

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA COMBINACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE
DESHIDRATACIÓN APLICADAS EN TEJIDO DE PIÑA SOBRE EL
CONSUMO ENERGÉTICO DEL PROCESO Y LA CALIDAD DEL PRODUCTO
TERMINADO**

DOLLY ANDREA LEIVA RAMÍREZ



**Universidad
de La Sabana**

**UNIVERSIDAD DE LA SABANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN DISEÑO Y GESTIÓN DE PROCESOS
ÉNFASIS ALIMENTOS
MARZO, 2012**

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA COMBINACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE
DESHIDRATACIÓN APLICADAS EN TEJIDO DE PIÑA SOBRE EL
CONSUMO ENERGÉTICO DEL PROCESO Y LA CALIDAD DEL PRODUCTO
TERMINADO**

DOLLY ANDREA LEIVA RAMÍREZ

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN
DISEÑO Y GESTIÓN DE PROCESOS**

DIRECTOR

JOSÉ MAURICIO PARDO BENITO Ph.D

UNIVERSIDAD DE LA SABANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN DISEÑO Y GESTIÓN DE PROCESOS

ÉNFASIS ALIMENTOS

MARZO, 2012

AGRADECIMIENTOS

A Dios por Bendecirme en todo momento, por darme la sabiduría y la fortaleza para sacar adelante mis proyectos.

A mis Padres, hermanos y suegros por sus Oraciones y apoyo incondicional

A mi esposo Salomón Rincón y mi hijo Emmanuel, por su paciencia y amor.

Al Dr. José Mauricio Pardo Benito, por ser mi mentor y por enseñarme a ser mejor cada día.

Al Ingeniero Edwin Roa por el apoyo en el desarrollo del proyecto

A mis amigas y amigos por sus palabras de aliento y buenos deseos.

A Antonio, Pilar, Carito y Martica que siempre estuvieron dispuestos a colaborarme en el laboratorio.

A La Universidad de La Sabana por la educación que me brindaron y el apoyo financiero al presente proyecto

