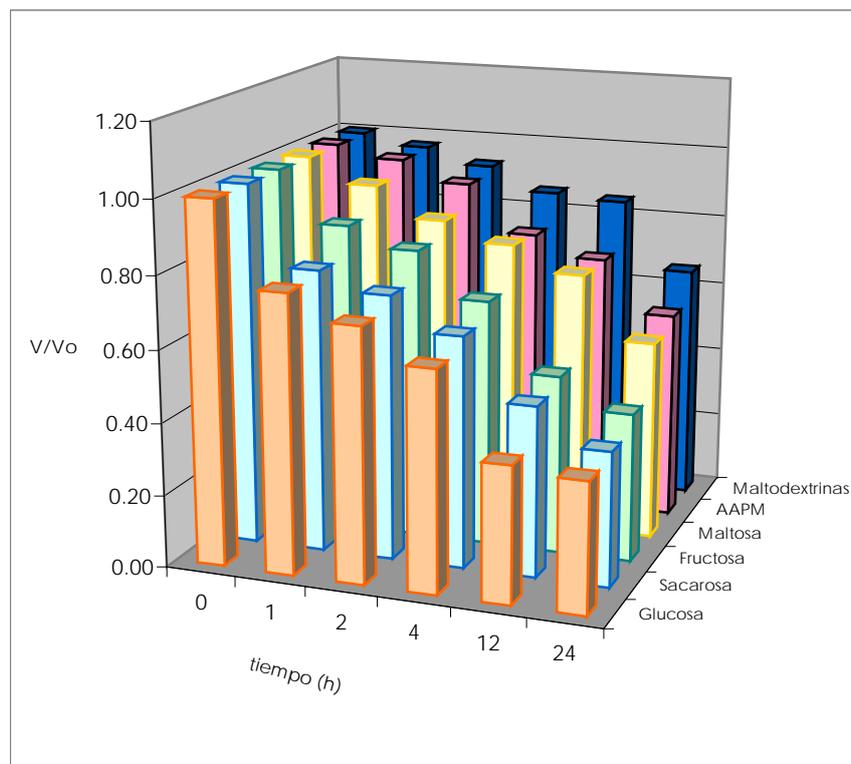


Figura 2.17. Efecto del tipo de soluto en la reducción de volumen de cubos de manzana durante la DO con diferentes soluciones, a 30°C.

Efectos de la temperatura, composición y concentración de la solución

Para ambas variables se comprobó que la reducción de volumen fue directamente proporcional a la pérdida de agua sufrida, en coincidencia con los resultados obtenidos por Lazarides y Mavroulis 1996 y Sereno 2001.

Un incremento en el peso molecular del soluto de la solución osmótica causa un descenso en WL y en consecuencia la variación en el volumen se ve más afectada en el tiempo en aquellas muestras tratadas con solutos de bajo peso molecular (fig. 2.17).

Por otro lado, como ya se mencionó en el punto 2.3.1, un aumento de temperatura afecta fundamentalmente a las muestras tratadas con solutos de alto peso molecular a tiempos prolongados del proceso, produciendo un incremento en WL y por consiguiente un mayor encogimiento de los cubos de manzana (figura 2.18).

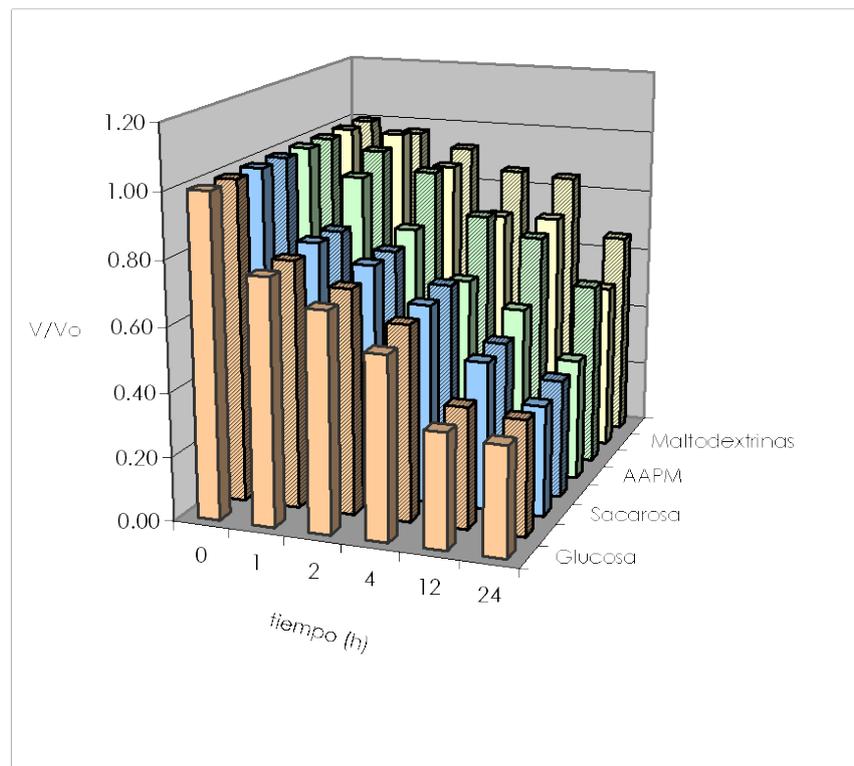


Figura 2.18. Efecto de la temperatura en la reducción de volumen de cubos de manzana durante la DO con diferentes soluciones, a 30°C (barras rayadas) y a 40°C (barras lisas).

Igualmente, comparada con otros procesos de deshidratación tales como lecho fluidizado, túnel y liofilización, la deshidratación osmótica origina un menor encogimiento de las piezas tratadas (Kim y Toledo 1987).

2.4 Conclusiones

En el presente capítulo, la deshidratación osmótica de cubos de manzana fresca ha expuesto los efectos producidos por las distintas variables, temperatura, composición y concentración de la solución, sobre la transferencia de agua y sólidos contenidos en la fruta. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Las velocidades de Pérdida de agua (WL) y Ganancia de sólidos (SG) tienen sus valores más altos al iniciar el proceso y descienden progresivamente. Este descenso es más pronunciado luego de 12 horas de tratamiento.

La WL y SG manifiestan importantes variaciones al modificar la temperatura y concentración de la solución osmótica.

Incrementos en la temperatura producen un ascenso poco significativo de WL y SG en condiciones moderadas de proceso, es decir cuando oscilan entre 30 y 40°C.

Si el tratamiento se lleva a cabo a más de 40°C, la temperatura es un factor importante a tener en cuenta ya que se produce un notorio incremento en las velocidades de WL y SG, principalmente cuando se emplean soluciones de azúcares de alto peso molecular, dando como resultado una elevada transferencia de agua hacia la solución y como consecuencia, un arrastre o lixiviado de sólidos naturales de la fruta.

El aumento en la concentración de la solución osmótica demuestra ser beneficioso en términos de pérdida de agua para un mismo período de inmersión y con un mínimo aumento de SG.

La transferencia de materia durante la deshidratación osmótica se ve afectada por el peso molecular de los solutos utilizados para preparar las soluciones osmóticas.

Efectos de la temperatura, composición y concentración de la solución

Bajos pesos moleculares conducen a un aumento en los valores de ambos parámetros. Las máximas impregnación y pérdida de agua se consiguen tratando a la fruta con soluciones de Glucosa y Sacarosa a 47°Brix y temperaturas moderadas (entre 30 y 40°C).

Solutos de alto peso molecular llevan a una incorporación de azúcares inferior a los sólidos lixiviados (aumento de tamaño = descenso de difusividad efectiva del soluto) con el consecuente descenso de los valores de SG. Esto se acentúa en función del tiempo de inmersión, a medida que los productos deshidratados se encogen.

La lixiviación puede ser parcialmente controlada, disminuyendo la difusividad aparente y la consecuente pérdida de solutos de la fruta. La barrera natural de las membranas celulares, son mejores conservadas a pesos moleculares mayores y temperaturas moderadas, lo cual también reduce el lixiviado.

Dependiendo del objetivo del proceso específico, podrá seleccionarse el rango de condiciones para el tratamiento del producto de acuerdo a si se desea deshidratación, impregnación o un efecto mixto.

Capítulo 3

Evaluación de la calidad de productos dehidrocongelados

3.1 Introducción

La dehidrocongelación se presenta como una técnica de interés para obtener productos congelados de buena calidad.

Los alimentos dehidrocongelados pertenecen a la categoría de productos congelados. La única diferencia que los distingue de estos últimos es el hecho de haber sido parcialmente deshidratados antes de la congelación, pero continúa siendo esta última, la técnica mediante la cual se conservará el alimento hasta el momento de uso.

Como se mencionó antes, el proceso se divide en dos etapas: Una primera de deshidratación parcial osmótica seguida por una segunda etapa de congelación.

La deshidratación parcial ha sido tradicionalmente realizada con aire caliente, pero se ha buscado reemplazarla por otra técnica debido a que este proceso conduce a una notoria pérdida de textura y cambios de sabor y color (Kim y Toledo 1987, Ramallo y Mascheroni 2010, Goula y Lazarides 2013). De aquí surge el interés por el uso de la DO como pretratamiento, en la cual se obtienen pérdida de agua y ganancia de sólidos dentro del alimento y un descenso en el punto crioscópico del mismo, lo que debería llevar a una mejor formación de los núcleos durante la congelación con la formación de pequeños cristales de hielo.

La pérdida de agua induce en el tiempo a un comportamiento termodinámico diverso del sistema hielo/soluto, factor muy importante para la integridad, sea a nivel citoplasmático o tisular. De esto resulta un congelamiento menos perjudicial para la estructura y además un producto que resiste mejor al colapso de la congelación, que a menudo convierte a la pulpa de la fruta, constituida por tejidos con organización, en débil y heterogénea.

Este aspecto interesa especialmente en algunos frutos como manzana, pera, frutilla y durazno, todos productos particularmente sujetos a daño por congelación (Monzini y Torreggiani 1985; Maestrelli y col. 2001; Talens y col. 2002b, Arballo y col. 2012).

En resumen, la etapa previa de deshidratación osmótica busca contrarrestar el efecto dañino de la congelación, inclusive en tejidos muy delicados como las frutas y los vegetales.

La finalidad del presente capítulo es presentar los resultados obtenidos al estudiar:

- La calidad de peras, frutillas, kiwis y manzanas dehidrocongelados, a través de medidas de color, exudado y textura. Las determinaciones se llevaron a cabo luego de cada etapa del proceso combinado, es decir, después de la deshidratación y luego de la congelación en un túnel de aire a (-40°C), sin la adición de compuestos tales como conservantes y/o antioxidantes.
- El efecto de la solución osmótica en el proceso global usando diferentes jarabes de deshidratación (glucosa, sacarosa y mezclas de jarabes de maíz).
- El efecto de la temperatura y el tipo de soluto en la retención de ácido ascórbico en kiwis dehidrocongelados.
- La evolución de la transferencia de masa a través de la pérdida de peso y la ganancia de sólidos en el tiempo.

3.2 Materiales y Métodos

3.2.1 Dehidrocongelación

Para evaluar la calidad de los productos frutihortícolas dehidrocongelados, se trabajó con las siguientes muestras:

- **Cubos de manzana** (variedad Granny Smith) de 1,5 cm de lado.
- **Discos de pera** (variedad Packham's Triumph) de 1 cm de espesor y 2 cm de diámetro.
- **Discos de kiwi** (variedad Hayward) de 1 cm de espesor y 4 cm de diámetro.

- **Frutillas enteras** (variedad Selva) con un peso aproximado de 14 g cada una.

Las peras y manzanas fueron adquiridas en el Mercado Regional de La Plata provenientes del Alto Valle de Río Negro y las frutillas se obtuvieron de quintas de la zona. En el caso de los kiwis, se trabajó con partidas de distintas procedencias, la primera de una cooperativa de la zona (mes de abril) y la segunda de Chile compradas en el Mercado Regional de La Plata (mes de junio). La materia prima se seleccionó de manera de hacer mínimas las diferencias en peso, tamaño, color, grado de madurez (comercial) y presencia de defectos evidentes. Las frutillas se procesaban el mismo día en que eran cosechadas, mientras el resto de las frutas se almacenaron en cámara a 10°C durante su uso.

Los agentes osmóticos seleccionados se indican en la tabla 3.1 junto a su composición y concentración.

Tabla 3.1. Composición porcentual de azúcares en agentes osmóticos.

Agente osmótico	Composición	°Brix
Sacarosa	Grado comercial	69
Glucosa	Glucosa (99,5%)	47
Jarabe de Fructosa	Fructosa (19%); Glucosa (33%); Maltosa (8%); AAPM(*) (40%)	69
Jarabe de AAPM(*)	Glucosa (16%); Maltosa (12%); AAPM(*) (72%)	69

(*) Azúcares de alto peso molecular

Para la etapa de deshidratación, se pesaron muestras de 80 - 100 gramos aproximadamente y colocadas dentro de canastas de malla abierta se sumergieron en la solución hipertónica en el equipo de DO ya descrito, a 30°C, con agitación constante (280 rpm) y tiempos variados de inmersión (1, 2, 4, 12 y 24 horas). Posteriormente, para evaluar la evolución de la transferencia de masa y determinar con ella la pérdida de agua (WL) y la ganancia de sólidos (SG), se procedió de igual manera que en el capítulo 2.

Luego de la deshidratación, las muestras fueron llevadas al equipo de congelación (figura 3.1). Éste está constituido por un freezer, un tanque de almacenamiento de nitrógeno y un sistema de conductos y válvulas a través de los cuales circula el gas (White Martins Gases Industriais S.A., 1996, Brasil). El freezer tiene en su interior bandejas perforadas acondicionadas en un "rack" fijo, frente a un ventilador que produce la circulación de los gases fríos (provenientes de la vaporización de N_2 líquido), sobre el producto a congelar. Un panel de control localizado en la parte superior del freezer posee toda la instrumentación necesaria para el monitoreo y control de la congelación (llave general, controlador digital de temperatura, temporizadores para ciclos de congelación y estabilización, selector manual/automático, etc.).

La congelación se realizó a $-40^{\circ}C$ y su progreso fue seguido a través de termocuplas del tipo Cu-constantan colocadas en el centro del producto, conectadas a un adquirente de datos Keithley DAC 500.

Finalmente la fruta congelada se colocó en recipientes herméticos dentro de un freezer a $-18^{\circ}C$ para su posterior estudio. Para las mediciones de textura y color las muestras se descongelaban el tiempo necesario hasta alcanzar temperatura ambiente (aproximadamente $20^{\circ}C$).



Figura 3.1. Equipo de congelación. (a) freezer; (b) tanque de almacenamiento de N_2 ; (c) conducto de N_2 ; (d) bandejas perforadas; (e) ventilador; (f) panel de control.

3.2.2 Evaluación de la Textura

La textura de los alimentos es uno de los principales atributos que conforman su calidad sensorial. Su importancia además de tecnológica es económica y comercial ya que los efectos del transporte y la manipulación, su comportamiento durante los procesos de elaboración y la calidad de la textura del producto acabado dependen de su respuesta frente a la aplicación de fuerzas externas (Costell y col. 1997; Lewicki y Lukaszuk 2000; Chiralt y Talens 2005; Torres y col. 2006).

Para nuestro análisis de textura se optó por realizar ensayos de penetrometría, utilizando una prensa INSTRON modelo 1011. La máquina consta de dos partes: 1) Un mecanismo de conducción que maneja un cabezal horizontal en dirección vertical, el cual se desplaza a una velocidad controlada. 2) Un sistema de detección y registro de la fuerza ejercida consistente en celdas cuya salida alimenta el registrador (figura 3.2).

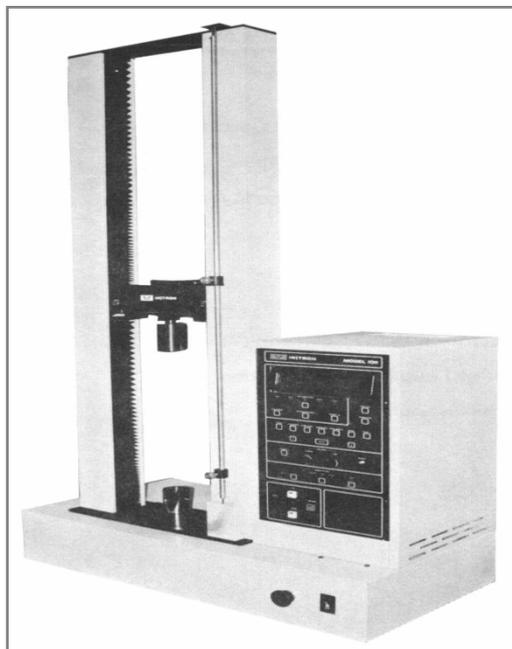


Figura 3.2. Equipo Instron utilizado para el análisis de textura.

En el presente estudio se trabajó con celda de compresión de 50 kg, una velocidad de cabezal de 30 mm/s y una probeta de metal de 5 mm de diámetro. La muestra era colocada sobre la base de aluminio del equipo y se hacía descender la probeta hasta alcanzar una profundidad de penetración de 2 mm. En este caso la primera discontinuidad en el gráfico Fuerza – distancia fue tomada para caracterizar la resistencia mecánica de las muestras.

Los resultados presentados son un promedio de quince mediciones realizadas sobre la muestra patrón (fruta fresca) y sobre el producto tratado para cada tiempo de deshidratación.

3.2.3 Caracterización del color

El color es otra importante propiedad al describir la calidad de un alimento. Es un factor que influye en la aceptación del producto por parte del consumidor y le permite a éste establecer diferencias entre distintas opciones.

Los cambios en este parámetro, pueden desarrollarse durante el procesamiento del alimento por causas físicas o químicas, debido a la concentración de sólidos, a la pérdida de pigmentos o al pardeamiento enzimático de la fruta (Chiralt y Talens 2005).

Existen diferentes tipos de colorímetros y sistemas para el análisis de color. En nuestros ensayos, el sistema seleccionado fue el de colorimetría triestímulo y las mediciones se efectuaron con un colorímetro Minolta CR300. Las coordenadas $L^*a^*b^*$ (CIE 1976) definen un espacio cartesiano en el que L^* representa la luminosidad y a^* y b^* parámetros de cromaticidad (figura 3.3).

Concretamente a^* define el componente rojo-verde; rojo para valores positivos y verde para los negativos y el parámetro b^* define el componente amarillo-azul para valores positivos y negativos respectivamente. Los colores serán tanto más saturados cuanto más separados se encuentren del centro del gráfico los puntos que los definen.

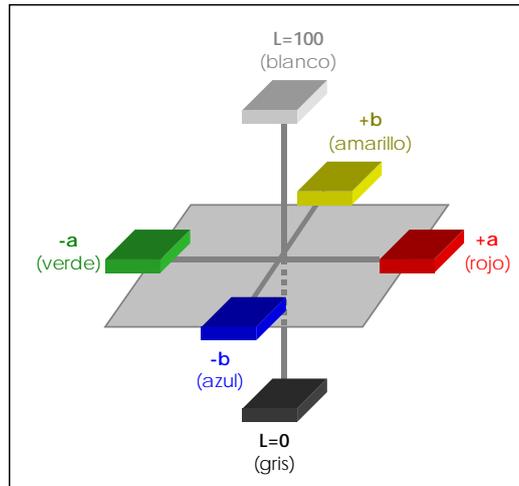


Figura 3.3. Espacio cartesiano $L^*a^*b^*$.

Se llevaron a cabo 15 mediciones para cada tiempo de deshidratación antes y después de la congelación. Los cálculos posteriores se realizaron tomando un promedio de las mismas.

Con los valores medidos se procedió a calcular las diferencias de color ΔL^* , Δa^* y Δb^* mediante las siguientes fórmulas:

$$\Delta L^* = L^* - L^*_r \quad \Delta a^* = a^* - a^*_r \quad \Delta b^* = b^* - b^*_r \quad (3.1)$$

donde r representa el valor medido en la muestra referencia (en nuestro caso la fruta fresca).

Por último se calculó la diferencia de color total definida por la ecuación:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} + \Delta L^{*2}} \quad (3.2)$$

3.2.4 Evaluación del exudado

Uno de las consecuencias más notorias que se producen sobre el alimento durante la congelación se refleja en la pérdida de líquido durante la descongelación. Por ello para evaluar el efecto de un pretratamiento osmótico sobre el exudado, se colocaron piezas de fruta congeladas (15 a 20 gramos aproximadamente) sobre un papel absorbente dentro de recipientes herméticos. Tanto los productos congelados como el papel fueron previamente pesados. Luego se los dejó descongelar en una habitación termostaticada a 20°C. Se realizaron pesadas cada 20 minutos para seguir la cinética de descongelación y se observó que a las 5 horas el exudado alcanzaba un valor máximo y luego se mantenía constante. Por ello se eligió este tiempo para representar los resultados gráficamente. Pasado este período, se pesó nuevamente el papel y se calculó el exudado en base seca de acuerdo a la ecuación:

$$Ex(\%) = \frac{W_t - W_0}{W_m * TS} * 100 \quad (3.3)$$

w₀: peso del papel absorbente seco

w_t: peso del papel absorbente a tiempo t

w_m: peso de la muestra

TS: sólidos totales de la muestra

3.2.5 Cuantificación de ácido ascórbico en kiwis dehidrocongelados

La calidad nutricional de los alimentos se ve afectada significativamente durante un proceso de elaboración. Un ejemplo de ello es el contenido de vitamina C, cuya degradación está asociada a la pérdida de agua, a su vez coligada a las variables del proceso que pueden controlarse. Este efecto ha sido ampliamente estudiado por numerosos autores (Pardio y col. 1994 ; Nunes y col. 1998 ; Torreggiani y Bertolo 2001 ; Uddin y col. 2002; Tudela y col. 2002; Orikasa y col. 2008).

La determinación de ácido ascórbico se efectuó mediante método colorimétrico. Se utilizó un refractómetro Beckman DU 650 y un kit producido por Laboratorios Boehringer Mannheim compuesto de:

- Solución I: Buffer Fosfato de sodio/citrato, pH: 3,5 aproximadamente, MTT (sal de tetrazolio) y estabilizantes.
- Solución II: Solución de PMS (metasulfato 5-metilfenazinio).
- Espátulas de ascorbato oxidasa.

Los kiwis fueron deshidratados con solución de sacarosa de 69°Brix a tres temperaturas (20°C, 30°C y 40°C) y con glucosa, fructosa, sacarosa y AAPM a 30°C y 69°Brix con el fin de observar el efecto de la temperatura y del tipo de soluto, respectivamente, en la pérdida de ascórbico. Luego de ello fueron congelados y mantenidos en freezer a -18°C hasta su uso. Los extractos se prepararon triturando y homogeneizando los kiwis en un omnimixer con ácido metafosfórico (1,5% P/V) con el objeto de estabilizar la muestra diluida. Luego se filtró y se tomó una alícuota del extracto para su posterior análisis.

Todas las determinaciones se realizaron sobre una muestra y un blanco por triplicado.

Se colocó dentro de cada cubeta 1ml de la Solución I, 1,5 ml de agua bidestilada, 0,1 ml de muestra y una espátula de ascorbato oxidasa. Se incubaron durante 6 minutos en estufa a 37°C y luego se midió la absorbancia (A_1) en el refractómetro a 578 nm. Al terminar las mediciones, se agregaron en las mismas cubetas 0,1 ml de la Solución II, se incubaron durante 15 minutos a 37°C y se midió nuevamente la absorbancia (A_2). Con estos valores se determinó la diferencia de absorbancias entre la muestra y el blanco.

$$\Delta A = (A_2 - A_1)_{muestra} - (A_2 - A_1)_{blanco} \quad (3.4)$$

La concentración de ácido ascórbico se calculó mediante la ecuación:

$$c = \frac{V * PM}{\epsilon * d * v * 1000} * \Delta A [g / l] \quad (3.5)$$

V: Volumen final (ml)

v: Volumen de la muestra (ml)

PM: Peso molecular de la sustancia a ensayar (g/mol)

d: camino óptico (cm)

ε: Coeficiente de extinción para el MTT-formazan a 578 nm (l x mmol⁻¹ x cm⁻¹)

Para nuestro caso reemplazando con los valores correspondientes:

$$c = \frac{2,7 * 176,13}{16,9 * 1,0 * 0,1 * 1000} * \Delta A [g / l] = 0,2814 * \Delta A [g \text{ ác.ascórbico} / l_{sol.muestra}] \quad (3.6)$$

Finalmente se determinó el contenido de ácido ascórbico en 100 g de muestra:

$$C = \frac{c [g \text{ ác.ascórbico} / l_{sol.muestra}]}{w_m [g / l_{sol.muestra}]} * 100 [g / 100g] \quad (3.7)$$

donde **w_m** es el peso de muestra utilizada.

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Peras

Las figuras 3.4 y 3.5 presentan los resultados del proceso osmótico, usando discos de pera en diferentes soluciones.

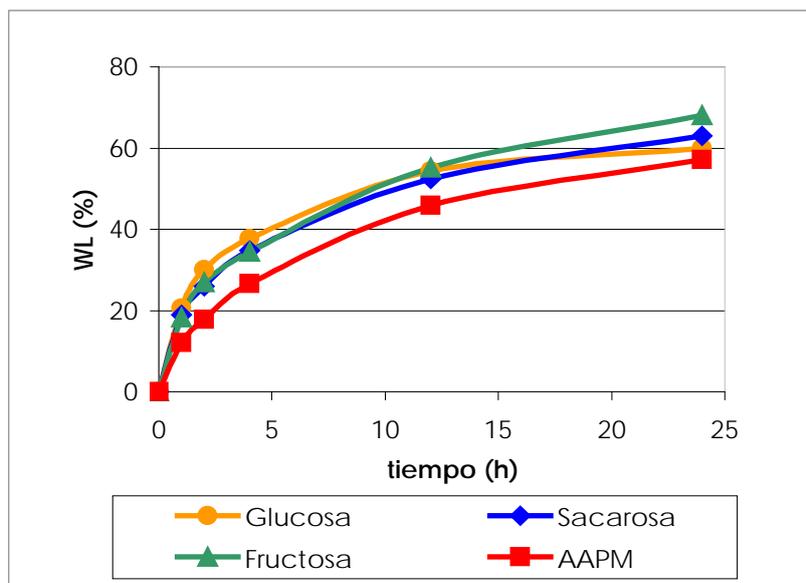


Figura 3.4. Pérdida de agua durante la deshidratación osmótica de discos de pera con soluciones de glucosa, fructosa, sacarosa y AAPM a 69°Brix y 30°C.

La velocidad de WL desde los tejidos (fig. 3.4) fue rápida con las soluciones de glucosa, sacarosa y fructosa. Como se mencionó en el capítulo anterior, esto concuerda con el hecho que dichas soluciones contienen total o parcialmente azúcares de bajo peso molecular (por ejemplo el jarabe de fructosa contiene 52% de monosacáridos) lo cual produce un aumento en la presión osmótica, favoreciendo la deshidratación. En oposición, el proceso fue lento con solución de AAPM (azúcares de alto peso molecular), pero siempre en ascenso.

A las 24 horas, la WL con solución de glucosa alcanzó su máximo valor, mientras que para las otras soluciones continuó incrementándose.

Las curvas de SG (fig. 3.5) también son consistentes con los pesos moleculares de los solutos (a menor tamaño de molécula, mayor difusividad efectiva del soluto). La incorporación de azúcar en la muestra fue significativamente más elevada con la glucosa a tiempos prolongados de inmersión.

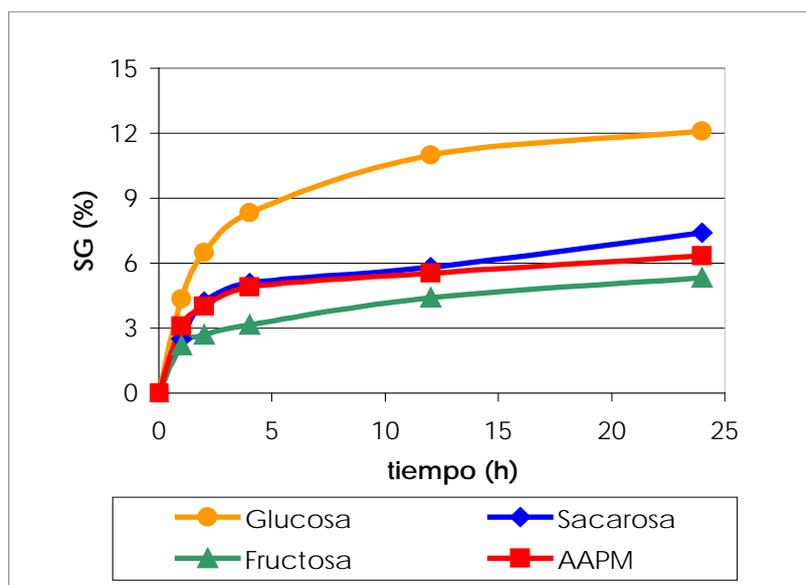


Figura 3.5. Ganancia de sólidos durante la deshidratación osmótica de discos de pera con soluciones de glucosa, fructosa, sacarosa y AAPM a 69°Brix y 30°C.

De lo expuesto anteriormente se puede concluir que las soluciones de sacarosa y fructosa arrojaron los mejores resultados, ya que con ellas se alcanzó una elevada deshidratación con una mínima penetración de sólidos.

Los datos de exudado obtenidos durante la descongelación de las muestras frescas congeladas (blanco) y deshidratadas – congeladas se exponen en la tabla 5 del Apéndice. En la figura 3.6 se reportan los valores normalizados respecto al blanco.

Se observó un descenso progresivo del exudado en función del tiempo de deshidratación osmótica. Este descenso es tan marcado que aun cortos tiempos de pretratamiento arrojaron valores inferiores al 50% respecto al blanco.

Esto podría ocurrir por la elevada deshidratación que se produjo con todas las soluciones, que condujo a un menor contenido de agua y a una consecuente disminución en el daño celular durante la etapa de congelación.

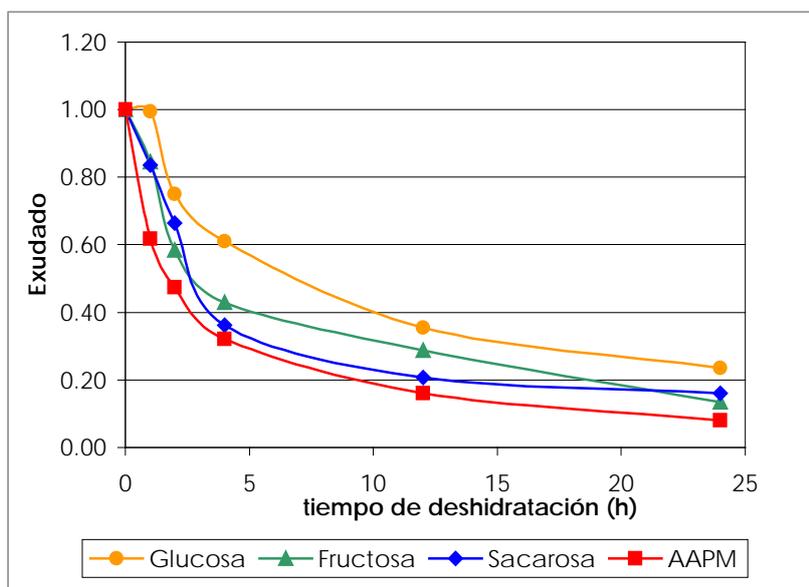


Figura 3.6. Exudado durante la descongelación de discos de pera frescos y tratados con soluciones de glucosa, fructosa, sacarosa y AAPM a 69°Brix y 30°C.

Los resultados del test de penetrometría de las muestras frescas (blanco) y tratadas, antes y después de la congelación se muestran en la figura 3.7 y en la tabla 9 del Apéndice. En el gráfico, los valores de textura obtenidos (F), fueron normalizados con los correspondientes al blanco (F_0). Hasta las 4 horas de tratamiento, la DO no afectó la textura de las muestras, excepto para aquellas tratadas con solución de sacarosa, las que presentaron un rápido y progresivo descenso en la fuerza de penetración. Los datos correspondientes a largos períodos de deshidratación no se pudieron medir ya que las muestras presentaron cambios irreversibles en las características texturales (aspecto gomoso). De acuerdo a Krokida y col. (2000b) y Chiralt y Talens (2005) esto es ocasionado por la difusión de azúcar desde la solución que tiene lugar durante el pretratamiento osmótico, que causa un incremento en la plasticidad en la estructura de la fruta.

La DO previa a la congelación no resultó beneficiosa en lo que respecta a la textura. Las muestras sufrieron el mismo deterioro estuvieran deshidratadas o no (la pérdida de firmeza fue mayor al 60%).

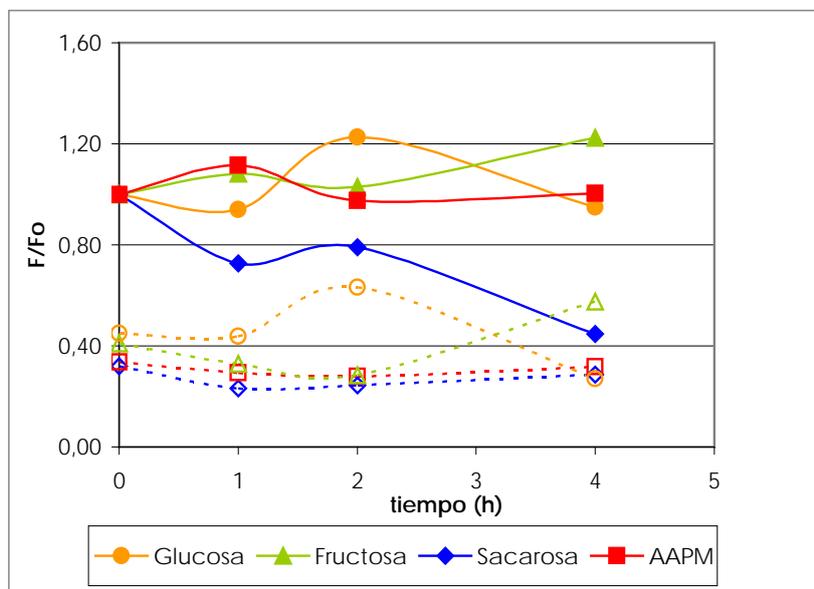


Figura 3.7. Ensayo de textura de muestras tratadas con diferentes soluciones, normalizado con los correspondientes valores de la muestra fresca, antes (líneas continuas y símbolos llenos) y después (líneas discontinuas y símbolos huecos) de la congelación.

En las figuras 3.8 y 3.9 se presentan los parámetros de color L^* , a^* y b^* y la diferencia de color ΔE^* respectivamente. Sus valores se exponen con mayor detalle en las tablas 13 a 16 del Apéndice. Se puede destacar que durante la etapa de DO no hubo cambios significativos. El pequeño incremento de b^* en función del tiempo de deshidratación (fig. 3.8) indicó una leve tonalidad parda de las muestras, lo cual quedó confirmado con el cálculo de la diferencia total de color ΔE^* (Krokida y col. 2000 a) (fig. 3.9).

La conservación de la calidad en el color de las peras deshidratadas se debió a las condiciones poco desnaturalizantes con las que se trabajó (temperaturas moderadas de 30°C) y al efecto protector de la solución que limita las reacciones de oxidación al evitar el contacto de la fruta con el oxígeno (Raoult-Wack 1994; Waliszewski y col. 1999).

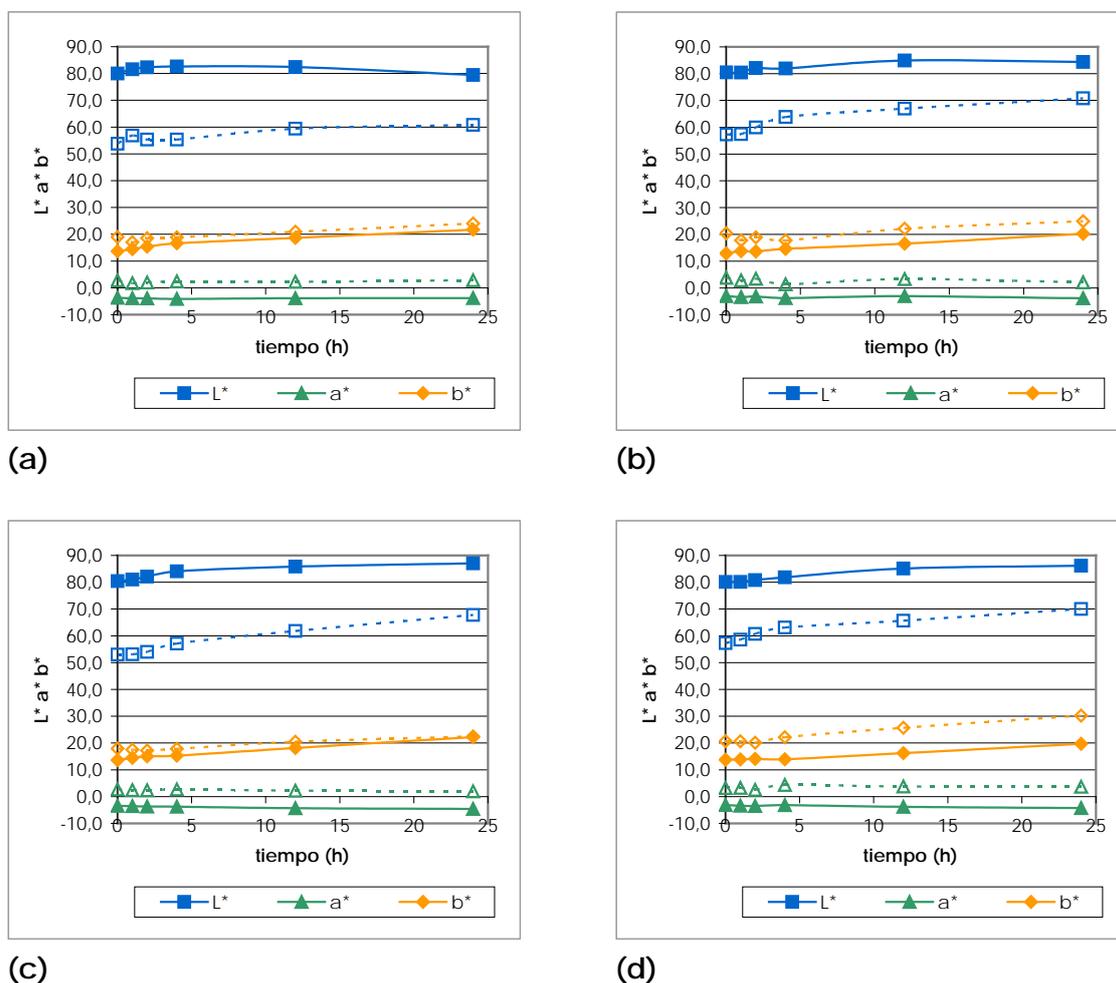
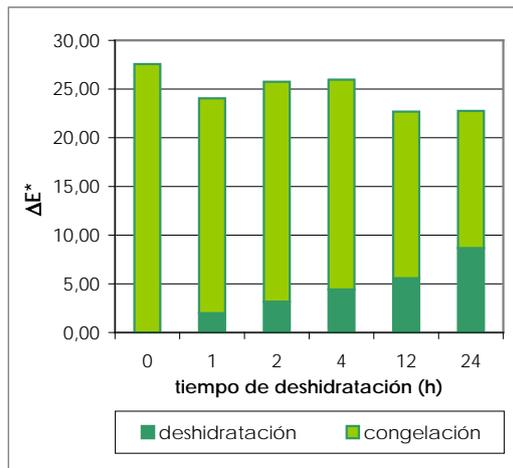
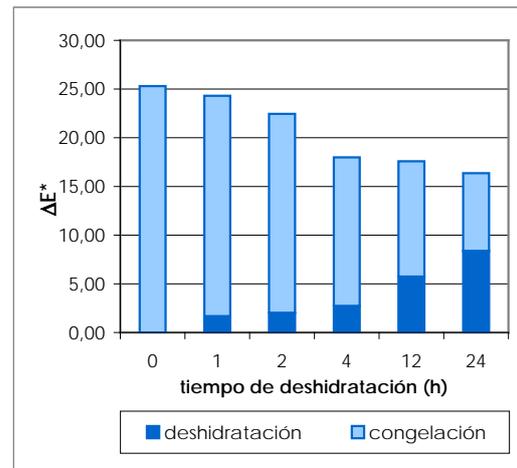


Figura 3.8. Parámetros de color $L^*a^*b^*$ determinados sobre discos de pera deshidratados con distintas soluciones (líneas continuas y símbolos llenos): **(a)** glucosa; **(b)** sacarosa; **(c)** fructosa y **(d)** AAPM y congelados-descongelados (líneas discontinuas y símbolos huecos).

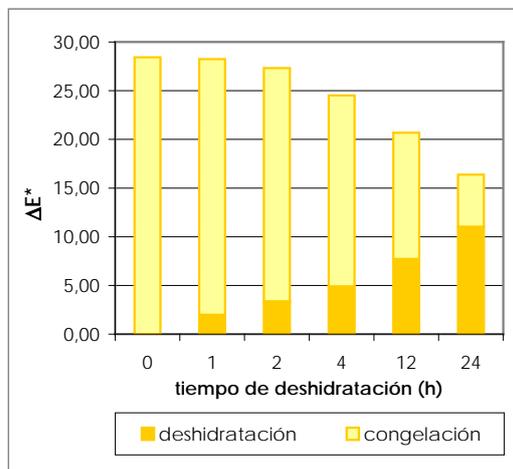
Luego de la congelación y descongelación los discos de pera, presentaron un marcado descenso en L^* y un aumento en b^* , revelando un importante pardeamiento. Sin embargo, el pretratamiento osmótico al disminuir el contenido de agua y aumentar la cantidad de sólidos, tuvo un efecto favorable, ya que el oscurecimiento de las muestras decreció en función del tiempo de deshidratación (fig. 3.9).



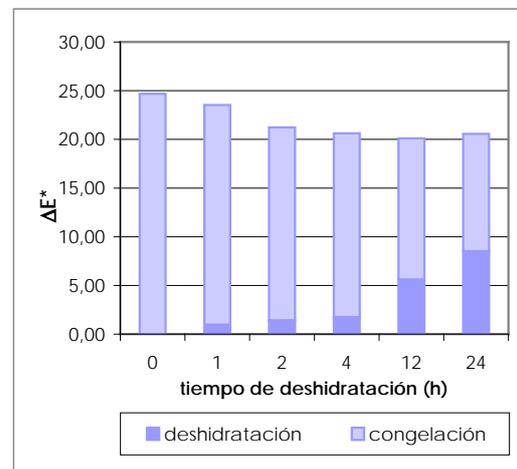
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.9. Diferencia total de color ΔE^* para discos de peras deshidratados con distintas soluciones: **(a)** glucosa; **(b)** sacarosa; **(c)** fructosa y **(d)** AAPM y congelados - descongelados.

3.3.2 Frutillas

La evolución de la pérdida de agua (figura 3.10) fue consistente con los pesos moleculares de los solutos utilizados, pero en ninguno de los casos se alcanzó un valor máximo.

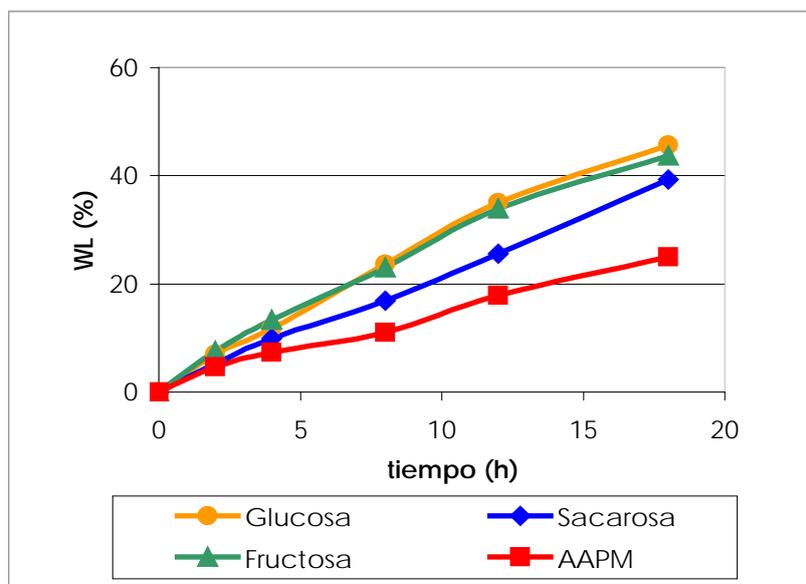


Figura 3.10. Pérdida de agua durante la deshidratación osmótica de frutillas con soluciones de glucosa, fructosa, sacarosa y AAPM a 69°Brix y 30°C.

Al utilizar las frutillas enteras y no en piezas cortadas como el resto de las frutas, la piel hizo de resistencia a la transferencia de materia y por esta razón la velocidad de WL fue mucho más lenta. Esto fue verificado por Spiazzi y Mascheroni, (1995), quienes presentaron los resultados de la DO para frutillas enteras y en mitades. La resistencia de la piel también podría explicar el comportamiento atípico de las curvas de SG (fig. 3.11).

Para cortos tiempos de inmersión, la ganancia de sólidos fue significativamente más alta en las muestras tratadas con AAPM y fructosa, es decir con las soluciones que contienen solutos de mayor peso molecular, mientras que con sacarosa y glucosa (con un contenido de azúcares de bajo peso molecular), se obtuvo una lenta velocidad de penetración. Las muestras tratadas con solución de AAPM alcanzaron rápidamente un valor máximo,

pero bajo en comparación a los conseguidos por el resto de las soluciones para un mismo tiempo de inmersión.

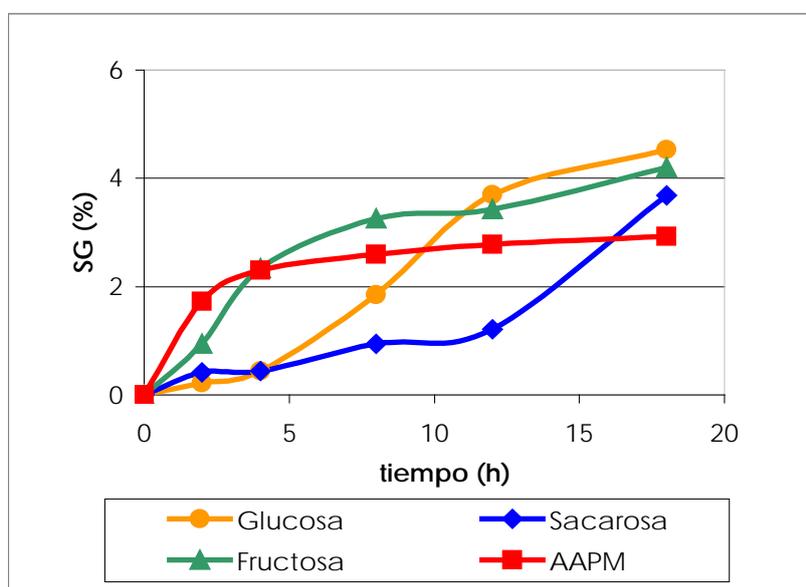


Figura 3.11. Ganancia de sólidos durante la deshidratación osmótica de frutillas con soluciones de glucosa, fructosa, sacarosa y AAPM a 69°Brix y 30°C.

Los valores de exudado durante la descongelación de las frutillas (tabla 6 del Apéndice y figura 3.12) fueron normalizados con los correspondientes a la fruta no tratada congelada (blanco). Puede notarse que los perfiles conseguidos para las frutillas difieren completamente con los de las otras frutas. Las muestras tratadas hasta 4 horas presentaron un incremento en el exudado respecto al blanco, salvo aquellas deshidratadas con solución de AAPM. Luego de alcanzar un máximo, el exudado disminuyó abruptamente hasta adquirir valores por debajo del 50% del blanco.

Podría decirse que en las primeras horas de deshidratación se produciría el colapso de la estructura o pared celular, cuando aún la frutilla posee un elevado contenido de agua, lo que originó este incremento de exudado.

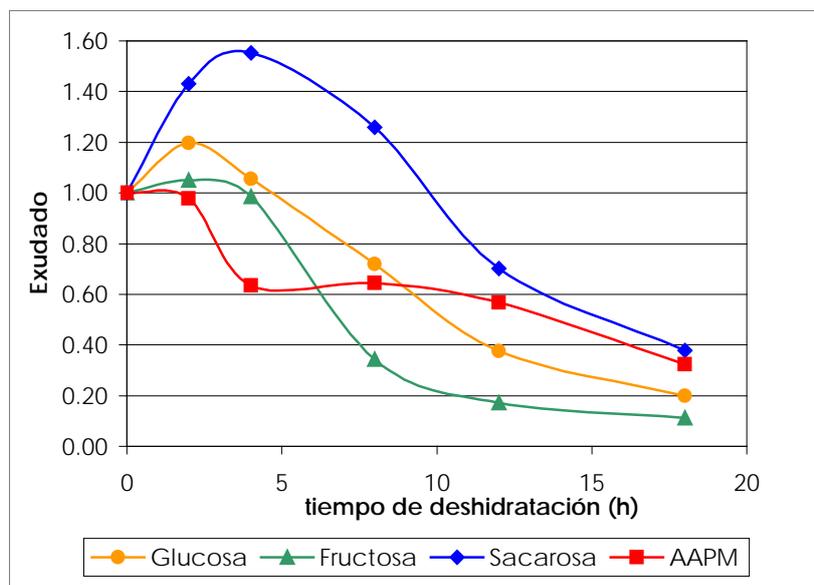


Figura 3.12. Exudado durante la descongelación de frutillas enteras frescas y tratadas con soluciones de glucosa, fructosa, sacarosa y AAPM a 69°Brix y 30°C.

En la figura 3.13 se exponen los resultados del test de penetrometría para las frutillas frescas (blanco) y deshidratadas, antes y después de la congelación. Al igual que para las peras, los valores se encuentran normalizados con los correspondientes a la fruta fresca. Como complemento se dan todos sus valores en la tabla 10 del Apéndice. Un descenso en la fuerza de penetración de casi el 50% respecto al blanco fue evidente en las primeras horas de DO. Luego, para tiempos prolongados de tratamiento, permaneció casi constante sin importar el tipo de soluto utilizado. El “ablandamiento” rápido sufrido al comienzo de la DO, fue ocasionado por la deshidratación superficial de la fruta, permaneciendo prácticamente invariable en el tiempo por el hecho que el test de penetrometría mide la resistencia de las capas superficiales que fueron las afectadas desde el inicio. Los valores de textura luego de la congelación – descongelación presentaron un descenso sin importar el tratamiento previo. De cualquier modo, el mayor deterioro ocurrió durante la DO, donde el daño en la estructura (pérdida de firmeza) a causa del encogimiento fue marcado (fig. 3.13).

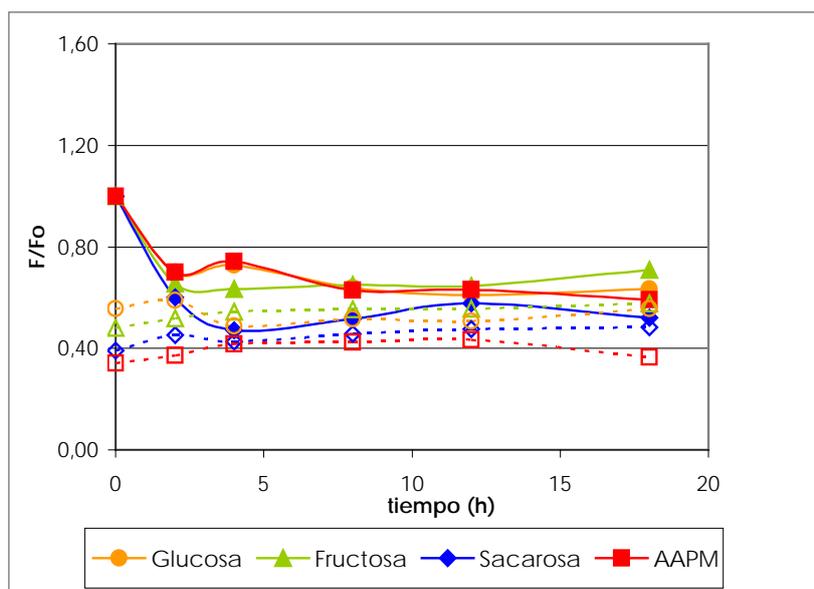


Figura 3.13. Ensayo de textura de muestras tratadas con diferentes soluciones, normalizado con los correspondientes valores de la muestra fresca, antes (líneas continuas y símbolos llenos) y después (líneas discontinuas y símbolos huecos) de la congelación.

Los resultados de las mediciones de color (L^* , a^* , b^* y ΔE^*) se exponen en las tablas 17 a 20 del Apéndice y en las figuras 3.14 y 3.15. Durante la etapa de deshidratación no se originaron cambios drásticos en la coloración. Igualmente, se puede observar en la figura 3.15 una pequeña variación (diferencia total de color ΔE^*) que demuestra una dependencia entre los cambios ocurridos y los agentes deshidratantes utilizados. Las soluciones de glucosa, fructosa y sacarosa ocasionaron una menor pérdida de color, mientras que las frutillas tratadas con AAPM mostraron un descenso en los parámetros a^* y b^* (fig. 3.14 d).

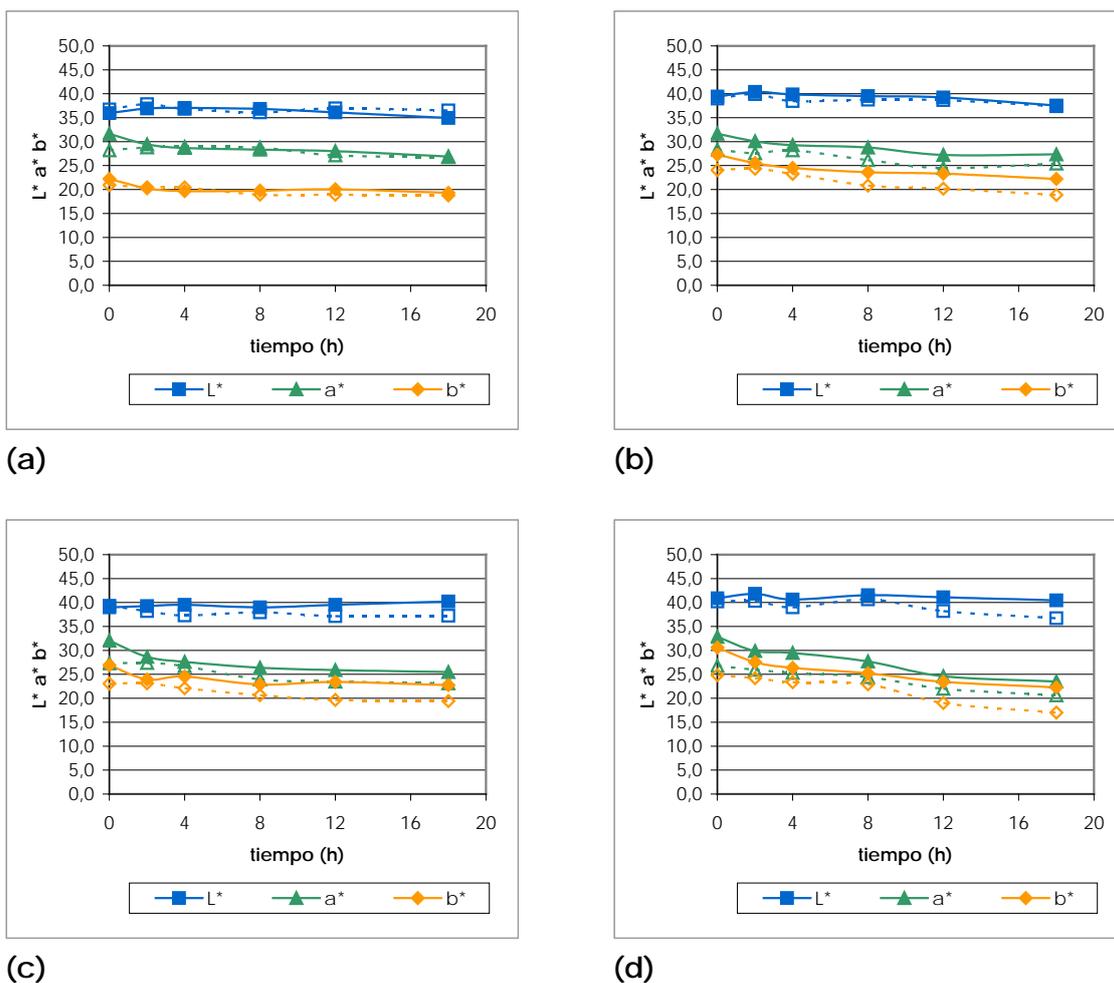


Figura 3.14. Parámetros de color $L^*a^*b^*$ determinados sobre frutillas enteras deshidratadas con distintas soluciones (líneas continuas y símbolos llenos): **(a)** glucosa; **(b)** sacarosa; **(c)** fructosa y **(d)** AAPM y congeladas-descongeladas (líneas discontinuas y símbolos huecos).