RESUMEN

La aplicación de tecnologías de deshidratación depende de la calidad de los productos y el consumo de energía durante el procesamiento, esto con el fin de que se obtengan productos apetecibles para los consumidores y que sean a la vez rentables a nivel industrial. En este proyecto pretratamientos de deshidratación osmótica y microondas son aplicados en forma individual y combinada previamente a procesos de liofilización para la obtención de piña deshidratada en trozos. Se evaluó el efecto de los pretratamientos sobre la calidad de las muestras, en términos de color, textura, contenido de vitamina C y propiedades sensoriales. Igualmente se analizó consumos de energía durante los procesos combinados. Se observó un mayor efecto en los cambios de color (28.4) y firmeza (43.8N) debido a los tratamientos osmóticos en los procesos combinados con microondas. Igualmente se obtuvo mayor retención de vitamina C (de 2-2,5 veces) en los pretratamientos con microondas a nivel individual (a 8 kW/kg), en comparación con los procesos osmóticos combinados. A nivel sensorial se presentó mayor aceptabilidad (del 90%) por las muestras dulces, es decir las sometidas a deshidratación osmótica (60 °Brix). En cuanto a color se observó la misma tendencia (a 60 °Brix) pero en procesos combinados con microondas (40 kW/kg). En términos de textura se observó mayor aceptación en tratamientos leves que no afectaron la estructura de la muestra: microondas a 8 kW/kg con deshidratación osmótica a 40 °Brix (73% de aceptación) y liofilización (67%). A nivel global en términos sensoriales las muestras preferidas fueron las sometidas a procesos de liofilización, como también las sometidas a tratamientos osmóticos (60 °Brix, 90 minutos). En términos de consumo energético pretratamientos combinados (a 20 kW/kg, 60 °Brix durante 150 minutos) presentaron ahorros hasta del 58% con respecto a procesos de liofilización (medido en kJ/kg de producto obtenido). Por el contrario pretratamientos con microondas a nivel individual (8 kW/kg) no son convenientes en términos de consumo energético. Finalmente los pretratamientos combinados de microondas- deshidratación osmótica y deshidratación osmótica se presentan como alternativas para el procesamiento de fruta deshidratada teniendo en cuenta los perfiles de exigencias tanto de productores como de consumidores.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCION.....	10
2.	OBJETIVOS.....	19
3.	CAPITULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA TECNOLOGÍAS DE DESHIDRATACIÓN Y SU EFECTO EN LAS PROPIEDADES DE LAS FRUTAS	20
	3.1 Artículo de Revisión – Review	20
	3.2 Efecto de las tecnologías de deshidratación sobre las propiedades de los tejidos en las frutas.....	50
	3.2.1 Efecto en la textura.....	50
	3.2.2 Efecto en contenido vitamínico	51
	3.2.3 Efecto en propiedades organolépticas	52
	3.2.4 Efecto en consumo de energía	53
4	CAPITULO 2. METODOLOGÍA	57
	4.1 Selección de la materia prima	57
	4.2 Preparación de las muestras	58
	4.3 Tratamientos preliminares	58
	4.3.1. Metodología para el análisis de consumo de energía y propiedades en el tejido.....	58
	4.3.2 Metodología para el análisis de cinética de deshidratación	61
	4.4 Aplicación de tecnologías combinadas con el proceso de liofilización -Procesos finales	65
	4.5 Métodos Analíticos	65
	4.5.1 Determinación del contenido de sólidos solubles	65
	4.5.2 Determinación del contenido de humedad	66
	4.5.3 Análisis de color	66
	4.5.4 Análisis de textura.....	67
	4.5.5 Análisis sensorial.....	67
	4.5.6 Análisis de vitamina	67
	4.5.7 Análisis consumo de energía	67
5	CAPITULO 3. RESULTADOS PRELIMINARES.....	69
	5.1 Introducción experimentos preliminares.....	69
	5.2 ARTÍCULO No 2. Effects of different pre-treatments on energy consumption during freeze drying of pineapple pieces.	69

5.3	ARTÍCULO No.3. Efectos de la aplicación de procesos osmóticos y secado por microondas sobre la cinética de deshidratación y la calidad en tejido de piña liofilizado.....	69
5.4	Discusión de resultados preliminares.....	84
6	CAPÍTULO 4. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y ORGANOLÉPTICAS EN PIÑA DESHIDRATADA	87
6.1	ARTÍCULO No. 4	87
	EFFECTO DE LA APLICACIÓN DEL CALENTAMIENTO POR MICROONDAS Y DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA COMO TECNOLOGÍAS PREVIAS AL PROCESO DE LIOFILIZACIÓN, SOBRE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y ORGANOLÉPTICAS DE PIÑA.....	87
7	CAPÍTULO 5. CONSUMO DE ENERGÍA.....	109
7.1	ARTÍCULO No.5.....	109
	CONSUMO DE ENERGÍA DE TECOLOGÍAS COMBINADAS DE DESHIDRATACIÓN APLICADAS EN TEJIDO DE PIÑA.....	109
8	CAPITULO 6. DISCUSIÓN GENERAL.....	128
9	CONCLUSIONES.....	140
10	RECOMENDACIONES	141
11	ANEXOS.....	143

TABLAS

Tabla 3.1.	Investigaciones de evaluación del color en fruta sometida a tecnologías de deshidratación.....	31
Tabla 3.2.	Investigaciones en evaluación del color para fruta sometida a combinación de tecnologías de deshidratación (TCD)	32
Tabla 5.1.	Pretratamientos de deshidratación seleccionados.....	86
Tabla 6.1	Condiciones de pretratamientos M y OD para análisis de propiedades fisicoquímicas y organolépticas.....	90
Tabla 7.1.	Pretratamientos seleccionados para evaluación de consumo energético.....	112
Tabla 7.2.	Ecuaciones para el cálculo de consumo de energía.....	114
Tabla 7.3.	Constante para la determinación del calor específico C_{pi}	115
Tabla 7.4.	Consumos de energía de los procesos combinados de secado.....	118
Tabla 7.5	Consumos de energía de frutas sometida a tecnologías individuales de deshidratación (TD).....	122
Tabla 7.6.	Consumos de energía de frutas sometida a tecnologías combinadas de deshidratación (TD).....	124
Tabla 8.1.	Análisis de varianza modelo sensorial- M_s	130
Tabla 8.2.	Análisis de varianza modelo Energía- M_w	131
Tabla 8.3.	Análisis de varianza modelo Vitamina- M_w	132
Tabla 8.4.	Evaluación de la calidad y consumo de energía para los pretratamientos seleccionados.....	133