El efecto dañino de la congelación sobre el color fue aún inferior al de la DO. De las figuras 3.14 y 3.15 se puede destacar que el deterioro más significativo fue sufrido por las frutillas tratadas con solución de AAPM para tiempos prolongados de inmersión, en los cuales el descenso de los parámetros a^* y b^* denotaron la pérdida de antocianina (pigmento rojo). Los mejores resultados se obtuvieron con la solución de glucosa, donde el daño por la congelación posterior fue casi imperceptible.

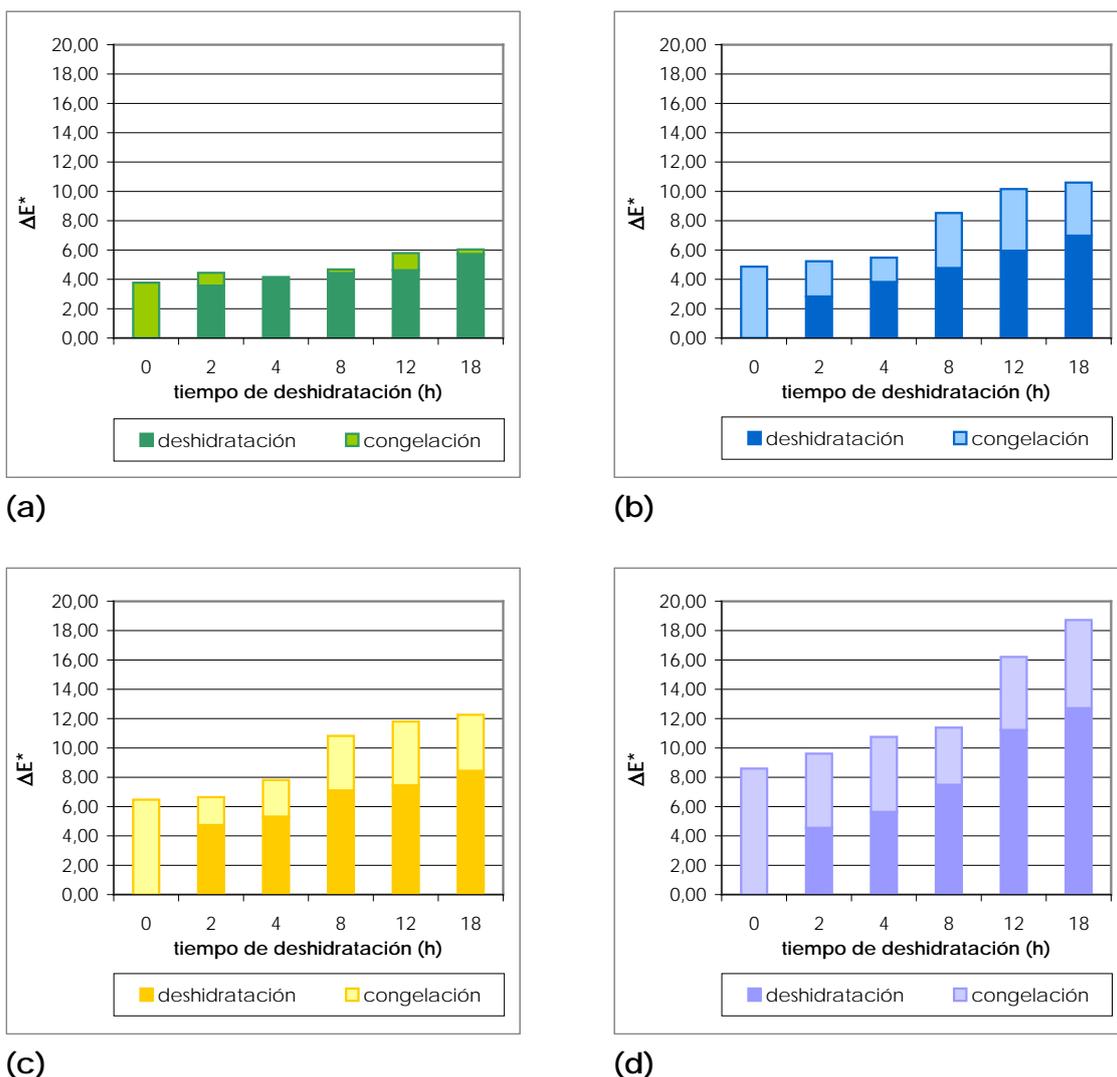


Figura 3.15. Diferencia total de color ΔE^* para frutillas enteras deshidratadas con distintas soluciones: **(a)** glucosa; **(b)** sacarosa; **(c)** fructosa y **(d)** AAPM y congeladas - descongeladas.

3.3.3 Kiwis

Los resultados del proceso osmótico de discos de kiwi en diferentes soluciones son presentados en las figuras 3.16 y 3.17.

Tanto la pérdida de agua como la ganancia de solutos mostraron un comportamiento similar al obtenido con los discos de peras. Las diferencias a destacar son que la WL a las 24 horas de tratamiento continuó incrementándose y no llegó a un máximo con ninguna de las soluciones (las

peras lo hicieron con la glucosa) y la SG llegó rápidamente a un "plateau" para las muestras tratadas con soluciones de fructosa, sacarosa y AAPM.

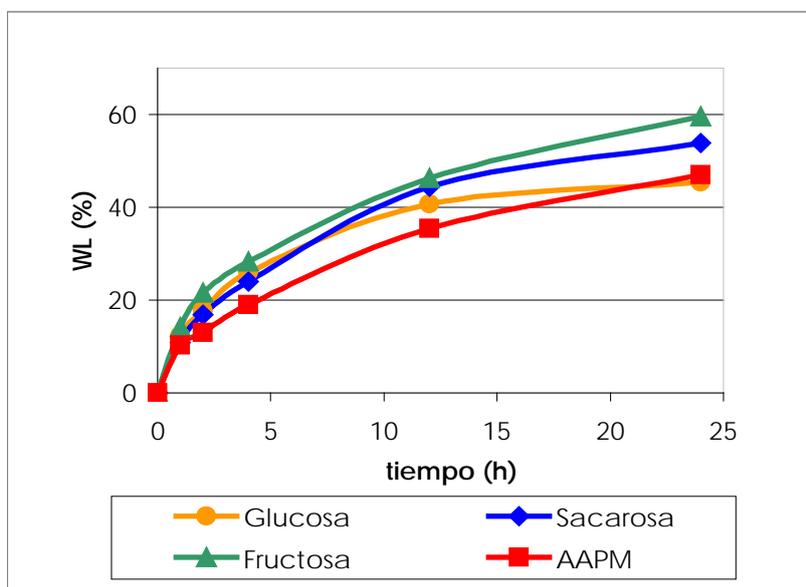


Figura 3.16. Pérdida de agua durante la deshidratación osmótica de discos de kiwi con soluciones de glucosa, fructosa, sacarosa y AAPM a 69°Brix y 30°C.

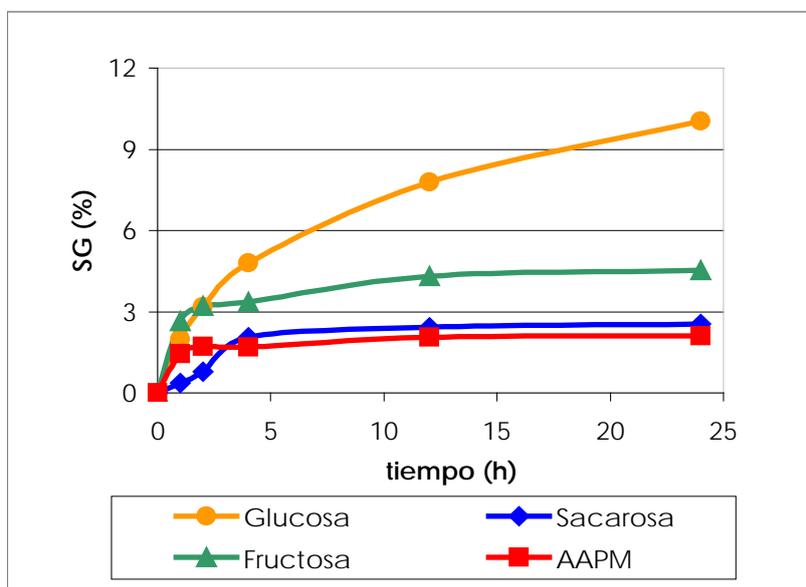


Figura 3.17. Ganancia de sólidos durante la deshidratación osmótica de discos de kiwi con soluciones de glucosa, fructosa, sacarosa y AAPM a 69°Brix y 30°C.

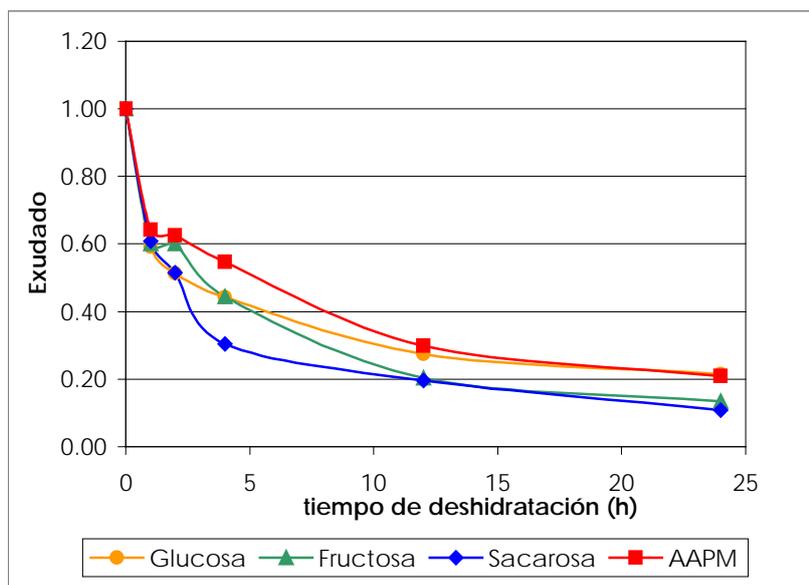


Figura 3.18. Exudado durante la descongelación de discos de kiwi frescos y tratados con soluciones de glucosa, fructosa, sacarosa y AAPM a 69°Brix y 30°C.

En la tabla 7 del Apéndice y en la figura 3.18 se presentan los resultados de las experiencias de exudado, obtenidos durante la descongelación de rodajas de kiwi tratadas osmóticamente y luego congeladas. En el gráfico, los valores fueron normalizados con los correspondientes a las muestras frescas congeladas (blanco). Los discos de kiwi exhibieron un constante descenso del exudado en función del tiempo de deshidratación, alcanzando valores inferiores al blanco con las primeras horas de pretratamiento. También se observó la existencia de una dependencia entre el soluto utilizado, la cantidad de WL lograda durante la DO y el descenso en los valores de exudado.

La datos de textura de las muestras tratadas (normalizados con los valores correspondientes a las muestras frescas), medidos antes y después de la congelación se muestran en la figura 3.19 y tabla 11 del Apéndice. Se representaron los datos obtenidos hasta las 4 horas de tratamiento ya que a tiempos prolongados, se hizo difícil obtener resultados comparables de textura debido a la pérdida de firmeza sufrida por las muestras.

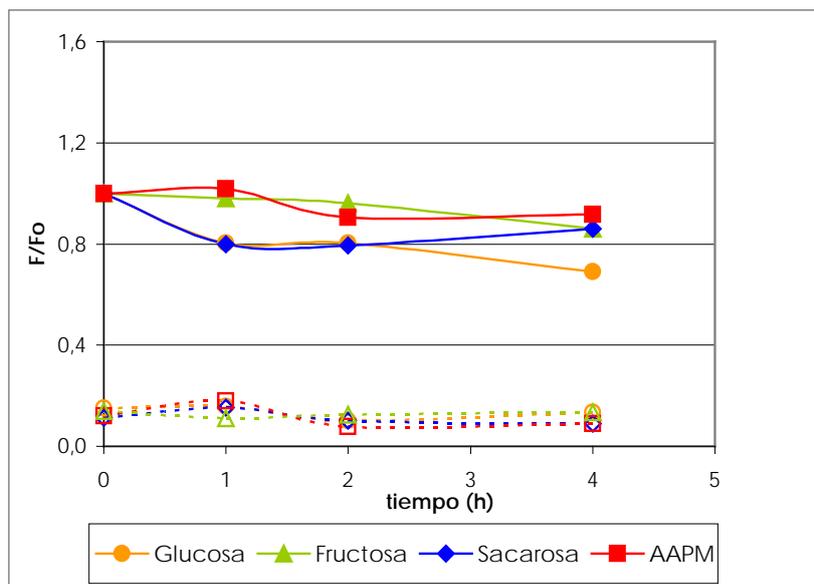


Figura 3.19. Ensayo de textura de muestras tratadas con diferentes soluciones, normalizado con los correspondientes valores de la muestra fresca, antes (líneas continuas y símbolos llenos) y después (líneas discontinuas y símbolos huecos) de la congelación.

Un descenso en la fuerza de penetración del orden del 20% fue evidente en las muestras deshidratadas, principalmente con solución de glucosa. Comparando con las otras frutas, los kiwis junto con las manzanas fueron los que menos afectados resultaron en el tratamiento osmótico a tiempos cortos de procesamiento. Luego de la congelación y descongelación, sin importar la solución utilizada ni el tiempo de tratamiento, la textura de los discos de kiwi fue extremadamente baja tanto para las frescas como las deshidratadas. Este resultado, concuerda con los obtenidos por Robbers y col. (1997) y Talens y col. 2002b, pudiendo atribuírselo a la formación de cristales durante la congelación que dañarían la pared celular.

Las mediciones de color de los productos frescos y deshidratados antes y después de la congelación se muestran en las figuras 3.20 y 3.21 y en las tablas 21 a 24 del Apéndice.

No se encontraron cambios drásticos en la coloración de los kiwis durante la etapa de deshidratación a tiempos cortos de tratamiento, principalmente con el uso de glucosa y fructosa como soluciones

deshidratantes. Pequeñas variaciones en los parámetros L^* y b^* (tenue oscurecimiento de la muestra) se presentaron a tiempos prolongados de inmersión, principalmente en las muestras tratadas con soluciones de sacarosa y AAPM, lo cual se confirma en la figura 3.21 (diferencia total de color ΔE^*), que demuestra que las desviaciones son dependientes del agente utilizado.

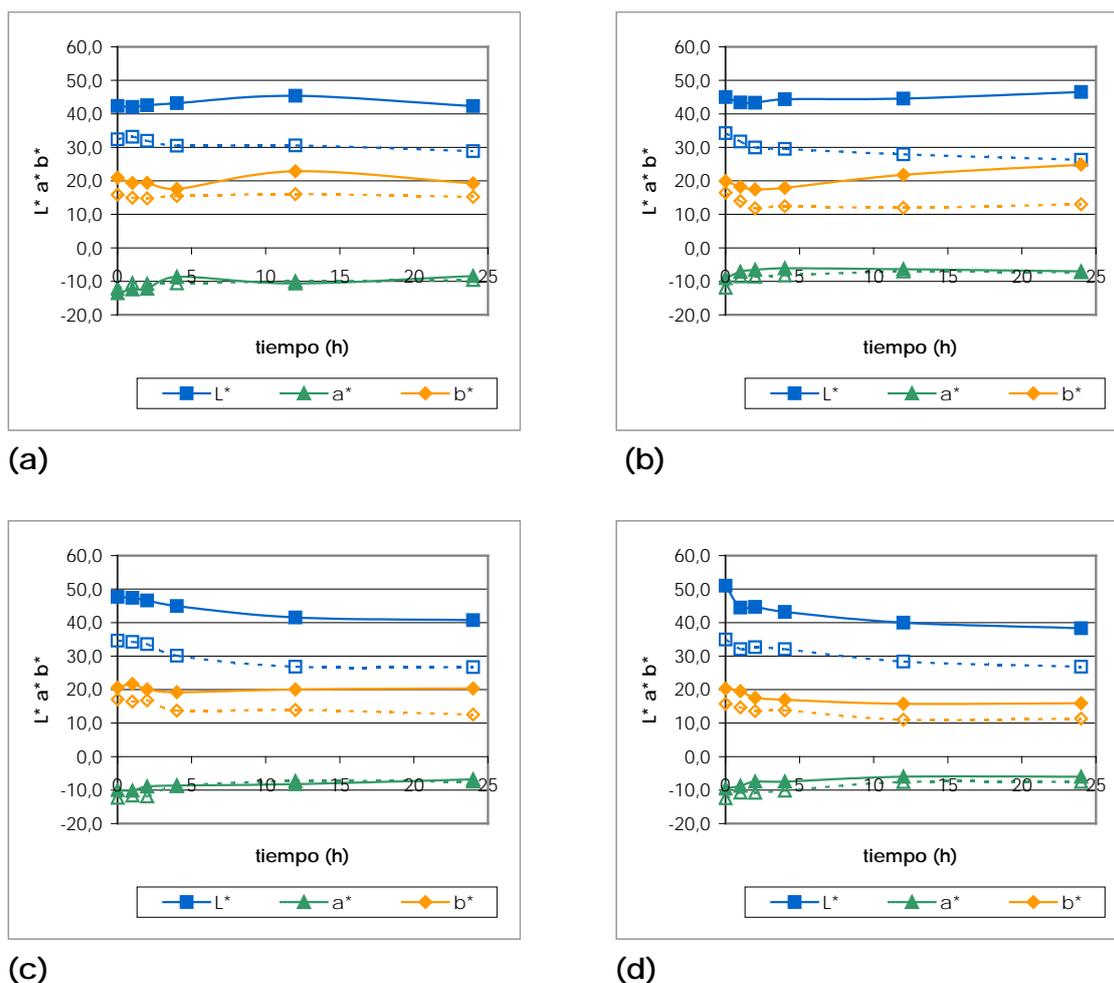


Figura 3.20. Parámetros de color $L^*a^*b^*$ determinados sobre discos de kiwi deshidratados con distintas soluciones (líneas continuas y símbolos llenos): **(a)** glucosa; **(b)** sacarosa; **(c)** fructosa y **(d)** AAPM y congelados-descongelados (líneas discontinuas y símbolos huecos).

Luego de la congelación-descongelación, los datos de las experiencias revelaron importantes diferencias. Para todas las muestras hubo un descenso en los parámetros L^* , a^* y b^* respecto a la deshidratación. Estas variaciones

indicaron un cambio en la coloración de los kiwis que viró de verde claro a oscuro. La figura 3.21 presenta la diferencia de color ΔE^* de las muestras congeladas - descongeladas. Nuevamente se observó una dependencia con el tipo de soluto empleado. Las muestras pretratadas con glucosa fueron las que tuvieron una mejor conservación del color.

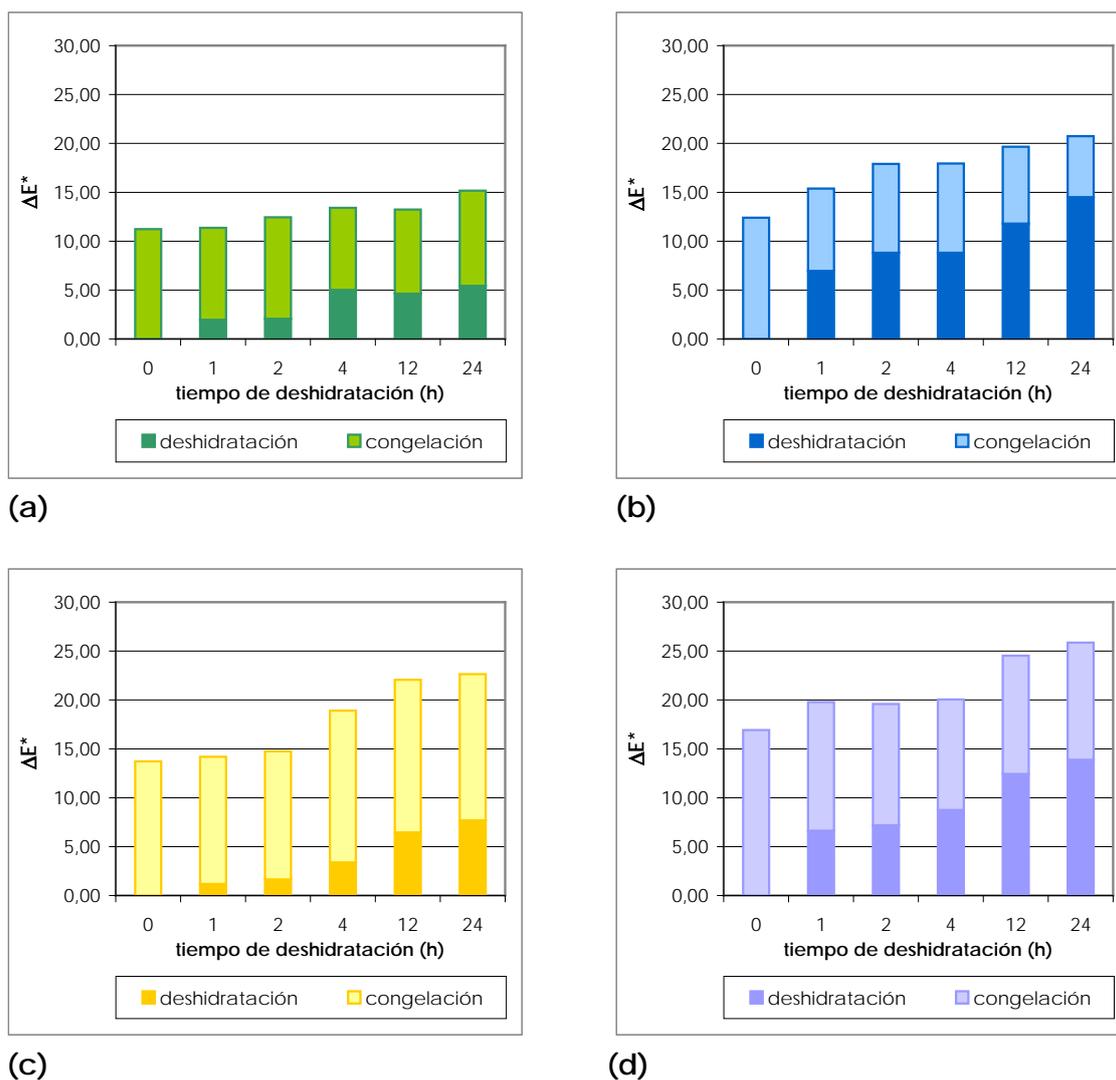


Figura 3.21. Diferencia total de color ΔE^* para discos de kiwi deshidratados con distintas soluciones: **(a)** glucosa; **(b)** sacarosa; **(c)** fructosa y **(d)** AAPM y congelados - descongelados.

El color verde esmeralda distintivo del kiwi maduro se debe a la clorofila. La fruta se caracteriza por tener altos niveles de ácido ascórbico y bajos

niveles de taninos y polifenoles y actividad relativamente baja de polifenoloxidasas. Esta combinación de características son causantes de la ausencia de oxidación y por lo tanto el pardeamiento enzimático no es problema. En el procesamiento de alimentos con clorofila, la principal causa de deterioro es la degradación de clorofila en feofitinas (pigmento café claro) (Hohlberg y Aguilera 1988). Este podría ser el fundamento del cambio de color que sufrieron los kiwis, principalmente luego de la congelación.

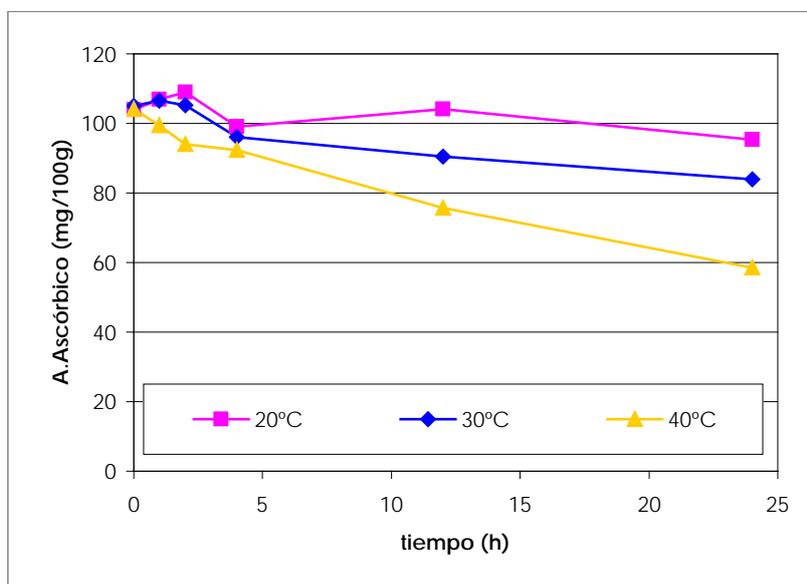


Figura 3.22. Efecto de la temperatura en el contenido de ácido ascórbico durante la deshidratación osmótica de discos de kiwi, con solución de sacarosa.

La evolución del ácido ascórbico residual, durante la deshidratación osmótica de los discos de kiwi, como una función de dos variables del sistema (temperatura y composición de la solución), fue analizada. Los resultados conseguidos en las experiencias realizadas a tres temperaturas (20°, 30° y 40°C) con solución de sacarosa a 69°Brix se dan en la figura 3.22. Mientras en la figura 3.23 se presenta la deshidratación con cuatro soluciones (sacarosa, glucosa, AAPM y fructosa) a 69°Brix y 30°C. En ambos casos se puede observar una disminución en el contenido de vitamina C en función del tiempo, pero, el efecto de la temperatura parecería ser más importante que el tipo de soluto utilizado.

La pérdida del ácido ascórbico podría deberse a dos fenómenos: por un lado, a la difusión del ácido desde la fruta a la solución deshidratante, y por otro, a la degradación química (Vial y col. 1991).

De la figura 3.22 podemos decir que cuando la temperatura es baja, suponemos que la pérdida fue debida al proceso de difusión. Mientras que a temperaturas elevadas (40°C) en donde el descenso es de casi el 50%, el deterioro químico, además de la difusión, parecería ser el fenómeno más significativo (Vial y col. 1991; Torreggiani y Bertolo 2001).

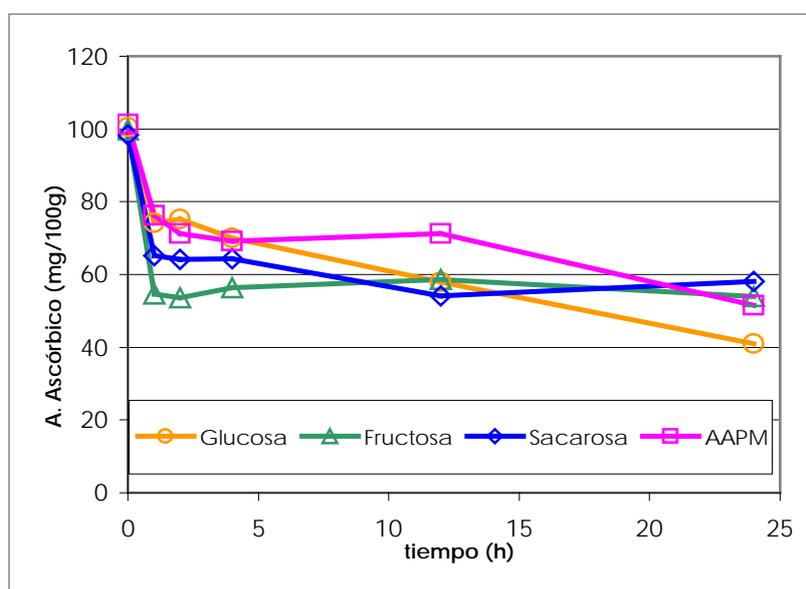


Figura 3.23. Efecto del tipo de soluto en el contenido de ácido ascórbico durante la deshidratación osmótica de discos de kiwi a 30°C.

La disminución en el contenido de ácido ascórbico es casi idéntica para el tratamiento con diferentes soluciones. En las primeras dos horas hubo una caída abrupta en su contenido llegando prácticamente a la mitad de su valor inicial. Posteriormente alcanzó un "plateau" con todas las soluciones, a excepción de la glucosa en la cual las muestras presentaron un descenso continuo de ascórbico.

Se debe destacar cierta discrepancia en la cinética de pérdida de ascórbico entre las figuras 3.22 y 3.23 para las muestras tratadas con solución de sacarosa a 30°C. Si bien las muestras pertenecían a la misma variedad y

presentaban un grado de madurez y un contenido de ascórbico inicial similares, el origen de las partidas diferían. El efecto de la temperatura se estudió con muestras provenientes de quintas de la zona de La Plata (cosecha abril - mayo), mientras que las experiencias con las diferentes soluciones se realizaron con kiwis procedentes de Chile (meses de junio y julio).

3.3.4 Manzanas

Las figuras 3.24 y 3.25 presentan los resultados de la deshidratación osmótica de cubos de manzana en diferentes soluciones osmóticas.

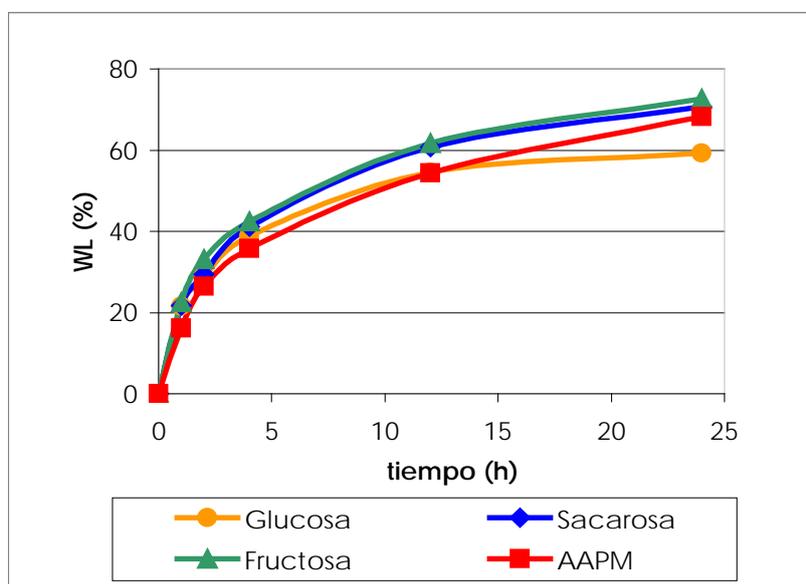


Figura 3.24. Pérdida de agua durante la deshidratación osmótica de cubos de manzana con soluciones de glucosa, fructosa, sacarosa y AAPM a 69°Brix y 30°C.

La pérdida de agua y ganancia de sólidos siguieron, cualitativamente la misma tendencia encontrada en los kiwis pero, en este caso, la velocidad del proceso fue elevada. Esto puede atribuirse a las diferencias en forma, tamaño y estructura celular entre los discos de kiwi y los cubos de manzana.

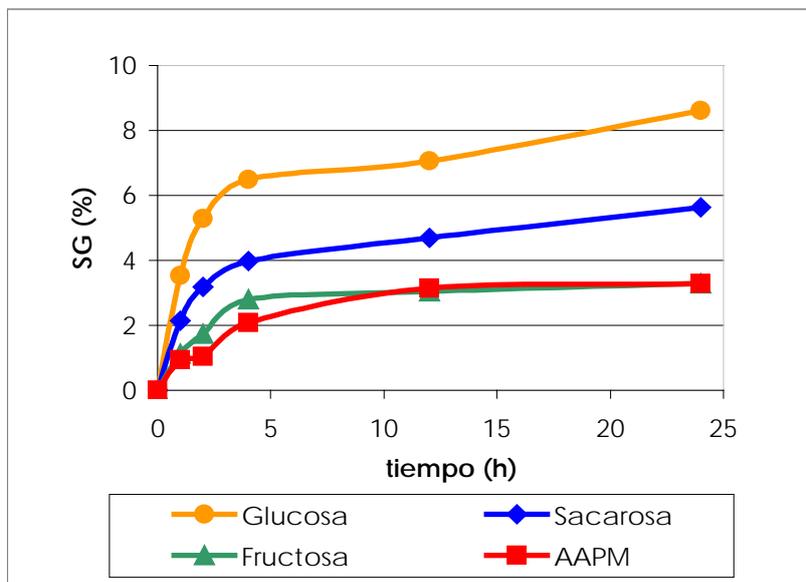


Figura 3.25. Ganancia de sólidos durante la deshidratación osmótica de cubos de manzana con soluciones de glucosa, fructosa, sacarosa y AAPM a 69°Brix y 30°C.

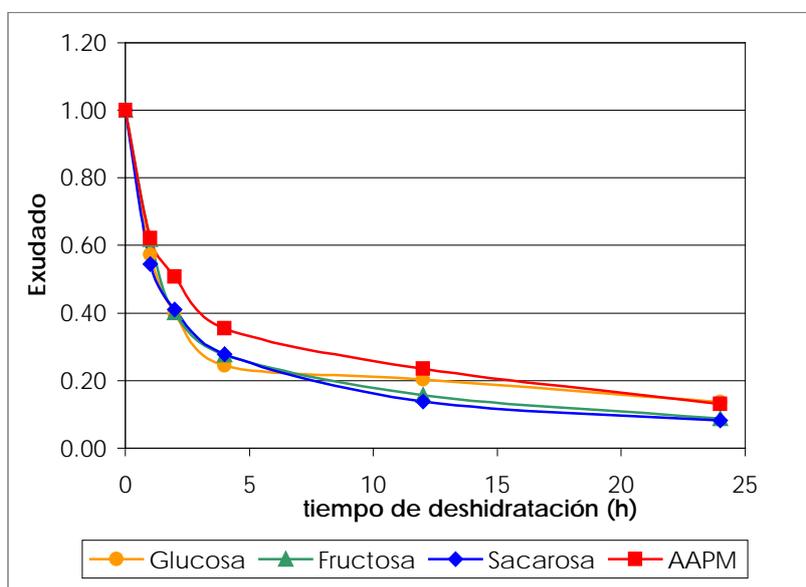


Figura 3.26. Exudado durante la descongelación de cubos de manzana frescos y tratados con soluciones de glucosa, fructosa, sacarosa y AAPM a 69°Brix y 30°C.

El exudado de las muestras frescas y deshidratadas puede observarse en la figura 3.26 (valores normalizados respecto al blanco) y en la tabla 8 del

Apéndice. Los cubos de manzanas deshidratados presentaron un menor exudado respecto al blanco, al igual que los discos de kiwi y pera, pero en este caso, el descenso se produjo a mayor velocidad, lo cual coincide con la cinética de WL.

Los ensayos de textura (figura 3.27 y tabla 12 del Apéndice) revelaron un moderado endurecimiento de las muestras para cortos tiempos de deshidratación. Mientras que largos períodos de inmersión, junto a la incorporación de azúcar en la muestra, provocaron un cambio irreversible en las características estructurales de un modo similar al observado en las peras, presentando un aspecto semigomoso (Krokida y col. 2000a) motivo por el cual no fueron graficadas. La etapa de congelación redujo la textura de las manzanas. No obstante, este descenso fue menor al observado en el resto de las frutas estudiadas. Las muestras pretratadas osmóticamente exhibieron una textura similar a las frescas congeladas.

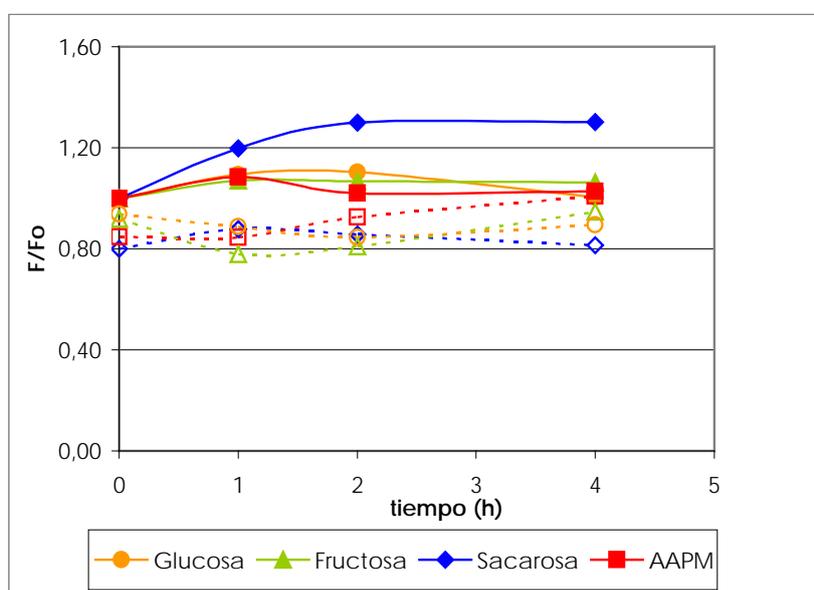


Figura 3.27. Ensayo de textura de muestras tratadas con diferentes soluciones, normalizado con los correspondientes valores de la muestra fresca, antes (líneas continuas y símbolos llenos) y después (líneas discontinuas y símbolos huecos) de la congelación.

En las tablas 25 a 28 del Apéndice y en las figuras 3.28 y 3.29 se muestran las mediciones de color obtenidas antes y después de la congelación. Durante

la etapa de deshidratación no se evidenciaron cambios significativos (Krokida y col. 2000b). Luego de la congelación se observó un marcado descenso de L^* (fig. 3.28) y un aumento drástico en los restantes parámetros, revelando un color pardo considerable. Sin embargo, este disminuyó en función del tiempo de inmersión durante la deshidratación (Krokida y col. 2000b), mostrando un efecto favorable del pretratamiento osmótico. Prácticamente no se evidenció una dependencia con el tipo de soluto utilizado (fig. 3.29).

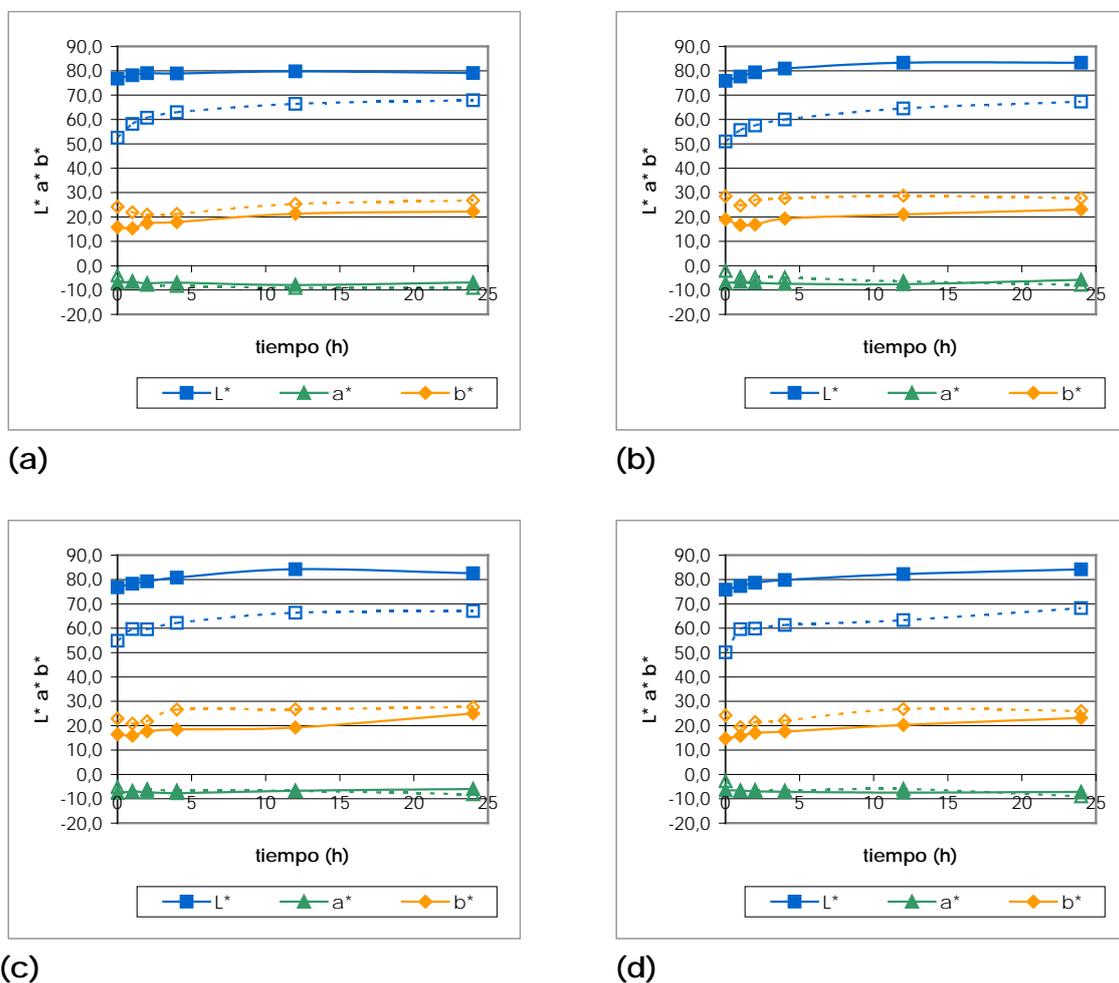
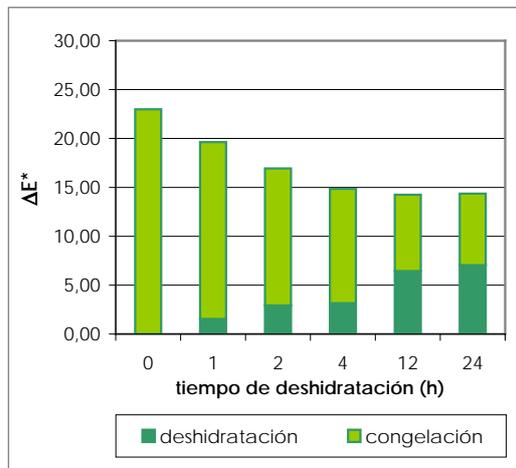
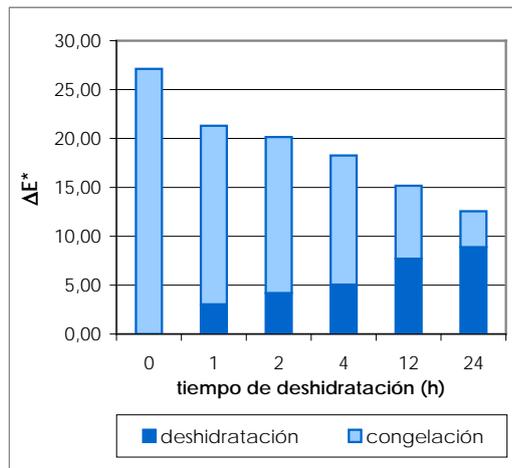


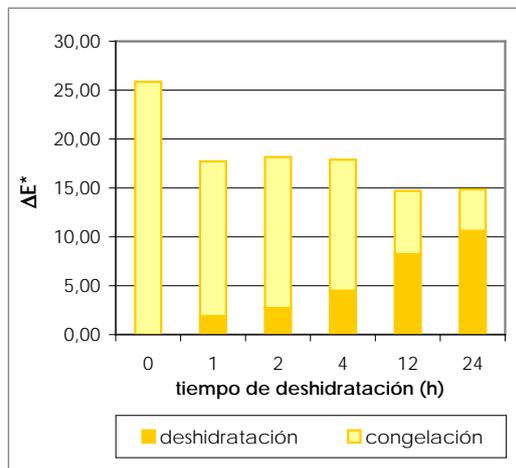
Figura 3.28. Parámetros de color $L^*a^*b^*$ determinados sobre cubos de manzana deshidratados con distintas soluciones (líneas continuas y símbolos llenos): (a) glucosa; (b) sacarosa; (c) fructosa y (d) AAPM y congelados-descongelados (líneas discontinuas y símbolos huecos).



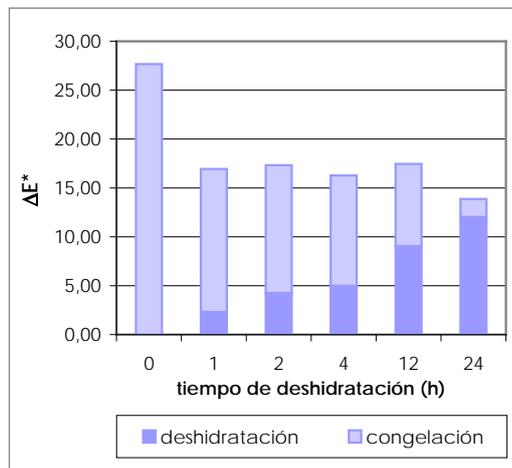
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.29. Diferencia total de color ΔE^* para cubos de manzana deshidratados con distintas soluciones: (a) glucosa; (b) sacarosa; (c) fructosa y (d) AAPM y congelados - descongelados.

3.4 Conclusiones

Al ser la fruta un alimento muy perecedero, se ha considerado siempre a la congelación como un método apto para su conservación. Sin embargo, durante este proceso y posterior almacenamiento pueden producirse modificaciones en sus características debido a la acción de variadas reacciones que producen un deterioro en el color, textura y exudado. Una forma de inhibir estas reacciones es pretratando las piezas de fruta a congelar con soluciones osmóticas.

Evaluando la transferencia de masa y calidad de distintas frutas, sometidas a tratamiento osmótico previo a la congelación, las conclusiones obtenidas fueron las siguientes:

Por medio de la deshidratación osmótica, entre un 40 y 70% del agua de las frutas puede ser eliminado en el término de 24 horas con una baja ganancia de azúcares (5 a 12%). Esto va a depender del tamaño, forma, estructura de la muestra y del tipo de soluto utilizado.

El pretratamiento otorga a las **frutillas** calidad del congelado en términos de color. En oposición, presentan efectos negativos al promover un mayor daño mecánico y el consecuente exudado.

Las **manzanas** y **peras** presentan frente al tratamiento resultados similares. Reducen en forma drástica sus valores de exudado, habiendo una coincidencia con la cinética de pérdida de agua (WL).

En términos de cambios estructurales, al tratar las piezas a diferentes tiempos de proceso, pueden distinguirse dos períodos principales. En el primero (4 horas) no hay modificaciones drásticas en las propiedades reológicas de las muestras. Luego de este tiempo, se enriquecen los tejidos con material osmótico y se producen deformaciones irreversibles volviéndose las piezas de fruta más susceptibles a la deformación que aquellas no tratadas.

En el color, hay un efecto protector favorable de la solución, sobre las muestras, limitando las reacciones de oxidación al evitar el contacto de la fruta con el oxígeno.

Los discos de **kiwis** osmodeshidratados no difieren sustancialmente en la calidad de aquellos frescos.

Luego de la congelación, el pretratamiento demostró ser útil para limitar el exudado mientras que las características cualitativas restantes (principalmente la textura) resultaron inferiores.

La presencia de ácido ascórbico en el producto final se utiliza como índice de calidad, principalmente por sus características antioxidantes que protegen a sustancias sensibles durante el almacenamiento.

Temperaturas de trabajo elevadas (mayores a 40°C) producen un impacto drástico en el contenido de ácido ascórbico el cual disminuye alrededor de un 50% de su valor inicial.

No se observa efecto alguno sobre el contenido de ácido ascórbico en los kiwis al variar el tipo de soluto en la solución deshidratante.

Capítulo 4

Modelado de Transferencia de Masa y Calor durante la dehidrocongelación de frutas

4.1 Introducción

4.1.1 Deshidratación osmótica

En los últimos años numerosos estudios han sido llevados a cabo para entender mejor la transferencia de masa que ocurre durante la deshidratación osmótica de alimentos y para modelar el mecanismo del proceso (Conway y col. 1983, Magee y col. 1983; Toupin y col. 1989; Marcotte y col. 1991; Azuara y col. 1992; Azoubel y Murr 2004, Jena y Das 2005; Bianchi y col. 2008; Arballo y col. 2012). La existencia de los dos flujos opuestos y simultáneos es una de las principales dificultades que surgen para el modelado. Además, estos flujos tienen lugar en condiciones fuertes de no equilibrio, acompañadas por un importante encogimiento y deformación de la pieza de alimento (Geurst y col. 1974; Lenart y Flink 1984).

Durante el proceso osmótico, muchos mecanismos de transferencia de masa parecen coexistir, haciéndose dificultoso desarrollar un modelo matemático capaz de incluirlos a todos. Spiazzi y Mascheroni (1997), luego de un análisis bibliográfico del tema, identificaron un número de modelos matemáticos simplificados capaces de representar los datos experimentales, encontrando primero que su uso era limitado para ciertos casos y segundo, que la mayoría de ellos no tomaban en cuenta los mecanismos de los cuales los resultados dependían. Otros modelos que fueron mucho más elaborados, admitían la complejidad antes mencionada para ser descrita, pero su validación experimental se volvía extremadamente dificultosa a causa del número de parámetros que debían de conocerse para resolver las ecuaciones.

Algunos de los modelos matemáticos simplificados, desarrollados para describir el proceso osmótico son:

- Modelos basados en la segunda ley de Fick.
- Modelos que incluyen conceptos de procesos termodinámicos irreversibles.
- Modelo bi-compartimental.

- Correlaciones.

Los primeros suponen que la transferencia de masa puede ser descrita por la segunda ley de Fick para un estado no estable. Estos modelos tratan con frutas y verduras sumergidas en soluciones concentradas (Hawkes y Flink 1978; Conway y col. 1983; Magee y col. 1983; Rahman y Lamb 1990; Beristain y col. 1990; Isse y Shubert 1991). En todos los casos, la transferencia simultánea de agua y solutos es resuelta como una simple transferencia individual de agua o soluto (Conway y col. 1983). De acuerdo a Conway y col. (1983) esta simplificación puede ser justificada por el hecho que la velocidad de transferencia de soluto es mucho más baja que la del agua. Las soluciones matemáticas de las ecuaciones diferenciales para varias formas y condiciones límite (Crank 1975), proveen una relación proporcional entre una variable de concentración y la raíz cuadrada del tiempo. Esta variable de concentración puede ser definida por ejemplo como una relación sólidos solubles y sólidos totales (Hawkes y Flink 1978), relación pérdida de agua a un tiempo t y pérdida de agua a un tiempo infinito (Conway y col. 1983) o relación entre contenido de soluto y contenido de agua (Rahman y Lamb 1990).

La evolución de la variable de concentración versus la raíz cuadrada del tiempo, proporciona una línea recta cuya pendiente es llamada generalmente "coeficiente de transferencia de masa". Los autores luego han buscado en muchos casos una correlación entre estos coeficientes con la concentración y temperatura de la solución. La principal limitación de este modelo es que los coeficientes de transferencia de masa obtenidos son globales. Ellos no permiten ni disociar las respectivas contribuciones de cada una de las transferencias, ni toman en cuenta las probables interacciones entre los flujos de agua y solutos. Además son específicos para el tipo de alimento, su forma y tamaño y características del equipo utilizado (agitación, relación soluto/producto).

La introducción de conceptos de procesos termodinámicos irreversibles es favorable en el modelado de la deshidratación osmótica debido a que la transferencia de masa es isotérmica y sin cambio de fase, lo cual permite realizar algunas simplificaciones. Estos conceptos hacen posible describir

satisfactoriamente la difusión en sistemas ternarios (Miller 1959, 1960; Chandrasekaran y King 1972 a y b), para integrar las respectivas contribuciones de cada componente (Raoult-Wack 1991; Raoult-Wack y col. 1992) y la descripción de la acción de tejidos naturales (Toupin y col. 1989; Toupin y Le Maguer 1989).

Para el modelo bi-compartimental, basado en la observación de una capa concentrada de azúcar sobre la superficie de la muestra (Raoult-Wack 1990 a y c), fue propuesta una representación física de un alimento modelo en forma de cubo, con dos compartimientos cúbicos concéntricos (Raoult-Wack y col. 1990 b). El intercambio agua y sólidos surge, respectivamente, entre los compartimientos interno y externo y entre el compartimiento externo y la solución. Este modelo hace posible la obtención de una simulación precisa de la cinética de transferencia de masa, así como de los niveles promedio de agua y solutos, los cuales fueron representativos de cada compartimiento como una función del tiempo. Para el desarrollo de este modelo simple, fue necesaria la identificación de un número límite (tres) de parámetros ajustables.

Las correlaciones propuestas, computan el tiempo requerido para una dada reducción de peso en función de la temperatura del proceso y la concentración de la solución (Farkas y Lazar 1969). Otras estiman los parámetros de la deshidratación y la actividad del agua del producto como una función de la concentración de la solución y de la relación de masa producto/solución (Lenart y Flink 1984 a y b). El éxito en el uso de estas correlaciones está limitado a las condiciones de operación y al producto estudiado.

4.1.2 Congelación

En la congelación de alimentos, partiendo de ecuaciones básicas del balance microscópico de energía y haciendo las simplificaciones adecuadas se llega al balance diferencial de energía térmica definido por:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \qquad \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \qquad (4.1)$$

donde \hat{H} es la entalpía por unidad de masa, T es la temperatura, t es el tiempo; ρ la densidad, C_p el calor específico y k la conductividad térmica.

Para su resolución, los métodos disponibles fluctúan de simples ecuaciones semiteóricas a complejos programas de computación.

Una de las dificultades principales que se presentan al querer resolver esta ecuación es cómo considerar el cambio en el valor de las propiedades físicas, relacionadas al fenómeno de transferencia de calor, que ocurre durante el proceso de congelación. Al existir una fuerte dependencia de las propiedades con la temperatura, no se posee una solución analítica exacta que abarque todas las situaciones posibles en la práctica de la congelación (De Michelis 1999).

Los sistemas de predicción más exactos necesariamente pasarán por métodos numéricos (generalmente diferencias finitas o elementos finitos). Estos son los más generales y de los que se puede obtener más información sobre el sistema. Los métodos simplificados (menos exactos, con un campo de aplicación más reducido) podrán conducir a soluciones analíticas, regresiones, soluciones gráficas, etc. En muchas situaciones, estos serán de utilidad, como en el caso de los métodos aproximados de predicción de tiempos de congelación.

Entre los métodos numéricos, tanto las diferencias finitas como los elementos finitos proveen resultados con la misma precisión (para formas geométricas regulares), pero los esquemas en diferencias finitas son más simples, necesitan menos memoria y el tiempo de cálculo es menor en el caso de sistemas de formas regulares (Mascheroni 1995).

El esquema utilizado en nuestro trabajo es el método entálpico (explícito) el cual tiene la ventaja de trabajar con la entalpía, cuya variación con la temperatura es más suave que la del producto ρC_p ; presenta el inconveniente que en cada paso requiere convertir la entalpía en temperatura y viceversa. Del esquema explícito, la ventaja más relevante, es que permite despejar fácilmente la variable desconocida en la congelación: *la temperatura*. El inconveniente más importante consiste en que se debe trabajar con intervalos de tiempo muy pequeños para cumplir la condición de

convergencia del método y minimizar el error que se comete al evaluar el producto ρC_p en el intervalo de tiempo actual y no en el instante medio entre el actual y el siguiente (Mascheroni 1995, De Michelis 1999).

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos al someter a deshidratación osmótica y congelación, piezas de manzanas y peras desarrollando un modelo y verificando el mismo contra datos experimentales.

Se utilizó el modelo de deshidratación osmótica presentado en Spiazzi y Mascheroni (1997), el cual representa los caminos principales de transferencia de masa en los tejidos celulares y la influencia de la forma del producto, variación de su tamaño, composición química del producto y solución y su relación de masa. Para la etapa de congelación, el modelo se realizó por medio de un método numérico, el cual incluyó el fenómeno de cambio de fase en las ecuaciones de balance térmico. Luego las ecuaciones fueron resueltas en el sistema completo (la pieza de fruta) como si ésta estuviera constituida por una fase simple. El balance fue elaborado usando el método entálpico y el modelo numérico fue desarrollado usando diferencias finitas explícitas.

4.2 Experimental

Las experiencias se llevaron a cabo utilizando discos de pera (variedad Packham's Triumph) de 1cm de espesor y 2 cm de diámetro y cubos de manzana (variedad Granny Smith) de 1,5 cm y 2 cm de lado. Las muestras fueron sumergidas en la solución osmótica a 30°C para diferentes tiempos de inmersión. Los agentes deshidratantes utilizados fueron Glucosa (99,5%) y Sacarosa (Grado comercial) con una concentración de 69°Brix. La evolución de la transferencia de masa fue seguida a través de la variación en el tiempo del Contenido de sólidos solubles (°Brix), Pérdida de peso (WR), Sólidos totales (TS) y Reducción de volumen (Vr).

Contenido de sólidos solubles (°Brix) obtenido a través de mediciones en refractómetro Abbe (Bellinham+Stanley Limited).

Pérdida de peso (WR) calculada por diferencia de pesada antes y después del tratamiento.

$$WR(\%) = \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right) * 100 \quad (4.2)$$

m_i: masa inicial (muestra sin tratar)

m_f: masa final (muestra tratada)

Sólidos totales (TS) determinados en estufa de vacío a 58°C, durante 72 horas o hasta alcanzar masa constante.

$$TS(\%) = \left(\frac{m_s}{m_o} \right) * 100 \quad (4.3)$$

m_s: peso de muestra seca.

m_o: peso de muestra antes de secar.