FIGURAS

Figura 3.1.	Parámetros de color en frutas.....	34
Figura 3.2.	Espacio cromático de la fruta fresca.....	34
Figura 3.3.	Efectos de procesos de deshidratación en los cambios de color de tejido de fruta.....	36
Figura 3.4.	Impacto de las tecnologías de deshidratación en los parámetros de color L*, a* y b*.....	38
Figura 3.5.	Efectos de procesos de deshidratación en los cambios de luminosidad (ΔL^*) de tejido de fruta.	39
Figura 3.6.	Efectos de procesos de deshidratación en los cambios de Tono (ΔH^*) de tejido de fruta.....	41
Figura 4.1.	Diseño experimental procesos FD, ODFD, MFD y MDFD.....	60
Figura 4.2.	Diseño experimental proceso OD.....	61
Figura 4.3.	Diseño experimental proceso M.....	62
Figura 4.4.	Diseño experimental proceso MOD.....	63
Figura 5.1.	Pérdidas de humedad y ganancia de sólidos en muestras de piña sometidas a OD.....	77
Figura 5.2.	Pérdidas de humedad y Ganancia de Sólidos en muestras de piña sometidas a MOD.....	78
Figura 5.3.	Evaluación de firmeza en piña sometida a combinación de tecnologías preliminares	79
Figura 5.4.	Cambios de color ΔE en piña sometida a combinación de tecnologías preliminares.....	80
Figura 5.5.	Evaluación sensorial muestras sometidas a combinación de tecnologías preliminares.....	81
Figura 6.1.	Cambios de color ΔE en muestras de piña liofilizada sometida a pretratamientos combinados de M y OD.....	93
Figura 6.2.	Evaluación de firmeza (N) en muestras de piña liofilizada sometida a pretratamientos combinados de M y OD.....	96
Figura 6.3.	Evaluación sensorial en términos de color, sabor y textura en muestras de piña deshidratada.....	98
Figura 6.4.	Muestras con mayor aceptación en términos sensoriales.....	100
Figura 6.5.	Contenido de vitamina C en muestras sometidas a la combinación de tecnologías	102
Figura 7.1	Consumos de energía (%) durante las diferentes etapas de los procesos de deshidratación.....	117
Figura 8.1	Diagrama de alternativas de proceso enfocadas al consumidor.....	136
Figura 8.2	Diagrama de alternativas de proceso enfocadas al productor.....	138

ANEXOS

Anexo 1.	Certificado de presentación Poster en CIBIA VIII 2011.....	143
Anexo 2.	Artículo presentado en el libro de artículos y memorias CIBIA VIII 2011.....	144
Anexo 3.	Artículo publicado en memorias VII Seminario Internacional de Frutas Tropicales. Agroindustria e Innovación.....	151
Anexo 4.	Artículo Publicado en Revista de Ciencia y Tecnología de América Interciencia. Effects of different pre-treatments on energy consumption during freeze drying of pineapple pieces.....	156
Anexo 5.	Certificado de participación en ponencia. V Jornada de socialización de resultados de investigación.....	157
Anexo 6.	Análisis estadístico- cinética pretratamientos.....	158
Anexo 7.	Análisis estadístico-Color.....	165
Anexo 8.	Análisis estadístico-textura.....	166
Anexo 9.	Procedimiento cuantificación vitamina C por HPLC.....	167

1. INTRODUCCION

Es creciente el interés de las entidades públicas y del consumidor en general por tener una dieta más equilibrada, especialmente en el consumo de alimentos con mayor contenido de fibra dietaria, vitaminas y minerales, así como menor proporción de carbohidratos, grasas y aceites (Kearney, 2010).