Todas las determinaciones se realizaron por duplicado.

Reducción de volumen (Vr) calculado por la relación entre el volumen final e inicial de la muestra.

$$Vr = \left(\frac{V}{V_o} \right) * 100 \quad (4.4)$$

donde V_o es el valor inicial del volumen.

Con estos valores, como se hizo en los capítulos precedentes, se pudieron evaluar los parámetros generalmente usados para seguir el proceso de deshidratación osmótica mediante las siguientes expresiones:

Pérdida de agua

$$WL(\%) = \left[\left(1 - \frac{TS^0}{100} \right) - \left(1 - \frac{TS}{100} \right) * \left(1 - \frac{WR}{100} \right) \right] * 100 \quad (4.5)$$

Ganancia de sólidos

$$SG(\%) = \left[\left(1 - \frac{WR}{100} \right) * \frac{TS}{100} - \frac{TS^0}{100} \right] * 100 \quad (4.6)$$

donde TS^0 es el contenido de sólidos inicial de la fruta.

Luego de la etapa de deshidratación, las muestras fueron congeladas en un túnel de aire a -40°C . El progreso de la temperatura en el tiempo se siguió utilizando termocuplas de tipo Cu-Constantan, colocadas en el centro del producto y conectadas a un adquirente de datos Keithley DAC-500. Las muestras se congelaban el tiempo necesario hasta que el centro térmico alcanzara -20°C .

4.3 Modelado del proceso

4.3.1 Modelo matemático

La pérdida de agua y la ganancia de solutos durante la deshidratación osmótica dependen de las condiciones de operación y del tipo de tejido celular (Torreggiani y col. 1986^a y b; 1988; Islam y Flink 1982; Lerici y col. 1985, 1986), también como la naturaleza del pretratamiento (Ponting y col. 1966; Hawkes y Flink 1978; Raoult-Wack y col. 1991).

El modelo de deshidratación osmótica presentado en Spiazzi y Mascheroni (1997), representa los caminos principales de transferencia de masa en los tejidos celulares y la influencia de la forma del producto, variación de su tamaño, composición química del producto y solución y su relación de masa. Para evaluar los perfiles de concentración dentro del producto de las

especies involucradas en la deshidratación osmótica (agua y azúcares), la pieza de fruta es dividida en N elementos de volumen iguales y concéntricos. En cada volumen, dos fases pueden ser distinguidas: una correspondiente al contenido del plasma celular – dentro de la membrana celular – y la otra, formada por el espacio intercelular. Como se describe en la figura 4.1 para las peras y figura 4.2 para las manzanas, cada volumen del espacio intercelular está sujeto a un flujo difusional-convectivo desde y hacia los volúmenes adyacentes y un flujo difusivo a través de la membrana desde el plasma celular.

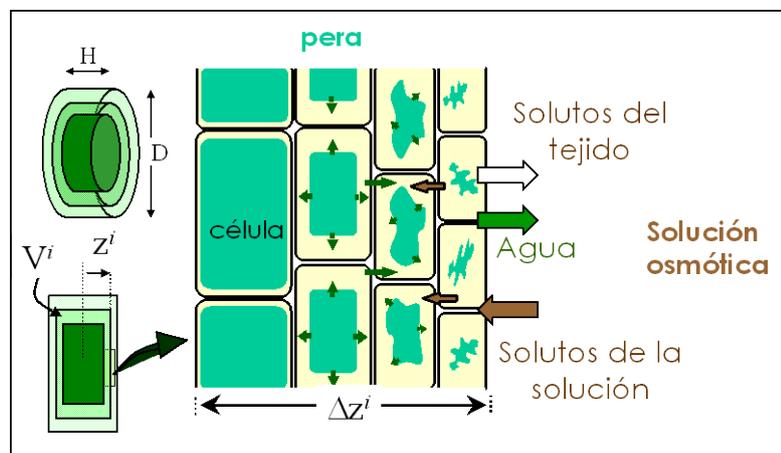


Figura 4.1. Mecanismos de transferencia de materia considerados en el balance de masa para la deshidratación osmótica de discos de pera.

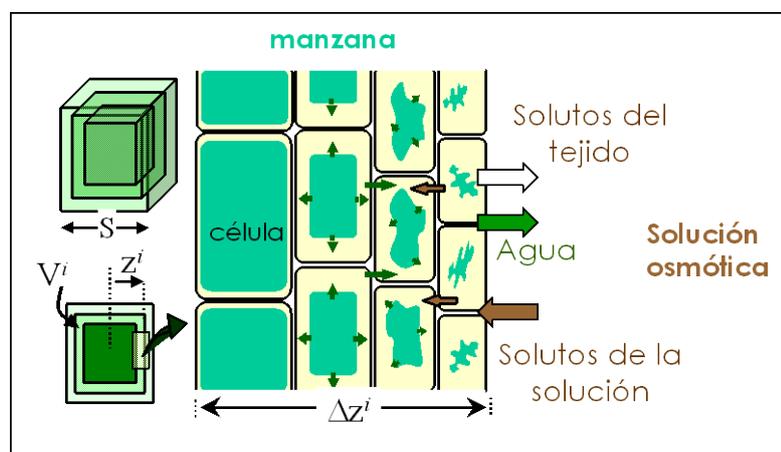


Figura 4.2. Mecanismos de transferencia de materia considerados en el balance de masa para la deshidratación osmótica de cubos de manzana.

El balance de masa para cada especie j en el volumen extracelular i puede ser escrito como:

$$\frac{dm_j^i}{dt} = n_j^{i+1}A^{i+1} - n_j^iA^i + f_j^iS^i \quad (4.7)$$

donde n denota el flujo extracelular, f el flujo transmembrana, A es el área del volumen extracelular y S el área de la membrana celular.

El flujo extracelular es calculado como:

$$n_j^i = D_{apj}^i \frac{(C_j^{i+1} - C_j^i)}{\Delta z^i} + \frac{(C_j^{i+1} + C_j^i)}{2} u^i \quad (4.8)$$

donde C_j es la concentración de las especies j en el volumen extracelular y u^i es la velocidad de desplazamiento relativa de la solución respecto a la superficie del alimento (debido a la contracción del volumen).

El coeficiente de difusividad aparente es definido por:

$$D_{apj}^i = \frac{D_{apj}^o}{\mu^i} \quad (4.9)$$

siendo la viscosidad μ una función de la composición y concentración de la solución osmótica.

El flujo transmembrana esta dado por:

$$f_j = k_j(W_j^i - C_j^i) \quad (4.10)$$

Donde W_j es la concentración de las especies j en el volumen celular y k_j el coeficiente de transferencia de masa.

Las concentraciones de las especies j en la célula y en el volumen extracelular han sido expresadas como:

$$W_j = \frac{m_{cj}}{V_c} \qquad C_j = \frac{m_{je}}{V_e} \qquad (4.11)$$

Donde m_{cj} y m_{je} son las masas de las especies j en la célula y en el volumen extracelular, respectivamente, y V_c y V_e son los volúmenes de las soluciones celular y extracelular, respectivamente, estimados como si se comportasen como soluciones ideales.

La solución de la ecuación 4.5 produce perfiles de concentración de cada especie dentro de la pieza de fruta. Este resultado es luego introducido para resolver el balance de transferencia de calor establecido para el modelado del proceso de congelación.

En este caso, el modelado de la etapa de congelación se llevó a cabo por medio de un método numérico, el cual incluye el fenómeno de cambio de fase en las ecuaciones de balance térmico. Entonces, las ecuaciones fueron resueltas en el sistema completo (la pieza de fruta) como si esta estuviera constituida por una fase simple. De este modo, el balance es transformado en un problema transitorio con propiedades dependientes de la temperatura. El balance fue elaborado usando el método entálpico y el modelo numérico fue desarrollado usando diferencias finitas explícitas. Para este propósito, el balance térmico fue escrito como:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \qquad (4.12)$$

Donde ρ es la densidad del producto, k su conductividad térmica y h la entalpía del producto (J/kg).

Esta ecuación fue resuelta sobre una grilla fija con la entalpía como la variable desconocida. Luego, la conductividad térmica y la posición del frente de congelación pueden ser deducidas. Esta formulación presenta la ventaja

de ser menos sensible a la variación abrupta de las propiedades térmicas dentro del cambio de fase que la formulación de temperatura.

El balance térmico fue resuelto usando un esquema explícito para un cilindro finito. La discretización de la ecuación se llevó a cabo por el método de volumen finito de manera que los flujos térmicos sean conservativos (Chau y Gaffney 1988; Tocci y Mascheroni 1995).

La ecuación de Fourier fue arreglada de manera que el flujo térmico en el cuerpo bidimensional tome una forma monodimensional, expresando una posición variable y suponiendo que el flujo es siempre normal a la superficie. Luego la ecuación está dada por:

$$\rho^i V^i \frac{dh^i}{dt} = q^{i+1} A^{i+1} - q^i A^i \quad (4.13)$$

Donde **A** es el área de transferencia y **q** es el flujo de calor dado por:

$$q^i = k^i \frac{(T^{i+1} - T^i)}{\Delta z^i} \quad (4.14)$$

Donde **z** es la variable elegida para ser independiente. Con las condiciones iniciales y límites:

$$T = T_o \quad \text{para } t = 0$$

$$H(T_\infty - T_s) = -k^l \frac{(T^l - T_s)}{\Delta z^l} \quad (4.15)$$

en el caso de las manzanas para $z = S/2$

donde **H** es el coeficiente de transferencia de calor, **T_∞** la temperatura del aire frío y **T_s** la temperatura de la superficie del producto. En este caso, los valores usados fueron:

$$H = 30 \text{ W/m}^2\text{K} \quad \text{y} \quad T_{\infty} = -37^{\circ}\text{C}$$

El modelo completo nos permitió predecir la evolución de la temperatura y la concentración de agua y sólidos como una función del tiempo del proceso. La influencia de los distintos parámetros del proceso es tomada en cuenta tanto para la deshidratación como para la congelación.

El sistema de ecuaciones resultante se resuelve luego por medio del programa desarrollado en Turbo Pascal.

4.3.2 Coeficientes de transferencia de calor y materia y propiedades físicas

Inicialmente ambas frutas se suponen compuestas de agua, fructosa y sustancias insolubles en las proporciones indicadas en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Composición de las peras frescas.

	Agua	Fructosa	Insolubles
<i>Experiencia Sacarosa</i>	0,858	0,136	0,006
<i>Experiencia Glucosa</i>	0,875	0,114	0,011

El volumen específico es $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ para el agua y $0,6281 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ para la glucosa, fructosa y azúcares de alto peso molecular.

La fracción del volumen extracelular y el diámetro de la célula se suponen para las peras y las manzanas, $0,2 \mu\text{m}$ (Marcellin y Phan Phuc 1970; Khan y Vincent 1990) y $200 \mu\text{m}$ (Saurel 1995), respectivamente.

Las concentraciones de las soluciones osmóticas son dadas en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Composición de soluciones osmóticas.

Solución	Soluto/Agua (peso)	°Brix
<i>Glucosa</i>	1/1	47
<i>Sacarosa</i>	2/1	69

Los coeficientes de transferencia de masa y difusividad aparente que mejor se ajustaron a nuestros resultados experimentales son presentados para las peras y manzanas en la tablas 4.3 y 4.4 respectivamente.

Tabla 4.3. Coeficientes de transferencia de masa y Difusividad aparente para las peras.

Especies	Agua	Glucosa	Fructosa	Sacarosa
$k_j \times 10^9$ (m/s)	200	0	1	0
$D_{apj} \times 10^9$ (m ² /s)	1,250	0,150	0,150	0,100

Tabla 4.4. Coeficientes de transferencia de masa y Difusividad aparente para las manzanas.

Especies	Agua	Glucosa	Fructosa	Sacarosa
$k_j \times 10^9$ (m/s)	200	0	1	0
$D_{apj} \times 10^9$ (m ² /s)	2.250	0,195	0,195	0,140

La viscosidad de las soluciones es calculada con la siguiente ecuación:

$$\mu_m = \sum_j \frac{x_j}{(1-\phi)} \mu_j^o \quad (4.16)$$

en la cual μ_m es la viscosidad de la mezcla, x_j es la fracción en peso de las especies j , ϕ es el contenido de agua y μ_j^o es la viscosidad de la solución de las especies j con el contenido de agua igual al de la mezcla. Los valores de μ_j^o fueron evaluados por medio de las siguientes ecuaciones, resultado de adaptar datos tabulados en Weast (1975):

$$\mu_j^o = \exp(aC_w^2 + bC_w + c) \quad (4.17)$$

con C_w igual a la concentración de agua en kg/m³ y **a**, **b** y **c** constantes presentadas en la tabla 4.5.

Tabla 4.5. Constantes para evaluar la viscosidad de la solución μ_j^o .

Especie	A	b	c
Glucosa	8,28	-19,85	11,60
Fructosa	10,14	-22,70	12,56
Sacarosa	13,12	-28,47	15,37

La funcionabilidad de h con la temperatura y del contenido de sólidos, necesaria para el modelado de procesos de congelación, fue obtenida de correlaciones encontradas en la literatura (Succar y Hayakawa 1983) y de datos experimentales encontrados en Tocci y col. 1998.

La depresión del punto de congelación de la mezcla fue estimada usando la siguiente ecuación:

$$T_{cr} = \frac{x_g}{(1-\phi)} T_{crg} + \frac{x_s}{(1-\phi)} T_{crs} \quad (4.18)$$

donde x_g es la fracción en peso de la glucosa o fructosa, x_s la fracción en peso de la sacarosa, T_{crg} es el punto de congelación de la glucosa o fructosa con un contenido de agua igual al de la mezcla, T_{crs} es el punto de congelación de la sacarosa con un contenido de agua igual al de la mezcla y ϕ el contenido de agua.

Los valores de T_{crg} y de T_{crs} fueron obtenidos de de Cindio y col. 1995 y se dan en la tabla 4.6. Algunos datos de entalpía para el punto de congelación T_{cr} para soluciones con diferentes concentraciones de solutos involucrados en la deshidratación osmótica son también mostrados en esta tabla.

Tabla 4.6. Punto de congelación y Entalpía de soluciones para diferentes concentraciones de soluto.

x (fracción en peso)	Glucosa o Fructosa		Sacarosa	
	T_{cr} (°C)	H_{cr} (kJ/kg)	T_{cr} (°C)	H_{cr} (kJ/kg)
0,15	-1,6	319	-1,0	337
0,30	-5,0	216	-2,7	255
0,45	-10,7	114	-5,6	175

La fracción de hielo (γ) fue evaluada con el balance entálpico establecido por Chang y Tao 1981.

La conductividad y densidad de las mezclas fueron obtenidas de las siguientes ecuaciones (Choi y Okos 1986) en las cuales las contribuciones del agua, hielo y sólidos solubles fueron consideradas:

$$k = (\gamma k_\gamma + (1 - \gamma\phi)k_w)\phi + (1 - \phi)k_s \quad (4.19)$$

$$\rho = \frac{1}{\left[\frac{\gamma}{\rho_\gamma} + \frac{(1-\gamma)}{\rho_w} \right] \phi + \frac{(1-\phi)}{\rho_s}} \quad (4.20)$$

donde los subíndices **w** y **s** indican el agua y sólidos solubles respectivamente.

Los valores de **k** y **ρ** para cada contribución son presentados en la tabla 4.7.

Tabla 4.7. Conductividad térmica y densidad para cada contribución térmica.

	k (W/(m°C))	ρ (kg/m³) con T (°C)
<i>Sólidos (s)</i>	0,16	1599-0.31046T
<i>Agua (w)</i>	0,58	997,18+0,0031439T-0,0037574T ²
<i>Hielo (γ)</i>	2,20	916,89-0,13071T

4.4 Resultados y discusión

4.4.1 Peras

Los perfiles de concentración obtenidos de la resolución del balance de masa para cada especie, para el proceso de deshidratación con soluciones de sacarosa y glucosa, se muestran en las figuras 4.3 y 4.4, respectivamente. El eje z está normalizado con el valor decreciente de la altura media para cada tiempo de deshidratación z^0 .

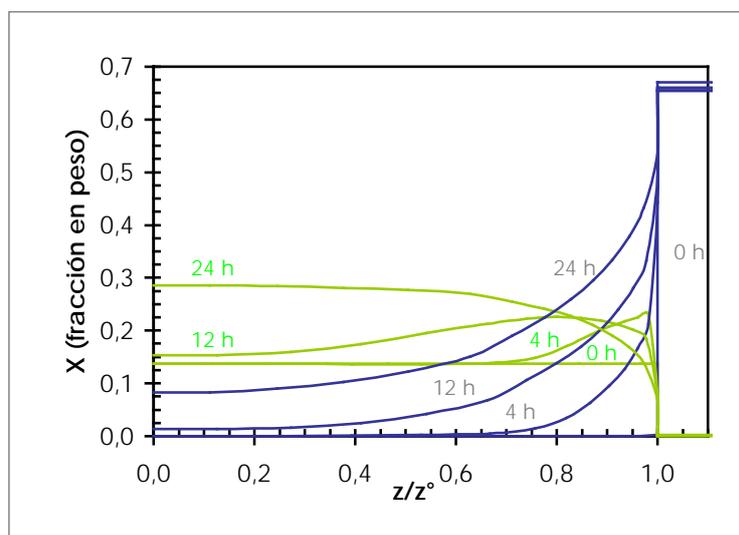


Figura 4.3. Perfiles de concentración de sacarosa (azul) y fructosa (verde) como una función del tiempo de deshidratación en solución de sacarosa.

La figura 4.3 presenta los perfiles de concentración de sacarosa y fructosa en discos de pera a diferentes tiempos de tratamiento (4, 12 y 24 horas). Se observa que la penetración de sacarosa no es muy acentuada hacia el centro del disco pero, por otro lado, debe destacarse que el incremento en la concentración de fructosa se debe a la deshidratación y contracción.

Análogamente, la figura 4.4 muestra los perfiles de concentración de la glucosa y fructosa. En este caso, la difusión de la glucosa es más elevada que la de la sacarosa y, en consecuencia, el aumento en la concentración de la fructosa se hace menos importante que en la situación precedente.

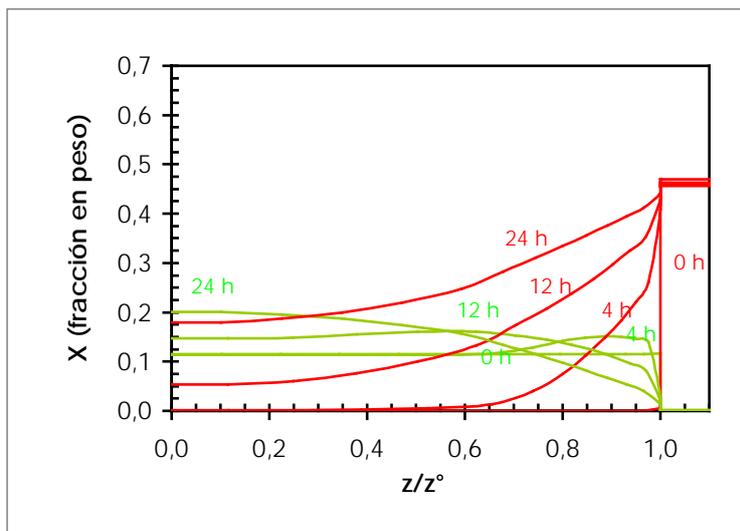


Figura 4.4. Perfiles de concentración de glucosa (rojo) y fructosa (verde) como una función del tiempo de deshidratación en solución de glucosa.

Las discrepancias en el comportamiento observado entre los dos tratamientos (sacarosa y glucosa), pueden ser aclaradas por las diferencias en la capacidad de penetración de los solutos. La molécula de glucosa, cuyo tamaño corresponde a la mitad del de la sacarosa, puede difundir a través de los espacios extracelulares a una velocidad mayor. Matemáticamente, esta diferencia es representada por el uso de un coeficiente de difusión para la glucosa 50% mayor al de la sacarosa.

Estos perfiles de concentración nos permitieron calcular los parámetros del proceso de deshidratación. Los resultados experimentales (símbolos) y calculados (líneas) de las experiencias usando sacarosa y glucosa como soluciones osmóticas, se muestran en las figuras 4.5 (a y b) y 4.6 (a y b) respectivamente.

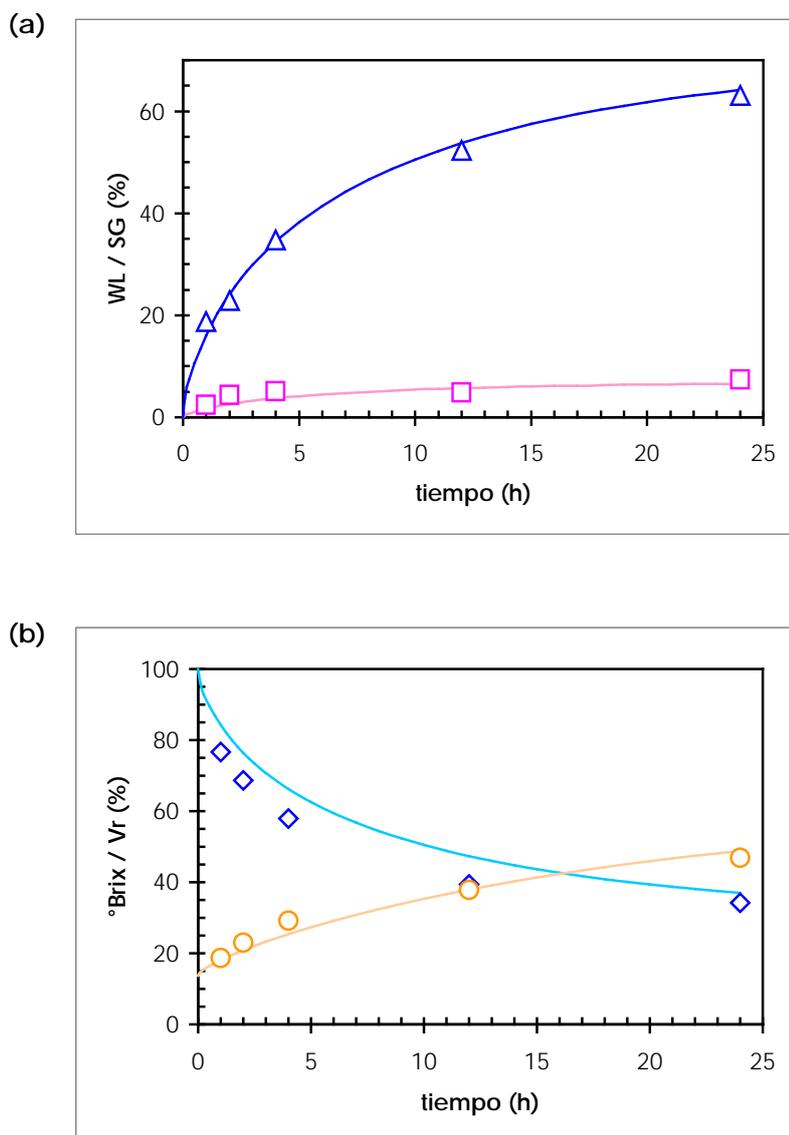


Figura 4.5. Evolución de la pérdida de agua (WL) y ganancia de sólidos (SG) **(a)**; reducción de volumen (V_r) y contenido de sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix) **(b)** en función del tiempo de deshidratación con solución de sacarosa. Símbolos: valores experimentales; Líneas: valores predichos.

Los modelos predicen muy bien la pérdida de agua, ganancia de sólidos y contenido de sólidos solubles en ambos casos. Por el contrario, la reducción de volumen calculada con el tiempo de proceso es menos precisa, principalmente en el caso de la glucosa. Por otro lado, cabe señalar que la medición de esta variable es dificultosa debido a la deformación del disco de pera que acompaña la reducción de volumen durante la DO.

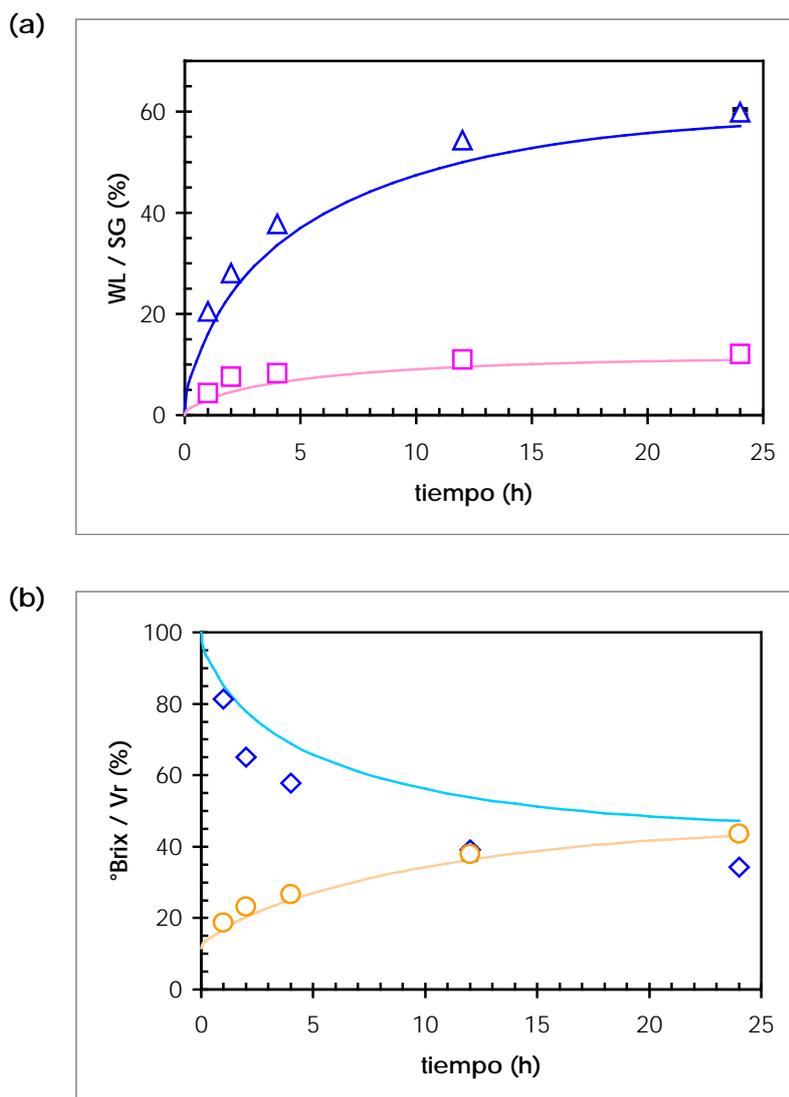


Figura 4.6. Evolución de la pérdida de agua (WL) y ganancia de sólidos (SG) **(a)**; reducción de volumen (V_r) y contenido de sólidos solubles ($^{\circ}\text{Brix}$) **(b)** en función del tiempo de deshidratación con solución de glucosa. Símbolos: valores experimentales; Líneas: valores predichos.

El resultado de la solución del balance de masa fue luego introducido para predecir los perfiles de temperatura que ocurren durante la congelación. Los datos experimentales (símbolos) y calculados (líneas) se presentan en las figuras 4.7 y 4.8. En ambas, se confirma el descenso en el punto de congelación de las piezas de fruta testeada a causa de la incorporación de solutos provenientes de la solución.

La figura 4.7 exhibe los resultados obtenidos con el modelo, para las muestras previamente deshidratadas a diferentes tiempos en solución de sacarosa. Los perfiles de temperatura experimentales son también presentados en la misma. Como puede observarse, el modelo puede predecir con precisión la evolución térmica durante la congelación.

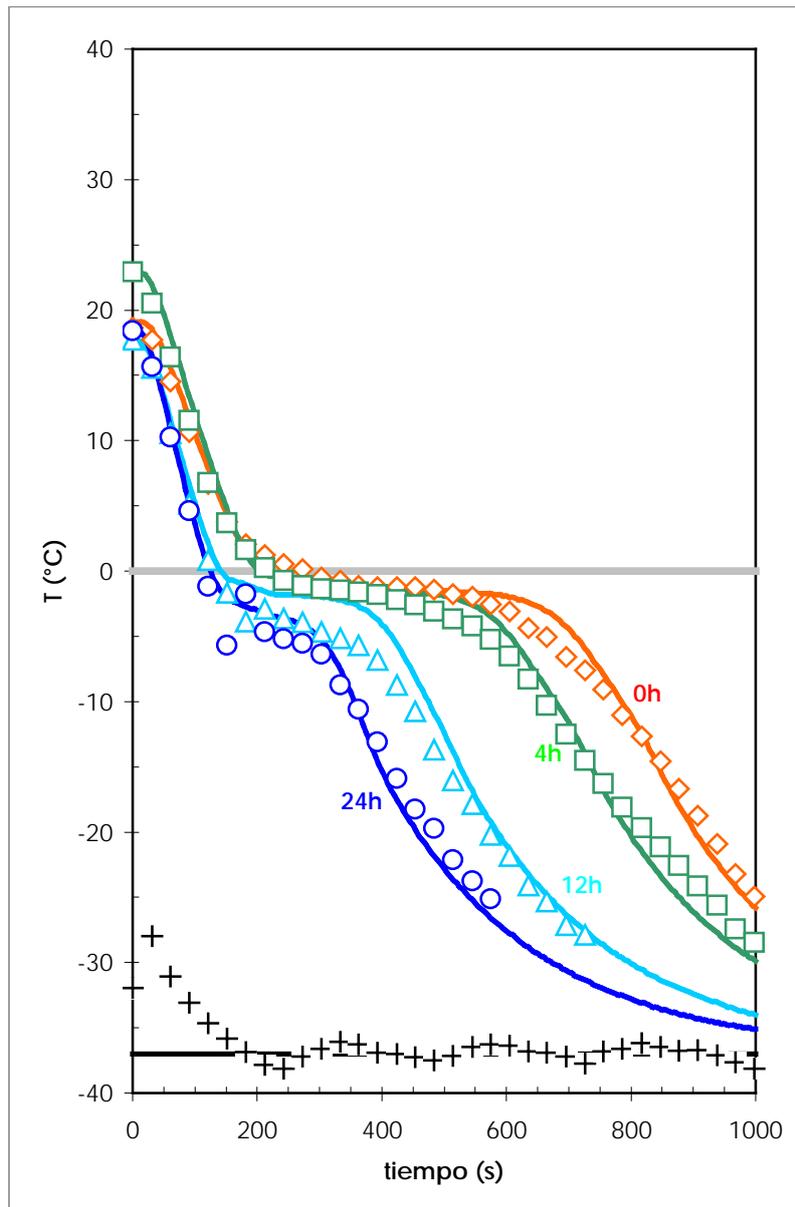


Figura 4.7. Perfiles de temperatura durante la congelación de las muestras previamente deshidratadas para diferentes tiempos con solución de sacarosa. Símbolos: valores experimentales; Líneas: valores predichos.

La figura 4.8 muestra los resultados experimentales y calculados obtenidos durante la congelación de las muestras deshidratadas usando glucosa como agente osmótico.

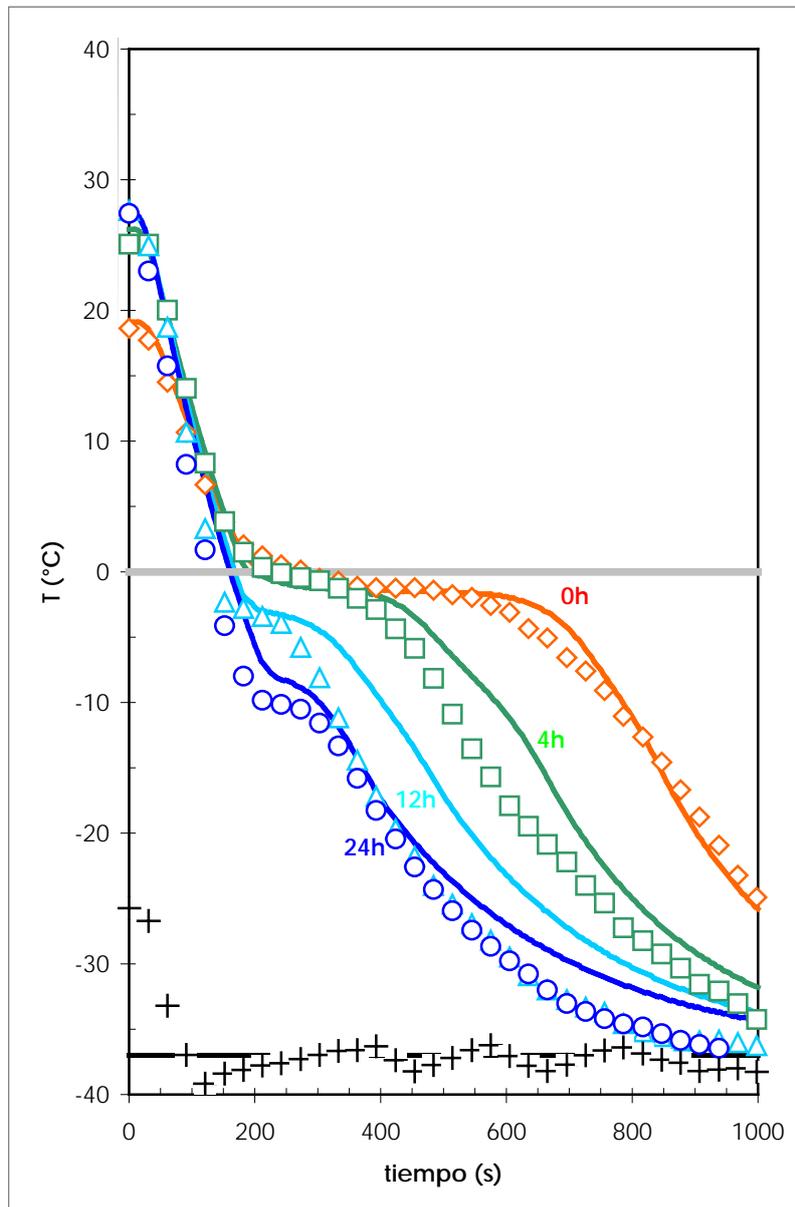


Figura 4.8. Perfiles de temperatura durante la congelación de las muestras previamente deshidratadas para diferentes tiempos con solución de glucosa. Símbolos: valores experimentales; Líneas: valores predichos.

En este caso, la predicción es menos precisa que en la situación precedente. Particularmente, las historias térmicas de 12 y 24 horas presentan

un mayor error, probablemente a causa de un movimiento en la posición de las termocuplas debido al cambio en la textura y volumen que sufren dichas muestras. La falta de precisión de los métodos también se puede atribuir a que no se conocen con exactitud los valores de las propiedades termofísicas.

4.4.2 Manzanas

Cubos de manzana de 1,5 cm y 2,0 cm de lado fueron sometidos a deshidratación osmótica con soluciones de sacarosa y glucosa a diferentes tiempos (4, 12 y 24 horas). Los perfiles de concentración obtenidos de la resolución del balance de masa para cada especie, se presentan en la figura 4.9 (a y b) para la solución de sacarosa y 4.10 (a y b) para la solución de glucosa.

Al igual que los discos de pera, los cubos de manzana revelan una concentración de sacarosa inferior hacia el centro del cubo y la deshidratación es la causante del aumento en la concentración de fructosa (Fig. 4.9 a y b) y para las muestras tratadas con glucosa, el comportamiento es similar pero con una mayor penetración respecto de la sacarosa (Fig. 4.10 a y b).

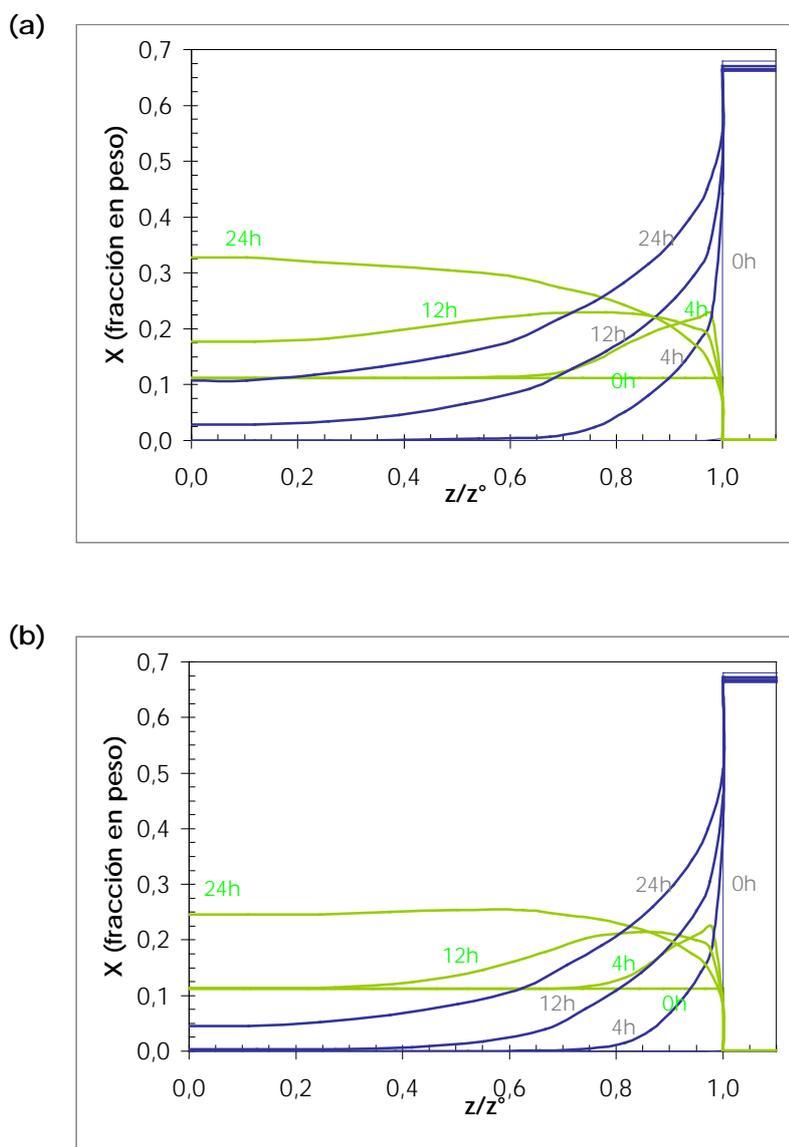


Figura 4.9. Perfiles de concentración de sacarosa (azul) y fructosa (verde) obtenidos para cubos de manzana de 1,5 cm **(a)** y 2 cm **(b)**, como una función del tiempo de deshidratación en solución de sacarosa.

Comparando el proceder de los cubos de 1,5 cm y de los de 2,0 cm, se observa que hasta las 12 horas de tratamiento, no hay variación en la concentración de las especies hacia el centro de la pieza. La ganancia de sólidos permanece localizada en el producto en una capa superficial de 2 a 3 mm de profundidad. De acuerdo a algunos autores, la entrada de solutos está limitada a los espacios extracelulares (Hawkes y Flink 1978; Bolin y col. 1983; Raoult-Wack y col. 1992).

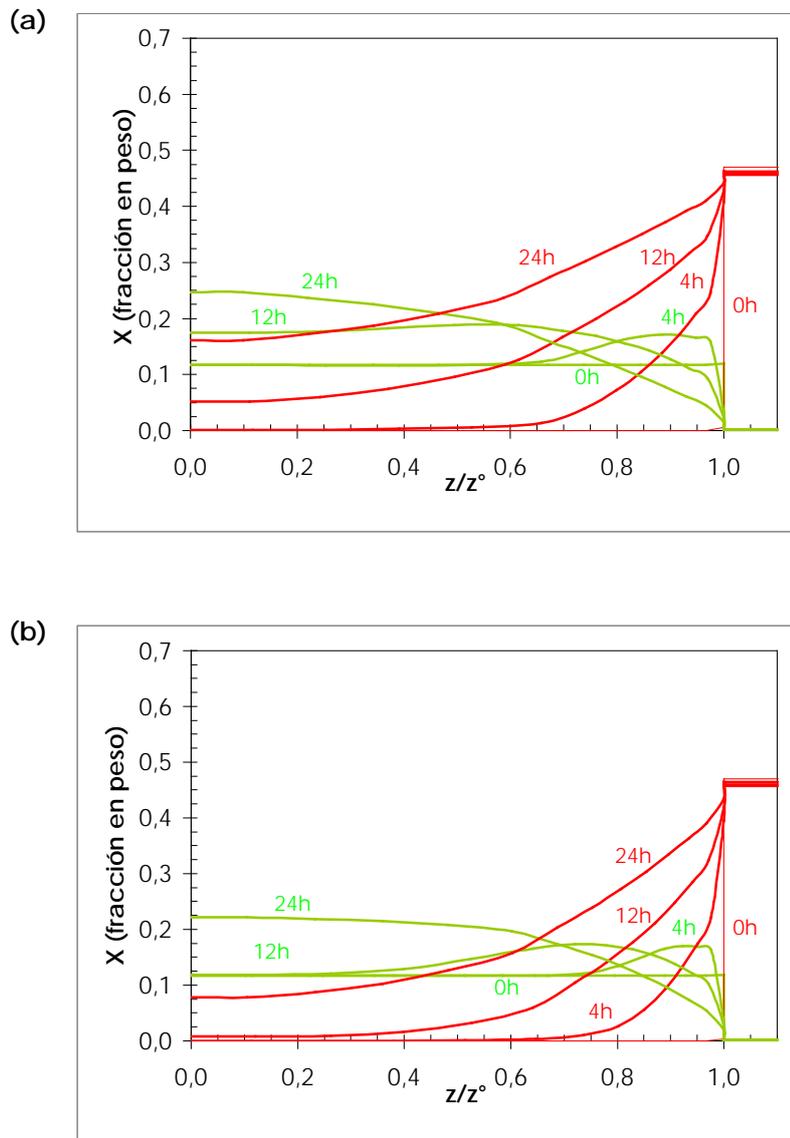


Figura 4.10. Perfiles de concentración de glucosa (rojo) y fructosa (verde) obtenidos para cubos de manzana de 1,5 cm **(a)** y 2,0 cm **(b)**, como una función del tiempo de deshidratación en solución de glucosa.

Calculando los parámetros del proceso de deshidratación con estos perfiles, se graficaron los resultados experimentales (símbolos) y calculados (líneas) de las experiencias con cubos de manzana de 1,5 (líneas continuas y símbolos vacíos) y 2 cm de lado (líneas discontinuas y símbolos llenos), usando sacarosa y glucosa como soluciones osmóticas (figuras 4.11 y 4.12).

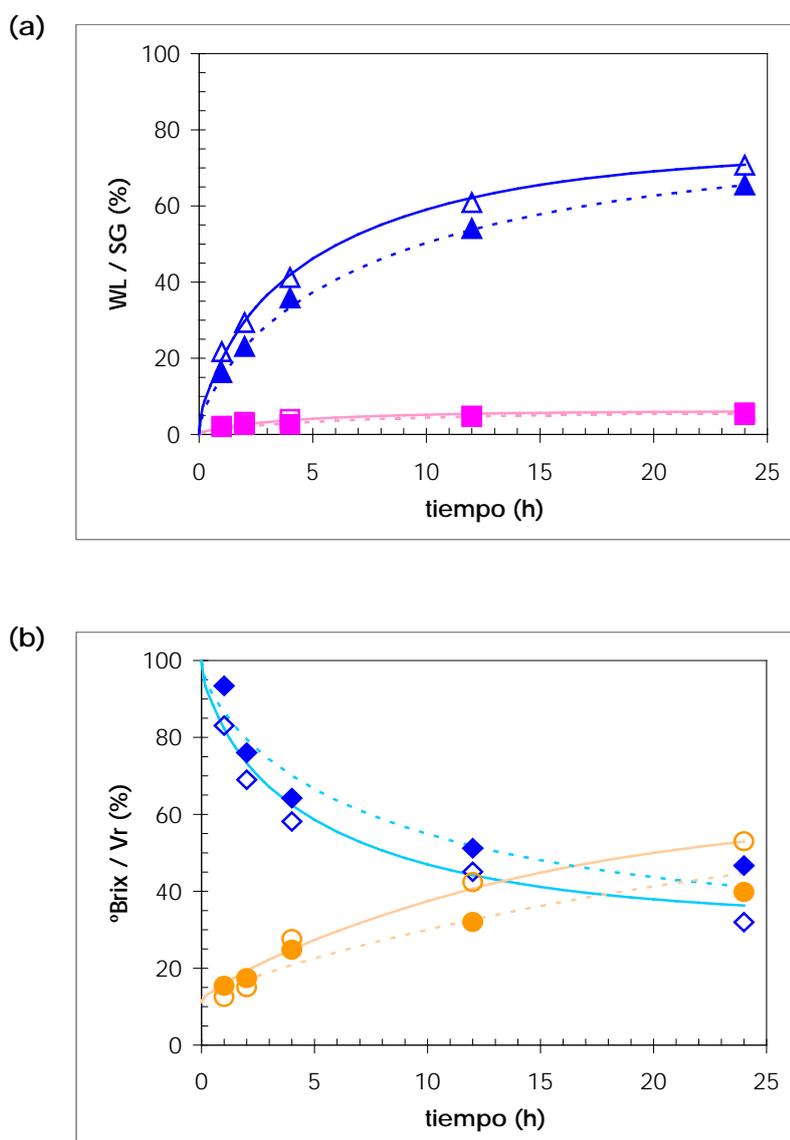


Figura 4.11. Evolución (calculada y experimental) de la pérdida de agua (WL) y ganancia de sólidos (SG) **(a)**; reducción de volumen (V_r) y contenido de sólidos solubles ($^{\circ}\text{Brix}$) **(b)** en cubos de manzana de 1,5 cm (líneas continuas) y 2 cm (líneas discontinuas), en función del tiempo de deshidratación con solución de sacarosa. Símbolos: valores experimentales; Líneas: valores predichos.

Como puede notarse, se obtuvieron buenas predicciones para la pérdida de agua, ganancia de sólidos y contenido de sólidos solubles en ambos casos. La obtención de una buena concordancia para la reducción de volumen calculada con el tiempo de proceso, resultó nuevamente dificultosa principalmente en el caso de la glucosa.

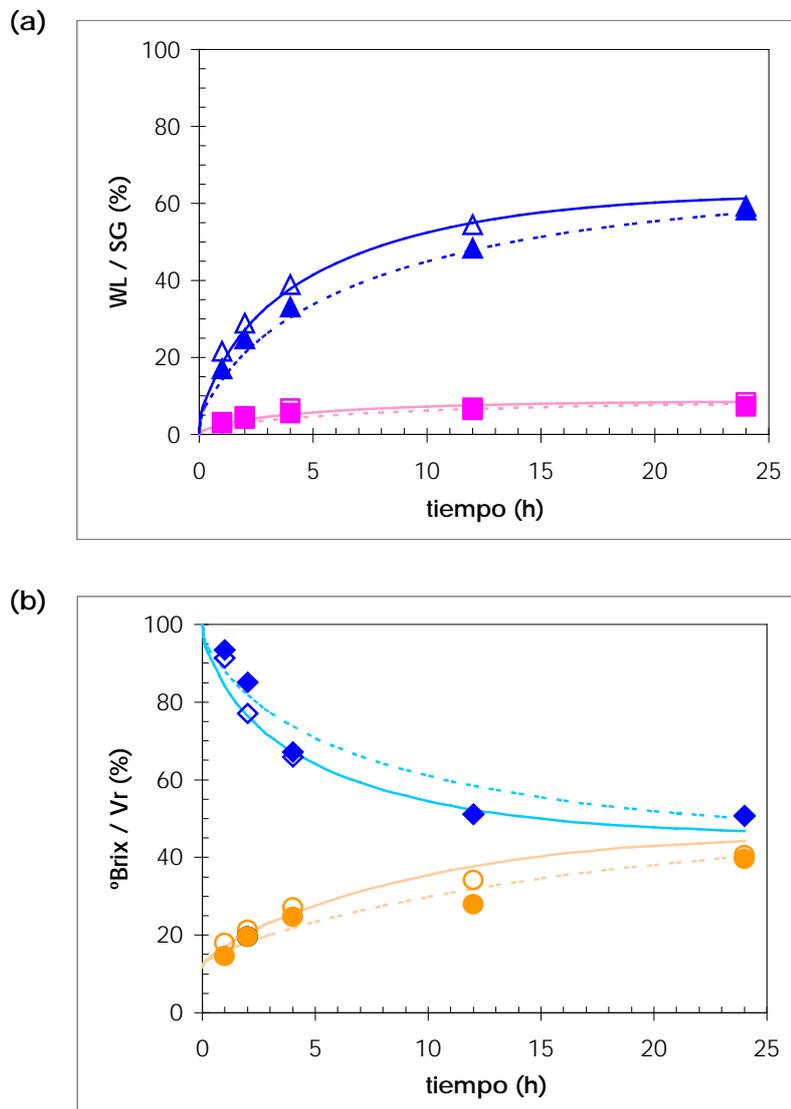


Figura 4.12. Evolución (calculada y experimental) de la pérdida de agua (WL) y ganancia de sólidos (SG) **(a)**; reducción de volumen (V_r) y contenido de sólidos solubles ($^{\circ}\text{Brix}$) **(b)** en cubos de manzana de 1,5 cm (líneas continuas) y 2 cm (líneas discontinuas), en función del tiempo de deshidratación con solución de glucosa. Símbolos: valores experimentales; Líneas: valores predichos.

Para la congelación, los perfiles de temperatura obtenidos a partir del modelo (líneas) y los correspondientes experimentales (símbolos), en muestras de 1,5 cm de lado, previamente deshidratadas a diferentes tiempos en solución de sacarosa y glucosa, se muestran en las figuras 4.13 y 4.14 respectivamente. Como puede observarse para ambos casos, la predicción

de la evolución térmica durante la congelación resulta buena ya que la dispersión es baja y los valores conseguidos con el modelo no se desvían respecto a los experimentales.

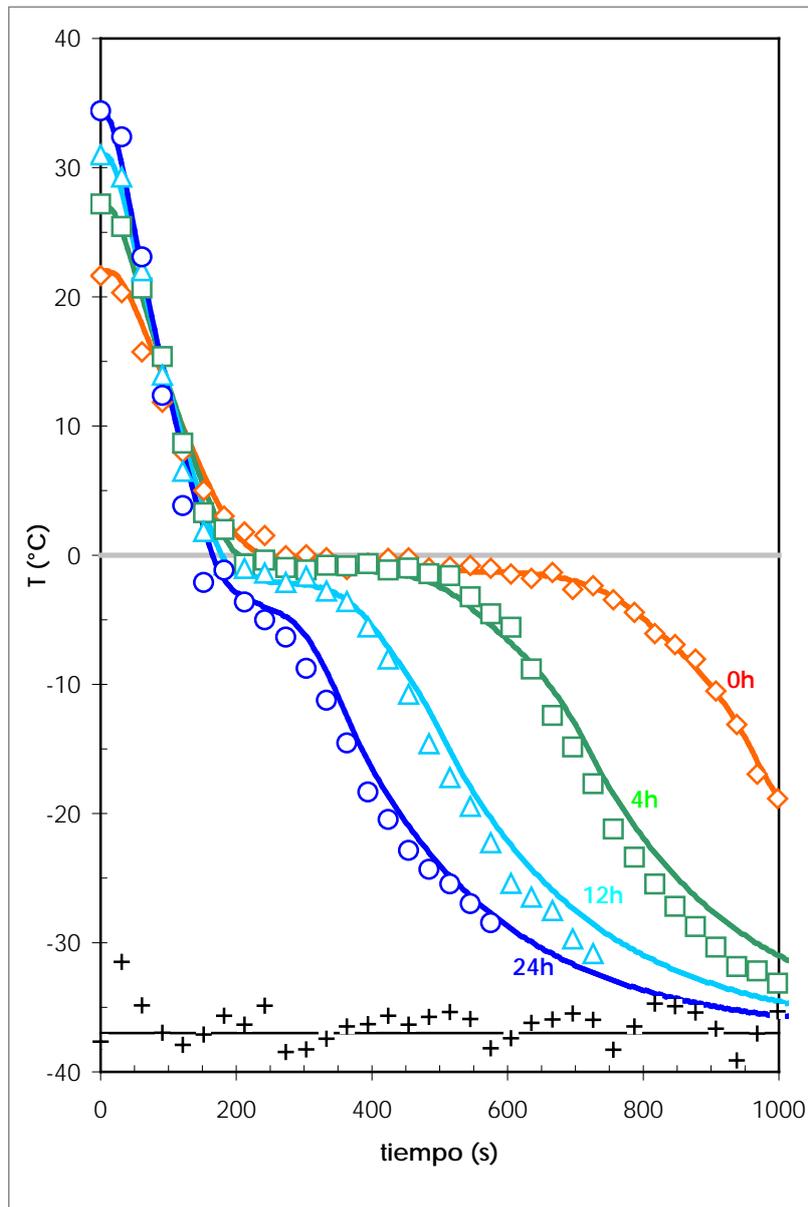


Figura 4.13. Perfiles de temperatura durante la congelación de cubos de manzana de 1,5 cm previamente deshidratados para diferentes tiempos con solución de sacarosa. Símbolos: valores experimentales; Líneas: valores predichos.

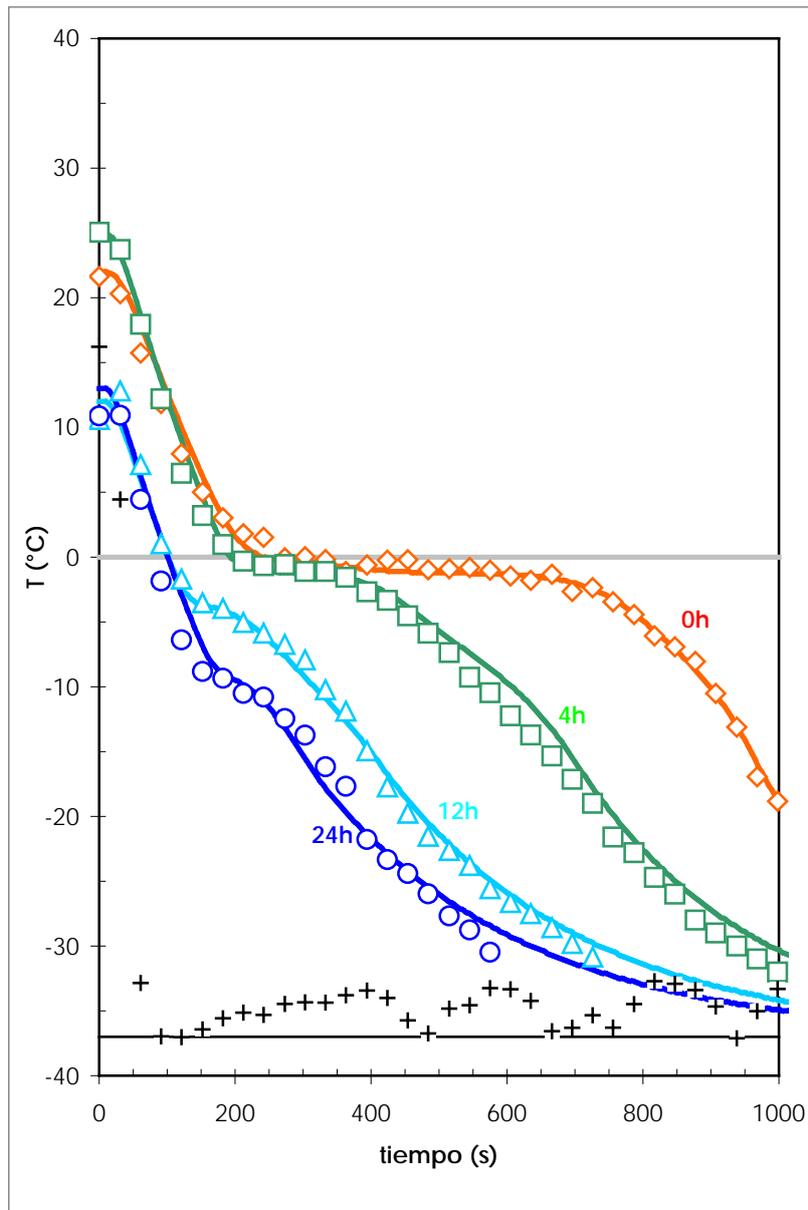


Figura 4.14. Perfiles de temperatura durante la congelación de cubos de manzana de $1,5\text{ cm}$ previamente deshidratados para diferentes tiempos con solución de glucosa. Símbolos: valores experimentales; Líneas: valores predichos.

4.5 Conclusiones

El modelo de transferencia de materia propuesto en este capítulo es aplicable a la deshidratación osmótica y congelación de frutas y vegetales y explica los principales caminos de transferencia de masa y energía en dichos tejidos.

La simulación del proceso de deshidratación es validada exitosamente con resultados experimentales obtenidos en discos de peras y cubos de manzana. El modelo nos permite predecir adecuadamente los parámetros de deshidratación, la concentración de sólidos y perfiles de temperatura dentro de la fruta y el tiempo de congelación para ambas frutas.

En las peras, los modelos predicen muy bien la pérdida de agua (WL), ganancia de sólidos (SG) y sólidos solubles ($^{\circ}$ Brix) para ambas soluciones. Es menos precisa la reducción de volumen (Vr) debido a que la medición de esta variable se hace dificultosa. Durante la congelación el modelo predice la evolución térmica con precisión para la sacarosa y en menor grado para la glucosa, principalmente para largos períodos de proceso. El error es causado por el cambio en la textura y volumen que sufren los discos de fruta.

En los cubos de manzana, para la deshidratación se obtienen resultados similares a los discos de pera. Durante la congelación, la predicción de la evolución térmica resulta buena ya que la dispersión es baja y los valores conseguidos con el modelo no se desvían respecto a los experimentales.

Capítulo 5

Conclusiones generales

5.1 Conclusiones generales

Con la intención de mejorar la calidad sensorial y nutricional de productos frutihortícolas durante su conservación, y tener la posibilidad de combinar y aplicar otros procesos como la congelación, se estudió el uso de la Deshidratación Osmótica como pretratamiento para prolongar la vida útil de las frutas.

Para ello, en la primera parte se examinaron los efectos de las variables del proceso (temperatura, composición y concentración de la solución osmótica) sobre la cinética de transferencia de materia.

- Las condiciones de trabajo más apropiadas resultaron a temperaturas moderadas (30-40°C). Experiencias a más de 40°C, produjeron un incremento tanto en la pérdida de agua como en la ganancia de sólidos principalmente al emplear azúcares de alto peso molecular en la preparación de la solución hipertónica, derivando en un lixiviado de los sólidos naturales de la fruta.
- Aumentos en la concentración de la solución proporcionaron resultados favorables en términos de pérdida de agua para un mismo período de inmersión y un moderado incremento en la ganancia de sólidos.
- La influencia de los pesos moleculares de los solutos de la solución sobre los parámetros pérdida de agua (WL) y ganancia de sólidos (SG), fue inversamente proporcional. Bajos pesos impulsaron una mayor deshidratación y una mayor ganancia de sólidos, mientras que el uso de altos pesos moleculares originó una lixiviación de los solutos naturales de la fruta.

Los distintos solutos podrían utilizarse como agentes deshidratantes o impregnantes de acuerdo a los requerimientos del producto final.

Una conveniente elección de los parámetros operacionales puede resultar en un amplio rango de aplicaciones.

Una vez halladas las condiciones más adecuadas de procesamiento, se estudiaron las consecuencias producidas por el tratamiento osmótico sobre la calidad sensorial de cuatro frutas de características diferentes (manzana, pera, frutilla y kiwi) previo a la congelación.

Los efectos fueron diversos:

- Las manzanas y peras redujeron en forma drástica sus valores de exudado. En color, hubo un efecto protector de la solución sobre el producto, limitando las reacciones de oxidación. En lo que respecta a la textura, en un primer período de 4 horas, las muestras no manifestaron cambios respecto a las piezas no tratadas. Pasado este tiempo, hubo un enriquecimiento en los tejidos vegetales de sólidos provenientes de la solución osmótica, que condujo a deformaciones irreversibles en las piezas de fruta, presentando las mismas una textura semigomosa.
- En las frutillas, el pretratamiento fue favorable en términos de color pero provocó un mayor daño mecánico y un aumento de exudado durante la congelación al compararlas con aquellas muestras sin deshidratar y congeladas.
- En los kiwis, durante la deshidratación no se advirtieron cambios importantes. Luego de la congelación, el exudado reduce sus valores coincidiendo con la cinética de pérdida de agua. Respecto a la textura, sufre un daño mecánico definitivo y en el color se observó un cambio significativo de verde claro a oscuro. El contenido de ácido ascórbico se conservó al trabajar con temperaturas inferiores a 30°C. Existió una alta dependencia de todas las variables con el soluto utilizado.

Finalmente para obtener un modelo que describa el proceso combinado, se vinculó un modelo previamente desarrollado basado en la transferencia de materia en tejidos vegetales para la Deshidratación Osmótica y una formulación entálpica con un esquema de volumen finito para la etapa de Congelación.

El alcance del modelo se verificó confrontado los datos calculados con experimentales.

- La simulación del proceso de deshidrocongelación fue validada exitosamente con los resultados experimentales tanto con los discos de pera como los cubos de manzana.
- Permite predecir adecuadamente la pérdida de agua (WL), ganancia de sólidos (SG), la concentración de sólidos y los perfiles de temperatura y tiempo de congelación en ambas frutas.

La fuerza de la Deshidratación Osmótica está relacionada con el mejoramiento de la calidad de los productos tratados y la posibilidad de dar un amplio rango de consistencias a los mismos. Estos mejoramientos se obtienen con un mínimo esfuerzo térmico y bajo costo de procesamiento de ingredientes.

El pretratamiento osmótico puede ser una importante herramienta para el desarrollo de nuevos productos e introducir un valor agregado a los mismos en el mercado con propiedades funcionales para sistemas alimenticios específicos.

5.2 Optimización del proceso

La Dehidrocongelación proporciona la posibilidad de desarrollar un proceso de preservación de productos frutihortícolas eficiente, rápido, que presente un producto final de mayor calidad y si es posible de mayor valor agregado.

Dicho proceso permite disminuir el consumo de energía, trabajando con temperaturas moderadas e incrementando la velocidad del proceso, reduce el volumen del producto facilitando su embalaje, depósito y transporte y modifica sus características sensoriales para adaptarlo a distintos usos. Además, se trata de una tecnología poco costosa y, que a pesar de requerir desarrollos innovadores, es de fácil aplicación en el ámbito de las pequeñas y medianas empresas.

El empleo de la fruta dehidrocongelada en empresas de alimentos es creciente y está orientado principalmente hacia tres sectores:

Sector industrial para conservarla en fábrica y posteriormente utilizarla en un proceso de elaboración. Por ejemplo, un método de producción de concentrados aromáticos de frutas. El mismo consiste en la obtención de un concentrado mediante una etapa de deshidratación osmótica de la fruta. Luego el producto es prensado, refinado y finalmente pasteurizado y congelado.

Sector pastelería y heladería artesanal. En este caso las posibilidades de emplearla son muy amplias gracias a la estabilidad alcanzada, al contenido limitado de agua, a la alta concentración de solutos y a la buena textura y color obtenidos. Por ejemplo, helados, tortas heladas, ensaladas de frutas y productos de consumo diario como el yogurt.

Sector de consumo directo como aperitivos o snacks.

Para abordar el tema de la Dehidrocongelación, desde un punto de vista práctico y de costos, debemos seleccionar del presente trabajo de tesis, las condiciones más adecuadas de elaboración en lo que respecta a tiempos de proceso, concentraciones, tipo de solutos, temperaturas, parámetros de calidad y tipo de frutas.

El tiempo óptimo de deshidratación osmótica se elige teniendo en cuenta que el tratamiento completo comprende además un paso de congelación como proceso final de conservación. Por ello se toma como tiempo razonable los ensayos de 4 horas de deshidratación. En este periodo las piezas de fruta alcanzan un grado conveniente de deshidratación y ganancia de sólidos, 25 al 40 % y 3 a 6 % respectivamente. La excepción son las frutillas que solo pierden un 15 % de agua y ganan hasta un 2% de sólidos de la solución osmótica, comportamiento que, como ya se explicó en 3.3.2, se debe a la resistencia de la piel de las frutillas enteras.

En cuanto a los solutos utilizados, se optó preparar soluciones osmóticas reconocidas tales como la sacarosa y glucosa para luego ir variando la composición de los jarabes con solutos de mayor peso molecular. Salvo que se desee una mínima impregnación de sólidos, se eligen la sacarosa, glucosa y jarabes de fructosa y AAPM como soluciones osmóticas eficientes en términos de pérdida de agua y ganancia de sólidos. Los de mayor peso molecular pueden presentar lixiviado de sólidos y valores de deshidratación muy bajos para el periodo elegido.

La elección de los solutos a utilizar en la preparación de las soluciones deshidratantes también va a depender de los costos y de la disponibilidad en el mercado local de los mismos.

De las concentraciones probadas, las soluciones de 69°Brix presentan las mejores condiciones para desarrollar un proceso de deshidratación en forma eficaz y rápida. Para un mismo tiempo de tratamiento respecto a las de 47°Brix, se obtuvo una mayor pérdida de agua sin modificar prácticamente la ganancia de sólidos.

El rango de temperaturas más conveniente resulta entre los 30°C a 40°C. Con esta elección se busca evitar el aumento en el efecto de impregnación y que se produzcan cambios estructurales en la pieza de fruta deshidratada que conducirían a una disminución en la calidad del producto final.

El estudio de calidad de las frutas evaluadas puso en evidencia comportamientos que no pueden generalizarse, señalando la influencia de la matriz alimentaria empleada.

La posibilidad de utilizar las peras y manzanas dehidrocongeladas es muy amplia. Un marcado descenso del exudado producto de la pérdida de agua durante las 4 horas de pretratamiento, el efecto protector de la solución sobre el producto que limita las reacciones de pardeamiento y la pequeña variación en la textura respecto a las piezas no tratadas hacen que el uso de estas frutas sea recomendable.

De las restantes frutas ensayadas, se obtuvieron distintos comportamientos y cada uno de estos puede presentar ventajas dependiendo de cual sea la elaboración o el producto al que se las destine.

Las frutillas no exhiben pérdida de pigmentos en el período de tratamiento seleccionado.

En cambio, la textura y el exudado de las mismas se ven afectados al producirse un daño mecánico superficial de la fruta entera en las 4 horas iniciales del proceso. Si bien estos resultados representan un descenso en la calidad de las frutillas, no demostrarían ser una limitación para su uso, siempre y cuando se las destine al consumo de un producto congelado tal como un postre helado. El empleo en este tipo de productos cuenta además con la ventaja extra que representa la incorporación de sólidos en la fruta desde la solución osmótica, disminuyendo su punto de congelación.

En los kiwis, el factor limitante lo representa la pérdida de textura. El pretratamiento osmótico no produce una mejora en la calidad de las piezas de fruta dehidrocongeladas-descongeladas.

En el color, hay un viraje de verde esmeralda, característico de esta fruta, a verde oscuro, por efecto de la degradación de clorofila. Este cambio, a pesar de ser significativo, no representa una restricción para su uso.

El ácido ascórbico tiene un descenso abrupto en las primeras 2 horas de deshidratación, manteniéndose luego en valores casi constantes. En este caso el proceso osmótico podría ser usado con fines de formulación, a través del

agregado de ascórbico a la solución deshidratante, cuya incorporación en concentraciones adecuadas, permitiría mantener invariable el contenido inicial en la fruta.

Referencias Bibliográficas

Referencias Bibliográficas

- Adambounou T.L. y Castaigne F. (1983). *Deshydratation partielle par osmose des bananes et determination de courbes de sorption isotherme*. Lebensm.-Wiss. u. Technol. (16), 230.
- Adambounou T.L., Castaigne F. y Dillon I. (1983). *Abaissement de l'activite de l'eau de legumes tropicaux par deshydratation osmotique partielle*. Sci des Aliments (3), 551.
- Alzamora S.M. (1997). *Preservación I: Alimentos conservados por factores combinados*. Temas en tecnología de alimentos, Vol. I. CYTED.
- Andreotti R., Tomasicchio M. y Macchiavelli L. (1983). *Disidratazione parziale della frutta per osmosi*. Industria Conserve (58), 90-95.
- Arballo J.R., Bambicha R.R., Campañone L.A., Agnelli M.E. y Mascheroni R.H. (2012). *Mass transfer kinetics and regression-desirability optimization during osmotic dehydration of pumpkin, kiwi and pear*. International Journal of Food Science and Technology (47), 306-314.
- Azoubel P. y Murr F. (2004). *Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato*. Journal of Food Engineering (61) 291-295.
- Azuara E., Cortes R., García H.S. y Beristain C. I. (1992). *Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's second law*. International Journal of Food Science and Technology (27) 409-418.
- Bambicha R., Mascheroni R.H. y Agnelli M.E. (2010). *Deshidratación osmótica de kiwi (Actinidia Chinensis p.) en soluciones azucaradas con agregado de calcio*. CD VI Congreso Argentino de Ingeniería Química - CAIQ2010, Trabajo 1075.
- Barbosa-Cánovas G.V. y Vega-Mercado H. (2000). *Deshidratación de Alimentos*. Editorial Acribia, Zaragoza, España.
- Bianchi M., Milisenda P., Guarnaschelli A., Abecasis C. y Mascheroni R.H. (2008). *Modelado y simulación de procesos de congelación y dehidrocongelación de frutas*. Publicado en actas del Congreso Americano de Tecnologías de Aire Acondicionado y Refrigeración 2008 (CATAAR 2008); Buenos Aires, 107-122.

- Beristain C., Azuara E., Cortés R. y García H. (1990). *Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple rings*. Intern. J. of Food Sci. and Technol. (25), 576-582.
- Biswal R. y Bozorgmehr K. (1992). *Mass transfer in mixed solute osmotic dehydration of apple rings*. ASAE Journal (35) (1), 257-265.
- Bongirwar D.R. y Sreenivasan A. (1977). *Studies on osmotic dehydration of banana*. J. Food Sci. and Technol. (14), 104.
- Chandrasekaran S. y King C. (1972 a). *Volatiles retention during drying of food liquids*. A. I. Ch. E. Journal (18), 520-526.
- Chandrasekaran S. y King C. (1972 b). *Multicomponent diffusion and vapor-liquid equilibria of dilute organic components in aqueous sugar solutions*. A. I. Ch. E. Journal (18), 513-520.
- Chang H. y Tao L.C. (1981). *Correlations of enthalpies of food systems*. Journal of Food Science (46) (5), 1493-1497.
- Chau K.V. y Gaffney J.J. (1988). *A Finite Difference model for heat and mass transfer in products with internal heat generation and transpiration*. Journal of Food Science (55) (2), 484-487.
- Chiralt, A. y Talens, P. (2005). *Physical and chemical changes induced by osmotic dehydration in plant tissues*. Journal of Food Engineering (67), 167-177.
- Chirife, J. (1982). *Principios de la deshidratación osmótica de frutas*. Anales Asoc. Quím. Argentina, 913-932.
- Choi Y. y Okos M.R. (1986). *Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods*. In Food Engineering and Process Applications, Vol. 1, Transport Phenomena, M. Le Maguer y P. Jelen, eds. Elsevier Applied Science Publishers, London.
- de Cindio B., Corraera S. y Hoff V. (1995). *Low temperature sugar-water equilibrium curve by a rapid calorimetric method*. Journal of Food Engineering (24) (4), 405-415.
- Contreras J.E. y Smyrl T.G. (1981). *An evaluation of osmotic concentration of apple rings using corn syrup solids solutions*. Can. Inst. Food Sci Technol. J. (14), 310-314.

- Conway J., Castaigne F., Picard G. y Voxan X. (1983). *Mass transfer consideration in the osmotic dehydration of apples*. Canadian Institute of Food Science and Technology Journal (16), 25-29.
- Costell E., Fiszman S.M. y Durán L. (1997). *Propiedades Físicas I: Reología de sólidos y textura*. Temas en tecnología de alimentos, Vol. 1, CYTED (Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo), 215-260.
- Crank J. (1975). *The mathematics of diffusion*. 2^{nde} Ed., Claredon Press, Oxford, 413.
- De Michelis A. (1999). *Diseño de equipos para la congelación de alimentos*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de La Plata.
- Derossi A., De Pilli T., Severini C. y McCarthy M.J. (2008). Mass transfer during osmotic dehydration of apples. *Journal of Food Engineering* (86), 519-528.
- El-Aouar A., Moreira Azoubel P., Barbosa J. y Murr, F. (2006). *Influence of the osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (Carica papaya L.)*. Journal of Food Engineering (75), 267-274.
- Eren I. y Kaymak-Ertekin F. (2007). *Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology*. Journal of Food Engineering, (79) 344-352.
- Escalada Pla M.F. de, Campos C.A., Gerschenson L.N. y Rojas A.M. (2009). *Pumpkin (Cucurbita moschata, Duchesne ex poiret) mesocarp tissue as a food matrix for supporting iron in a food product*. Journal of Food Engineering (92) (4), 361-369.
- Farkas D. y Lazar M. (1969). *Osmotic dehydration of apple pieces: effect of temperature and syrup concentration on rates*. Food Technology (23), 688-690.
- García R., Menchu J. y Rolz C. (1974). *Tropical fruit drying, a comparative study*. Proc. 4th Int. Congress Food Sci. and Technol. (4), 32-40.
- Geurst T., Walstra P. y Mulder H. (1974). *Transport of salt and water during salting of cheese. 1. Analysis of the processes involved*. Neth. Milk Dairy J. (28), 102-129.

- Goula, A.M. y Lazarides H.N. (2013). *Modeling of mass and heat transfer during combined processes of osmotic dehydration and freezing (Osmo-Dehydro-Freezing)*. Chemical Engineering Science (101), 52-61.
- Gras M., Vidal D., Betoret N., Chiralt A. y Fito P. (2003). *Calcium fortification of vegetables by vacuum impregnation. Interaction with cellular matrix*. Journal of Food Engineering (56), 279-284.
- Hawkes J. y Flink J. (1978). *Osmotic concentration of fruit slices prior to freeze dehydration*. J. Food Proc. Pres. (2), 265-284.
- Hohlberg A. y Aguilera J.M. (1988). *Deshidratación de Kiwis. Informe Final*, DICTUC, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Hoover M.W. y Miller N.C. (1975). *Factors influencing impregnation of apple slices and development of a continuous process*, J. Food Sci. (40), 698.
- Huxsoll C. (1982). *Reducing the refrigeration load by partial concentration of food prior to freezing*. Food Technology (5), 98-102.
- Islam M. y Flink J. (1982). *Dehydration of potato II. Osmotic concentration and its effect on air drying behaviour*. J. Food Technol. (17), 387-403.
- Isse M. y Schubert T. (1991). *Osmotic dehydration of mango*. Proceedings of Fourth World Congress of Chemical Engineering, June 16-21, Karlsruhe, Germany, 738-745.
- Jena S. y Das H. 2005. *Modelling for moisture variation during osmo-concentration in apple and pineapple*. Journal of Food Engineering (66), 425-432
- Khan A.A. y Vincent J.F.V. (1990). *Anisotropy of apple parenchyma*. Journal of the Science of Food and Agriculture (52) (4), 450-460.
- Kim M.H. y Toledo R.T. (1987). *Effect of osmotic dehydration and high temperature on fluidized drying of rabbiteye blueberries*. J. Food Science (52) (4), 980-984, 989.
- Krokida M.K., Karathanos V.T. y Maroulis Z.B. (2000a). *Effect of osmotic dehydration on color and sorption characteristics of apple and banana*. Drying Technology (18), 937-950.

- Krokida M.K., Karathanos V.T. y Maroulis Z.B. (2000b). *Effect of osmotic dehydration on viscoelastic properties of apple and banana*. *Drying Technology* (18), 951-966.
- Labuza T.P. (1980). *The effect of water activity on reaction kinetics of food deterioration*. *Food Technol.* (34) (4), 36.
- Lazarides H.N. y 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.
- Lazarides H., Nickolaidis A. y Katsanidis E. (1995). *Sorption changes induced by osmotic pre-concentration of apple slices in different osmotic media*. *Journal of Food Sci.* (60), 348-350.
- Lenart A. y Flink J. (1983). *An improved proximity equilibration cell method for measuring water activity of food*. *Lebensm.-Wiss. u. Technol.* (16), 84.
- Lenart A. y Flink J. (1984a). *Osmotic concentration of potatoes I -Criteria for the end point of the osmotic process*. *J. Food Technol.* (19), 45-63.
- Lenart A. y Flink J. (1984b). *Osmotic concentration of potatoes II -Spatial distribution of the osmotic effect*. *J. Food Technol.* (19) 65-89.
- Lenart A. y Gródecka E. (1989). *Wplyw rodzaju substancji osmotycznej na kinetyke suszenia owiewowego jablek i marchwi*, *Ann. Warsaw Agric. Univ., Food Technol. and Nutr.* (18), 27.
- Lenart A. y Lewicki P.P. (1989). *Osmotic dehydration of apples at high temperature*. *Drying '89*, edited by A. S. Mujumdar, New York, Hemisphere Publishing Corporation, 7 – 14.
- Lenart A. y Lewicki P.P. (1995). *Osmotic dehydration of fruits and vegetables*. In *Handbook of Industrial Drying*, edited by A. S. Mujumdar, 2nd Edition, cap. 22, 691-713.
- Lericci C.R., Dalla Rosa D.M. y Pinnavaia G. (1983). *Direct osmosis as pretreatment to fruit drying*. In *Proceedings of 2nd Europ. Conf. on Food Chem.*, 287-296.
- Lericci C., Mastrocola D. y Pinnavaia G. (1986). *Esperienze di osmosi diretta ad alta temperatura per tempi brevi*. *Industria Conserve* (61), 223-225.

- Lerici C.R., Pepe N. y Pinnavaia G. (1977). *La disidratazione della frutta mediante osmosi diretta I. Risultati di esperienze effettuate in laboratorio*, Ind. Conserve (52), 1.
- Lerici C., Pinnavaia G., Dalla Rosa M. y Bartolucci L. (1985). *Osmotic dehydration of fruits. Influence of osmotic agents on drying behaviour and product quality*. J. Food Sci. (50), 1217-1226.
- Lewicki P.P., Lenart A. y Malkowska M. (1987). *Diffusive movement of substance in the carrot dehydrated osmotically in the sodium chloride solution*. Ann. Warsaw Agric. Univ., Food Technol. and Nutr. (17), 45.
- Lewicki P.P. y Lukaszuk A. (2000). *Effect of osmotic dewatering on rheological properties of apple subjected to convective drying*. Journal of Food Engineering (45), 119-126.
- Maestrelli A., Lo Scalzo R., Lupi D., Bertolo G. y Torreggiani D. (2001). *Partial removal of water before freezing: cultivars and pre-treatments as quality factors of frozen muskmelon (Cucumis melo, cv reticulatus Naud.)*. Journal of Food Engineering (49), 255-260.
- Magee T., Hassaballah A. y Murphy W. (1983). *Internal mass transfer during osmotic dehydration of apple slices in sugar solutions*. Int. J. Food Sci Technol. (7), 147-155.
- Maltini E. y Torreggiani D. (1985). *La disidratazione osmotica II. Possibilità d'impiego della concentrazione osmotica per la preparazione di conserve di frutta*. In Monografia N° 4. Progressi della Tecniche di Disidratazione di Frutta e Ortaggi, CNR-IPRA, Roma, 149.
- Maltini E., Torreggiani D., Bertolo G. y Stecchini M. (1983). *Recent developments in the production of shelf-stable fruit by osmosis*. Proceedings of 6th Int. Congress Food Sci and Technol., 177-178.
- Marcellin O. y Phan Phuc A. (1970). *Mesure de la surface spécifique des pommes*. Physiol. Vég. (8), 173-187.
- Marcotte M., Toupin C.J. y Le Maguer M. (1991). *Mass transfer in cellular tissues. Part I: The mathematical model*. Journal of Food Engineering (13), 199-220.

- Masters K. (1991). *Spray Drying Handbook*. Fifth edition. John Wiley & Sons, New York.
- Mastrocola D., Servini C. y Lerici C.R. (1987). *Prove di disidratazione per via osmotica della carota*. Ind. Conserve (62), 33.
- Mascheroni R.H. (1995). Apunte Curso de *postrado "Transferencia de calor en refrigeración, congelación, almacenamiento y descongelación de alimentos"*. Módulo Congelación - Métodos Numéricos.
- Mavroudis N.E., Gekas V. y Sjöholm I. (1996). *Osmotic dehydration of apples-effects of agitation and raw material characteristics*. *Journal of Food Engineering* (35), 191-209.
- Miller D. (1959). *Ternary isothermal diffusion and the validity of the Onsager reciprocity relations*. *J. Phys. Chem.* (63), 570-578.
- Miller D. (1960). *Thermodynamics of irreversible processes*. *Chemical Review*, 60.
- Monzini A. y Maltini E. (1986). *Nuovi orientamenti sulla trasformazione degli ortofrutticoli. Deidrocongelazione e trattamento osmotico*. *Industria Conserve* (61), 265-272.
- Moreira R. y Sereno A. (2003). *Evaluation of mass transfer coefficients and volumetric shrinkage during osmotic dehydration of apple using sucrose solutions in static and non-static conditions*. *Journal of Food Engineering* (57), 25-31.
- Monzini A. y Torreggiani D. (1985). *La Deidrocongelazione*. progressi della tecniche di disidratazione di frutta e ortaggi, CNR-IPRA, Roma, 103-128.
- Moy J.H., Lau N.B.H. y Dollar A.M. (1978). *Effects of sucrose and acids on osmotic-dehydration of tropical fruits*. *J. Food Proc. Pres.* (2), 131-135.
- Muhr A. y Blanshard J. (1982). *Diffusion in gels*. *Polymer* (23), 1012-1026.
- Nunes, M.C., Brecht, J.K., Morais, A.M. y Sargent, S.A. (1998). *Controlling temperature and water loss to maintain ascorbic acid levels in strawberries during postharvest handling*, *Journal of Food Science* (63), 1033-1069.
- Orikasa T., Wu L., Shiina T. y Tagawa, A. (2008). *Drying characteristics of kiwifruit during hot air drying*. *Journal of Food Engineering* (85), 303-308.

- Osorio C., Franco M.S., Castaño M.P., González-Miret M.L., Heredia F.J. y Morales, A.L. (2007). *Colour and flavour changes during osmotic dehydration of fruits*. Innovative Food Science & Emerging Technologies (8), 353-359.
- Pardio Sedas V., Waliszewski Kubiak K.N. y Garcia Alvarado M. (1994). *Ascorbic acid loss and sensory changes in intermediate moisture pineapple during storage at 30-40°C*. International Journal of Food Science and Technology (29), 551-557.
- Pavasonic V., Stefanovic M. y Stevanovic R. (1986). *Osmotic Dehydration of Fruit*. Drying '89, Ed. A. S. Mujumdar, Hemisphere Publishing Corporation, 761-764.
- Pinnavaia G., Dalla Rosa M. y Lerici C.R. (1983). *La disidratazione mediante osmosi diretta per la valorizzazione de prodotti vegetali*. En Atti 2° Convegno Nazionale Nutrizione Ambiente Lavoro (M. Coachi y T. G. Modena, eds.), 313.
- Ponting J. D. (1973). *Osmotic dehydration of fruits-Recent modifications and applications*. Process Biochem. (8), 18.
- Ponting J., Walters G., Forrey R., Jackson R. y Stanley W. (1966). *Osmotic dehydration of fruits*. Food Technology (20), 125-128.
- Rahman M. y Lamb J. (1990). *Osmotic dehydration of pineapple*. J. Food Sci Technol. (7) (3), 150-152.
- Ramallo L.A. y Mascheroni R.H. (2010). *Dehydrofreezing of pineapple*. Journal of Food Engineering (99), 269-275.
- Rastogi N.K., Raghavarao K., Niranjana K. y Knorr, D. (2002). *Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer*. Trends in Food Science & Technology (13), 48-59.
- Rastogi N.K. y Raghavarao K.S. M. S. (1995). *Kinetics of osmotic dehydration of coconut*. Journal of Food Process Engineering (18), 187-197.
- Raoult A-L., Lafont F., Rios G. y Guilbert S. (1989). *Osmotic dehydration: Study of mass transfer in terms of engineering properties*. Drying '89, edited by A. S. Mujumdar, New York, Hemisphere Publishing Corporation, 487-495.
- Raoult-Wack A-L. (1991). *Les procedes de deshydratation-impregnation par immersion dans des solutons concentrées. Etude experimentale et*

modelisations des transferts de matiere sur gel modele. PhD Thesis, University of Montpellier, France, 150.

- Raoult Wack A-L. (1994). *Osmotic dehydration a process with a promising future*. *Drying* 94 (1) (edited by A. S. Mujumbar), Elsevier Science Publishers, 51-61.
- Raoult Wack A-L. (1994). *Recent advances in the osmotic dehydration of food*. *Trends Food Sci Technol.* (5), 255.
- Raoult-Wack A-L., Botz O., Guilbert S. y Rios G. (1991). *Simultaneous water and solute transport in shrinking media - part 3. A tentative analysis of the spatial distribution of the impregnating solute in the model gel*. *Drying Technology* (9) (3), 631-642.
- Raoult-Wack A-L., Guilbert S., Le Maguer M. y Rios G. (1991). *Simultaneous water and solute transport in shrinking media- Part 1. Application to dewatering and impregnation soaking process analysis*. *Drying Technology* (9) (3), 589-612.
- Raoult-Wack A-L., Lenart A. y Guilbert S. (1992). *Recent advances in Dewatering through immersion in concentrated solutions (osmotic dehydration)*, *Drying of Solids*, Editor A. Mujumbar, Canada, International Science Publisher y Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd, 21-50.
- Riva, M., Campolongo, S., Leva, A., Maestrelli, A. y Torregiani, D. (2005). *Structure-property relationships in osmodehydrated apricot cubes*. *Food Research International* (38), 533-542.
- Robbers M., Singh R. y Cunha L. (1997). *Osmotic-convective dehydrofreezing process for drying kiwifruit*. *Journal of Food Sci.* (62) (5), 1039-1047.
- Sablani S. y Rahman S. (2003). *Effect of syrup concentration, temperature and sample geometry on equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of mango*. *Food Research International* (36), 65-71.
- Salvatori D.M., Doctorovich R. y Alzamora S.M. (2011). *Impact of calcium on viscoelastic properties of fortified apple tissue*. *Journal of Food Process Engineering* (34), 1639-1660.

- Sarosi H. y Polak A. (1976). *Possibilities of application of osmotic drying in food industry*. Tudományos Közlemények. Élelmiszeripari Foiszola (6), 63.
- Saurel R. (1995). *Deshydratation-impregnation par immersion en solutions ternaires: Etude des transports d'eau et de solutes sur gel et produits d'origine animal*. Dr. Thesis, Univ. de Montpellier.
- Saurel R., Raoult-Wack A-L., Rios G. y Guilbert S. (1994). *Mass transfer phenomena during osmotic dehydration of apple I. Fresh plant tissue*. International Journal of Food Sci. and Technol. (29), 531-542.
- Sereno A.M., Moreira R. y Martinez E. (2001). *Mass transfer coefficients during dehydration of apple in single and combined aqueous solutions of sugar and salt*. Journal of Food Engineering (47)(1), 43-49.
- Speck P., Escher F. y Solms J. (1977). *Effect of salt pretreatment on quality and storage stability of air-dried carrots*. Lebensm. -Wiss. u. Technol. (10), 308.
- Spiazzi E.A. y Mascheroni R.H. (1995). *Dehydrofreezing. Modelling of mass transfer in osmotic treatment and quality of osmo-frozen products*. Proceedings I, 19th International Congress of Refrigeration, The Hague, The Netherlands, August 20-25, 1995 (IIR/IIF), 299-306.
- Spiazzi E.A. y Mascheroni R.H. (1997). *Mass transfer model for osmotic dehydration of fruits and vegetables - 1. Development of the simulation model*. Journal of Food Engineering (34), 387-410.
- Succar J. y Hayakawa K. (1983). *Empirical formulae for predicting thermophysical properties of food at freezing or defrosting temperatures*. Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie (16) (6), 326-331.
- Talens P., Escriche I., Martínez-Navarrete N. y Chiralt A. (2002a). *Study of the influence of osmotic dehydration and freezing on the volatile profile of strawberries*. Journal of Food Science (67), 1648-1653.
- Talens P., Martínez-Navarrete N., Fito P. y Chiralt A. (2002b). *Changes in optical and mechanical properties during osmodehydrofreezing of kiwi fruit*. Innovative Food Science & Emerging Technologies (3), 191-199.

- Tocci A.M. y Mascheroni R.H. (1995). *Numerical models for the simulation of the simultaneous heat and mass transfer during food freezing and storage*. International Communications in Heat and Mass Transfer (22) (2), 251-260.
- Tocci A.M., Spiazzi E.A. y Mascheroni R.H. (1998). *Determination of specific heat and enthalpy of melting by Differential Scanning Calorimetry: Application to osmodehydrated fruits*. High Temperatures - High Pressures (30), 357-363.
- Torregiani D., Giangiacomo R. Bertolo G. y Abbo E. (1986). *Ricerche sulla disidratazione osmotica della frutta I. Idoneità varietale delle ciliege*. Ind. Conserve (61), 101-107.
- Torregiani D., Giangiacomo R., Bertolo G. y Abbo E. (1986). *Ricerche sulla disidratazione osmotica della frutta II. Idoneità varietale delle albicocche*. Ind. Conserve (61), 226-232.
- Torregiani D., Giangiacomo R., Bertolo G. y Abbo E. (1988). *Ricerche sulla disidratazione osmotica della frutta III. Idoneità varietale delle percoche*. Ind. Conserve (63), 223-228.
- Torreggiani D. y Bertolo G. (2001). *Osmotic pre-treatments in fruit processing: chemical, physical and structural effects*. Journal of Food Engineering (49), 247-253.
- Torres J., Talens P., Escriche I. y Chiralt A. (2006). *Influence of process conditions on mechanical properties of osmotically dehydrated mango*. Journal of Food Engineering (74), 240-246.
- Toupin C.J. y Le Maguer M. (1989). *Osmotically induced mass transfer in plant storage tissues: a mathematical model - Part 2*. Journal of Food Engineering (10), 97-121.
- Toupin C.J., Marcotte M. y Le Maguer M. (1989). *Osmotically induced mass transfer in plant storage tissues: a mathematical model - Part 1*. Journal of Food Engineering (10), 13-38.
- Tudela, J.A., Espín, J.C. y Gil, M.I. (2002). *Vitamin C retention in fresh-cut potatoes*. Postharvest Biology and Technology (26), 75-84.

- Uddin, M.S., Hawlader, M.N., Luo, D. y Mujumdar, A.S. (2002). *Degradation of ascorbic acid in dried guava during storage*. Journal of Food Engineering (51), 21-26.
- Vial C., Guilbert S. y Cuq J. (1991). *Osmotic Dehydration of Kiwifruits: Influence of process variables on the color and ascorbic acid content*. Sciences des Aliments (11) (1), 63-84.
- Waliszewski K.N., Cortés H.D., Pardo V.T. y García, M.A. (1999). *Color parameter changes in banana slices during osmotic dehydration*. Drying Technology (17), 955-960.
- Welti J. y Vergara, F. (1997). *Actividad del agua: Concepto y Aplicación en alimentos con alto contenido de humedad*. Temas en tecnología de alimentos Vol I. CYTED.

Apéndice

Tabla 1. Efecto de la temperatura sobre la Pérdida de agua (WL) y Ganancia de sólidos (SG) en cubos de manzana sometidos a DO con soluciones de glucosa, sacarosa, AAPM y maltodextrinas a 47° Brix y a 30°C, 40°C y 50°C.

T (°C)	t (h)	Glucosa		Sacarosa		AAPM		Maltodextrinas	
		WL(%)	SG(%)	WL(%)	SG(%)	WL(%)	SG(%)	WL(%)	SG(%)
30	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	1	16,9	1,4	11,4	0,0	8,5	0,4	1,7	0,0
	2	25,3	2,9	20,5	0,0	15,3	1,2	3,0	0,5
	4	33,8	3,8	29,1	1,9	20,1	1,6	6,8	1,4
	12	51,4	6,2	44,9	2,8	30,7	1,7	16,2	-0,8
	24	56,3	7,2	52,5	3,6	39,5	2,3	25,3	-1,1
40	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	1	24,6	3,2	17,8	2,6	10,6	0,5	3,4	0,2
	2	33,8	4,3	25,9	3,6	19,4	1,8	8,3	0,0
	4	43,7	7,0	36,3	4,7	26,3	1,9	13,6	-0,2
	12	57,1	8,2	50,3	4,3	39,9	2,7	24,6	-1,1
	24	58,1	9,0	55,7	5,7	47,3	2,3	38,4	-2,8
50	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	1	32,0	2,6	23,7	2,4	19,7	-0,4	3,9	0,0
	2	41,5	5,3	31,0	3,3	28,0	1,5	9,2	0,2
	4	50,4	6,7	40,1	3,9	33,9	1,9	27,2	-2,8
	12	61,8	8,8	59,9	5,3	63,7	-1,2	62,7	-7,2
	24	61,3	10,2	61,2	5,4	65,3	-1,3	69,2	-8,1

Tabla 2. Efecto de la concentración de la solución osmótica sobre la Pérdida de agua (WL) y Ganancia de sólidos (SG) de cubos de manzana tratados con soluciones de glucosa, fructosa, sacarosa y AAPM a 47° Brix y 69°Brix y 30°C.

°Brix	t (h)	<i>Glucosa</i>		<i>Fructosa</i>		<i>Sacarosa</i>		<i>AAPM</i>	
		WL(%)	SG(%)	WL(%)	SG(%)	WL(%)	SG(%)	WL(%)	SG(%)
47	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	1	16,9	1,4	16,3	1,0	11,4	0,6	8,5	0,4
	2	25,3	2,9	23,4	1,2	20,5	1,0	15,3	1,2
	4	33,8	3,8	32,5	2,5	29,1	1,9	20,1	1,6
	12	51,4	6,2	48,4	3,2	44,9	2,8	30,7	1,7
	24	56,3	7,2	56,0	3,1	52,5	3,6	39,5	2,3
69	0	**	**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	1	**	**	22,5	1,1	21,7	2,2	16,1	0,9
	2	**	**	33,1	1,7	29,4	3,2	26,4	1,0
	4	**	**	42,4	2,8	41,2	4,0	35,8	2,1
	12	**	**	61,5	3,2	60,8	4,7	54,3	3,1
	24	**	**	72,6	3,4	70,7	5,6	68,2	3,2

(**) La solución de máxima saturación para la glucosa corresponde a 47°Brix.

Tabla 3. Efecto del tipo de soluto de la solución sobre la Pérdida de agua (WL) y Ganancia de sólidos (SG) de cubos de manzana sometidos a DO con distintas soluciones a 47° Brix y 30°C.

t (h)		0	1	2	4	12	24
<i>Glucosa</i>	WL(%)	0,0	16,9	25,3	33,8	51,4	56,3
	SG(%)	0,0	1,4	2,9	3,8	6,2	7,2
<i>Fructosa</i>	WL(%)	0,0	16,3	23,4	32,5	48,4	56,0
	SG(%)	0,0	2,9	1,2	2,5	3,2	3,1
<i>Sacarosa</i>	WL(%)	0,0	11,4	20,5	29,1	44,9	52,5
	SG(%)	0,0	0,0	0,0	1,9	2,8	3,6
<i>Maltosa</i>	WL(%)	0,0	9,3	16,0	24,6	34,6	45,8
	SG(%)	0,0	0,3	0,4	0,5	1,2	-0,1
<i>AAPM</i>	WL(%)	0,0	8,5	15,3	20,1	30,7	39,5
	SG(%)	0,0	0,4	1,2	1,6	1,7	2,3
<i>Maltodextrinas</i>	WL(%)	0,0	1,7	3,0	6,8	16,2	25,3
	SG(%)	0,0	0,0	0,5	1,4	-0,8	-1,1

Tabla 4. Pérdida de agua (WL) y Ganancia de sólidos (SG) de cubos de manzana sometidos a DO con distintas soluciones a 47° Brix y 40°C.

t (h)		0	1	2	4	12	24
<i>Glucosa</i>	WL(%)	0,0	24,6	33,8	43,7	57,1	58,1
	SG(%)	0,0	3,2	4,3	7,0	8,2	9,0
<i>Sacarosa</i>	WL(%)	0,0	17,8	25,9	36,3	50,3	55,7
	SG(%)	0,0	2,6	3,6	4,7	4,3	5,7
<i>AAPM</i>	WL(%)	0,0	10,6	19,4	26,3	39,9	47,3
	SG(%)	0,0	0,5	1,8	1,9	2,7	2,3
<i>Maltodextrinas</i>	WL(%)	0,0	3,4	8,3	13,6	24,6	38,4
	SG(%)	0,0	0,2	0,0	-0,2	-1,1	-2,8

Tablas 5. Exudado correspondiente a discos de pera deshidratados con distintas soluciones osmóticas, congelados y descongelados durante 5 horas (valores calculados en base seca).

tiempo de deshidratación (h)	Exudado (%)			
	<i>Glucosa</i>	<i>Fructosa</i>	<i>Sacarosa</i>	<i>AAPM</i>
0	135,5	119,9	174,9	139,8
1	113,4	101,3	108,0	139,0
2	89,9	70,0	82,8	104,9
4	49,1	51,6	56,2	85,3
12	28,1	34,6	28,1	49,6
24	21,7	16,1	13,9	32,9

Tablas 6. Exudado correspondiente a frutillas enteras deshidratadas con distintas soluciones osmóticas, congeladas y descongeladas durante 5 horas (valores calculados en base seca).

tiempo de deshidratación (h)	Exudado (%)			
	<i>Glucosa</i>	<i>Fructosa</i>	<i>Sacarosa</i>	<i>AAPM</i>
0	342,6	183,7	170,2	210,3
2	410,0	192,8	243,4	205,9
4	361,2	181,0	264,2	133,6
8	246,6	63,3	214,2	135,7
12	128,8	31,4	119,3	119,3
18	68,3	20,5	64,3	67,8

Tablas 7. Exudado correspondiente a discos de kiwi deshidratados con distintas soluciones osmóticas, congelados y descongelados durante 5 horas (valores calculados en base seca).

tiempo de deshidratación (h)	Exudado (%)			
	<i>Glucosa</i>	<i>Fructosa</i>	<i>Sacarosa</i>	<i>AAPM</i>
0	131,8	86,8	124,6	96,5
1	78,0	52,2	75,9	61,9
2	67,6	52,2	64,1	60,3
4	58,4	38,5	37,9	52,7
12	36,1	17,7	24,5	28,8
24	28,2	11,7	13,4	20,2

Tablas 8. Exudado correspondiente a cubos de manzana deshidratados con distintas soluciones osmóticas, congelados y descongelados durante 5 horas (valores calculados en base seca).

tiempo de deshidratación (h)	Exudado (%)			
	<i>Glucosa</i>	<i>Fructosa</i>	<i>Sacarosa</i>	<i>AAPM</i>
0	213,2	189,4	182,6	189,5
1	122,1	117,1	99,4	117,7
2	85,0	76,2	75,1	96,1
4	52,0	52,3	50,8	67,2
12	43,5	29,5	25,3	44,7
24	29,1	16,7	15,1	24,9

Tablas 9. Textura (fuerza máxima) medida en discos de pera deshidratados, antes de congelar (ac) y luego de congelar – descongelar (dc).

Tiempo de desh (h)	Fuerza (N)							
	Glucosa		Fructosa		Sacarosa		AAPM	
	(ac)	(dc)	(ac)	(dc)	(ac)	(dc)	(ac)	(dc)
0	15,99	7,20	16,03	6,58	14,54	4,65	18,82	6,33
1	15,03	7,00	17,33	5,26	10,58	3,36	20,96	5,53
2	19,61	10,09	16,50	4,57	11,49	3,53	18,37	5,27
4	15,17	4,33	19,61	9,23	6,51	4,15	18,87	5,96
12	**	**	**	**	**	**	**	**
24	**	**	**	**	**	**	**	**

Tablas 10. Textura (fuerza máxima) medida en frutillas enteras deshidratadas, antes de congelar (ac) y luego de congelar – descongelar (dc).

Tiempo de desh (h)	Fuerza (N)							
	Glucosa		Fructosa		Sacarosa		AAPM	
	(ac)	(dc)	(ac)	(dc)	(ac)	(dc)	(ac)	(dc)
0	0,90	0,50	1,19	0,57	1,32	0,52	1,52	0,52
2	0,63	0,53	0,78	0,62	0,79	0,60	1,07	0,78
4	0,66	0,44	0,75	0,65	0,62	0,56	1,13	0,75
8	0,58	0,47	0,77	0,66	0,68	0,60	0,96	0,77
12	0,55	0,46	0,77	0,66	0,76	0,63	0,96	0,77
18	0,57	0,50	0,84	0,69	0,69	0,64	0,90	0,84

Tablas 11. Textura (fuerza máxima) medida en discos de kiwi deshidratados, antes de congelar (ac) y luego de congelar – descongelar (dc).

Tiempo de desh (h)	Fuerza (N)							
	Glucosa		Fructosa		Sacarosa		AAPM	
	(ac)	(dc)	(ac)	(dc)	(ac)	(dc)	(ac)	(dc)
0	1,78	0,27	2,15	0,30	1,77	0,20	1,67	0,20
1	1,43	0,28	2,11	0,24	1,41	0,27	1,70	0,30
2	1,43	0,18	2,07	0,27	1,40	0,18	1,51	0,13
4	1,23	0,24	1,85	0,29	1,52	0,16	1,53	0,15
12	0,94	0,25	1,50	0,30	1,21	0,20	1,21	0,15
24	0,59	0,27	1,11	0,40	1,03	0,40	1,07	0,18

Tablas12. Textura (fuerza máxima) medida en cubos de manzana deshidratados, antes de congelar (ac) y luego de congelar – descongelar (dc).

Tiempo de desh (h)	Fuerza (N)							
	Glucosa		Fructosa		Sacarosa		AAPM	
	(ac)	(dc)	(ac)	(dc)	(ac)	(dc)	(ac)	(dc)
0	10,07	9,45	10,77	9,91	12,31	9,85	11,58	9,82
1	11,02	8,94	11,53	8,38	14,75	10,81	12,56	9,80
2	11,10	8,51	11,49	8,72	16,00	10,54	11,82	10,72
4	10,11	9,01	11,46	10,21	16,01	10,03	11,90	11,68
12	**	**	**	**	**	**	**	**
24	**	**	**	**	**	**	**	**

Tablas 13, 14,15 y 16. Parámetros de color L*, a*, b* y ΔE* medidos en discos de pera deshidratados, antes de congelar (ac) y luego de congelar - descongelar (dc).

SACAROSA												
Tiempo de deshidratación (horas)												
	Fresca		1		2		4		12		24	
	ac	dc										
L*	80,50	57,34	80,41	57,43	82,08	59,94	81,94	63,80	84,90	66,97	84,36	70,82
a*	-3,02	3,80	-3,39	2,87	-3,18	3,40	-3,75	1,37	-3,10	3,33	-3,86	2,15
b*	12,88	20,41	13,71	17,77	13,64	18,95	14,59	17,74	16,53	22,10	20,20	24,90
ΔE*	0,00	25,31	1,69	24,32	2,03	22,45	2,74	17,98	5,75	17,58	8,38	16,37

AAPM												
Tiempo de deshidratación (horas)												
	Fresca		1		2		4		12		24	
	ac	dc										
L*	80,10	57,29	80,14	58,56	80,80	60,71	81,83	63,12	85,13	65,64	86,12	70,03
a*	-3,15	3,24	-3,41	3,29	-3,48	2,54	-3,19	4,38	-3,83	3,81	-4,29	3,68
b*	13,80	20,71	13,88	20,66	14,08	20,11	13,91	22,15	16,20	25,68	19,70	30,22
ΔE*	0,00	24,69	0,99	23,53	1,43	21,22	1,76	20,63	5,62	20,10	8,52	20,56

FRUCTOSA												
Tiempo de deshidratación (horas)												
	Fresca		1		2		4		12		24	
	ac	dc	ac	dc								
L*	80,42	53,01	81,02	53,12	82,08	53,99	84,04	57,10	85,86	61,79	87,03	67,77
a*	-3,44	2,68	-3,55	2,41	-3,71	2,36	-3,76	2,68	-4,33	2,21	-4,60	1,94
b*	13,60	17,95	14,43	17,52	15,04	17,23	15,29	17,83	18,13	20,49	22,19	22,46
ΔE*	0,00	28,43	1,98	28,25	3,36	27,32	4,92	24,51	7,72	20,69	11,04	16,38

GLUCOSA												
Tiempo de deshidratación (horas)												
	Fresca		1		2		4		12		24	
	ac	dc										
L*	79,99	53,77	81,57	56,88	82,30	55,37	82,61	55,33	82,40	59,40	79,42	60,83
A*	-3,73	2,81	-3,86	1,75	-3,93	2,03	-4,10	2,45	-3,87	2,28	-3,80	2,87
B*	13,67	18,97	14,45	17,07	15,42	18,58	16,64	18,90	18,67	20,94	21,72	24,04
ΔE*	0,00	27,56	1,98	24,05	3,17	25,75	4,42	25,97	5,57	22,69	8,67	22,76

Tablas 17, 18, 19 y 20. Parámetros de color L*, a*, b* y ΔE* medidos en frutillas deshidratadas, antes de congelar (ac) y luego de congelar - descongelar (dc).

SACAROSA												
Tiempo de deshidratación (horas)												
	Fresca		2		4		8		12		18	
	ac	dc	ac	dc								
L*	39,43	39,00	40,38	39,93	39,88	38,46	39,51	38,76	39,22	38,67	37,54	37,38
a*	31,64	28,34	30,09	27,57	29,27	28,19	28,77	26,14	27,23	24,49	27,35	25,42
b*	27,28	24,06	25,55	24,36	24,53	23,27	23,62	20,83	23,32	20,19	22,23	18,87
ΔE*	0,00	4,86	2,84	5,23	3,82	5,48	4,77	8,52	5,96	10,16	6,98	10,60

AAPM												
Tiempo de deshidratación (horas)												
	Fresca		2		4		8		12		18	
	ac	dc	ac	dc	ac	dc	ac	dc	ac	dc	ac	dc
L*	40,88	40,21	41,83	40,32	40,62	38,99	41,53	40,64	41,10	38,20	40,43	36,71
a*	32,81	26,76	29,87	25,94	29,48	25,30	27,71	24,43	24,59	21,98	23,49	20,61
b*	30,59	24,83	27,54	24,19	26,35	23,35	25,23	22,93	23,44	19,02	22,29	17,01
ΔE*	0,00	8,59	4,55	9,61	5,64	10,75	7,49	11,39	11,22	16,20	12,71	18,72

FRUCTOSA												
Tiempo de deshidratación (horas)												
	Fresca		2		4		8		12		18	
	ac	dc	ac	dc	ac	dc	ac	dc	ac	dc	ac	dc
L*	39,00	39,31	39,24	38,19	39,51	37,29	38,98	37,95	39,53	37,15	40,22	37,25
a*	32,02	27,28	28,66	27,37	27,60	26,71	26,40	23,94	26,40	23,94	25,49	23,12
b*	26,91	23,05	23,93	23,11	24,54	22,11	22,89	20,64	22,89	20,64	22,74	19,42
ΔE*	0,00	6,47	4,75	6,64	5,31	7,82	7,10	10,82	7,45	11,80	8,44	12,26

GLUCOSA												
Tiempo de deshidratación (horas)												
	Fresca		2		4		8		12		18	
	ac	dc										
L*	35,96	36,71	36,93	37,82	37,05	36,85	36,83	36,12	36,12	36,94	34,94	36,52
a*	31,63	28,19	29,43	28,81	28,68	28,93	28,33	28,73	28,01	27,13	26,90	26,76
b*	22,21	20,94	20,26	20,47	19,68	20,44	19,76	18,94	20,06	18,92	19,30	18,80
ΔE*	0,00	3,77	3,57	4,44	4,16	4,14	4,43	4,67	4,62	5,79	5,72	6,04

Tablas 21, 22, 23 y 24. Parámetros de color L*, a*, b* y ΔE* medidos en discos de kiwi deshidratados, antes de congelar (ac) y luego de congelar - descongelar (dc).

SACAROSA												
Tiempo de deshidratación (horas)												
	Fresca		1		2		4		12		24	
	ac	dc	ac	dc	ac	dc	ac	dc	ac	dc	ac	dc
L*	45,01	34,25	43,41	31,75	43,32	29,94	44,33	29,54	44,57	27,91	46,51	26,28
a*	9,07	11,94	7,16	8,53	6,55	8,59	6,10	8,23	6,41	7,07	7,02	7,30
b*	19,92	16,47	18,27	13,96	17,46	11,80	17,91	12,41	21,78	11,99	24,81	13,01
ΔE*	0,00	12,41	6,95	15,39	8,81	17,91	8,82	17,95	11,80	19,66	14,51	20,74

AAPM												
Tiempo de deshidratación (horas)												
	Fresca		1		2		4		12		24	
	ac	dc	ac	dc	ac	dc	ac	dc	ac	dc	ac	dc
L*	51,01	34,96	44,47	32,07	44,70	32,65	43,20	32,06	29,99	28,38	38,32	26,82
a*	9,57	12,42	8,73	10,74	7,49	10,82	7,48	10,20	6,02	7,60	6,00	7,57
b*	20,28	15,74	19,56	14,69	17,53	13,58	16,96	13,80	15,77	11,01	15,92	11,33
ΔE*	0,00	16,92	6,63	19,79	7,19	19,59	8,74	20,04	12,43	24,53	13,89	25,87

FRUCTOSA												
Tiempo de deshidratación (horas)												
	Fresca		1		2		4		12		24	
	ac	dc										
L*	47,69	34,61	47,38	34,24	46,58	33,57	44,93	30,11	41,53	26,82	40,72	26,69
a*	10,02	12,30	10,18	11,65	8,93	11,90	8,64	8,83	8,20	7,35	6,80	7,45
b*	20,59	17,10	21,72	16,41	20,05	16,79	19,20	13,73	20,03	13,93	20,35	12,56
ΔE*	0,00	13,73	1,18	14,18	1,64	14,75	3,38	18,91	6,45	22,07	7,69	22,63

GLUCOSA												
Tiempo de deshidratación (horas)												
	Fresca		1		2		4		12		24	
	ac	dc										
L*	42,34	32,42	42,04	33,16	42,56	31,93	43,19	30,48	45,39	30,58	42,30	28,88
a*	13,56	12,19	12,44	10,55	12,21	10,75	8,63	10,57	10,65	10,00	8,41	9,58
b*	20,97	15,87	19,39	14,98	19,42	14,75	17,60	15,46	22,88	16,03	19,24	15,22
ΔE*	0,00	11,24	1,96	11,37	2,07	12,44	5,02	13,41	4,62	13,24	5,43	15,16

Tablas 25,26, 27 y 28. Parámetros de color L*, a*, b* y ΔE* medidos en cubos de manzana deshidratados, antes de congelar (ac) y luego de congelar - descongelar (dc).

SACAROSA												
Tiempo de deshidratación (horas)												
	Fresca		1		2		4		12		24	
	ac	dc										
L*	75,88	50,97	77,61	55,68	79,36	57,57	80,91	60,02	83,29	64,52	83,28	67,35
a*	-7,18	-2,12	-6,67	-4,67	-6,96	-4,79	-7,43	-4,79	-7,57	-6,42	-5,80	-7,84
b*	19,04	28,48	16,70	24,73	16,92	27,00	19,30	27,00	21,03	28,70	23,07	27,73
ΔE*	0,00	27,12	3,04	21,30	4,19	20,15	5,06	18,26	7,70	15,17	8,88	12,56

AAPM												
Tiempo de deshidratación (horas)												
	Fresca		1		2		4		12		24	
	ac	dc	ac	dc								
L*	75,79	50,10	77,28	59,60	78,67	59,86	79,80	61,32	82,24	63,31	84,14	68,24
a*	-6,48	-2,78	-6,59	-6,81	-6,94	-6,43	-7,10	-6,71	-7,47	-6,00	-7,18	26,00
b*	14,72	24,23	15,80	19,45	17,06	21,48	17,62	22,15	20,28	26,89	23,22	27,64
ΔE*	0,00	27,66	2,32	16,94	4,24	17,33	4,99	16,28	9,06	17,45	12,03	13,97

FRUCTOSA												
Tiempo de deshidratación (horas)												
	Fresca		1		2		4		12		24	
	ac	dc	ac	dc								
L*	76,78	54,89	78,29	59,64	79,23	59,53	80,79	62,21	84,20	66,34	82,55	67,05
a*	-7,61	-5,25	-7,05	-6,91	-7,30	-6,07	-7,71	-6,65	-6,74	-6,80	-5,99	-8,16
b*	16,47	22,94	15,90	20,87	17,64	21,86	18,48	26,65	19,27	26,77	25,00	27,67
ΔE*	0,00	22,98	1,89	17,71	2,73	18,16	4,49	17,89	8,24	14,69	10,61	14,85

GLUCOSA												
Tiempo de deshidratación (horas)												
	Fresca		1		2		4		12		24	
	ac	dc										
L*	76,75	52,51	78,15	58,18	79,03	60,68	78,88	63,01	79,76	66,40	79,08	67,92
a*	-7,03	-4,01	-6,70	-6,42	-7,24	-7,88	-6,93	-8,31	-7,91	-9,15	-6,91	-9,11
b*	15,78	24,18	15,29	21,91	17,51	21,00	17,87	21,24	21,31	25,31	22,22	26,75
ΔE*	0,00	25,85	1,54	19,64	2,93	16,93	3,16	14,84	6,44	14,25	7,04	14,35