La actual producción mundial de fruta y hortalizas frescas es de 1350 millones de toneladas métricas (MTM), un 43% más con respecto al decenio 1994-2003. De ésta cifra, 1050 MTM se producen en países de desarrollo. La producción de fruta fresca es de aproximadamente 488 MTM de los cuales 369 se producen en países en desarrollo (Elhadi, 2009). La organización de la salud recomienda el consumo de al menos 400g de fruta y hortalizas al día, sin embargo el consumo medio es mucho menor en la mayoría de los países. Para lograr éste consumo medio (146 Kg/año/persona) es necesario que el mundo disponga de 876 MTM/año. Esto significa que se produce mucho más de lo necesario para asegurar el consumo mínimo, más aun cuando la media actual del consumo es de aproximadamente 200 g/día/persona, lo cual indica que sólo necesitaríamos una tercera parte (alrededor de 438 MTM) de lo que se produce actualmente (Elhadi, 2009). Sin embargo, las pérdidas de poscosecha en frutas y hortalizas a nivel mundial son del orden de 5-25% en países desarrollados y de 20-50% en países en desarrollo, éstas pérdidas hacen que en algunas regiones no se pueda cumplir ni si quiera con el consumo mínimo recomendado.

Por lo anterior, todos los métodos que permitan alargar la vida útil de las frutas y hortalizas son de vital importancia para asegurar el aprovisionamiento de estos alimentos a las comunidades que lo requieran. Es así, que el desarrollo de nuevas tecnologías de deshidratación, que además de alargar la vida útil mantengan las

propiedades de las materias primas, son un aporte tecnológico a la solución de este reto de nutrición mundial.

La deshidratación ha sido considerada como uno de los principales métodos de conservación (Zhang *et al.*, 2010) reduciendo la actividad de agua de frutas y verduras de tal manera que no sean los productos fácilmente susceptibles a la descomposición microbiana y reacciones enzimáticas indeseables (Bórquez *et al.*, 2010). Por su parte, la liofilización es una de las mejores tecnologías de deshidratación utilizadas para la conservación de las propiedades organolépticas y nutricionales de los productos biológicos (Fahloul *et al.*, 2009; Marques *et al.*, 2006). Consiste en la eliminación del agua de un producto por medio de la sublimación y aunque permite obtener productos de alta calidad, estos tienden a ser costosos debido a los consumos de energía y tiempos de proceso (Wang *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2009b).

En general, es un reto a nivel industrial el desarrollo de alimentos deshidratados que suplan una demanda cada más exigente. Los consumidores potenciales se enfocan en productos de alta calidad y a bajo costo, por tanto es importante desarrollar las tecnologías de deshidratación que permitan producir alimentos con propiedades fisicoquímicas, nutricionales y organolépticas aceptables para el consumidor y altos rendimientos para el productor. En investigaciones previas se han combinado procesos de liofilización con otras tecnologías de secado donde se han encontrado posibilidades de escalamiento industrial debido a la reducción del costo del producto final. Algunas se han enfocado en analizar varios tratamientos para reducir el consumo de energía durante FD (Xu *et al.*, 2006; Reyes *et al.*, 2008), otros han intentado reducir el tiempo de proceso y mejorar la transferencia de calor; y por último se ha investigado tecnologías de deshidratación combinadas que han demostrado un efecto favorable sobre la transferencia de masa durante el proceso y las propiedades fisicoquímicas de los productos (Andrés *et al.*, 2007; Pardo & Leiva, 2009; Orsat *et al.*, 2007).

La deshidratación osmótica es una de las tecnologías que ha sido utilizada como pretratamiento de procesos como liofilización y secado por aire caliente (Tortoe, 2010). Consiste en extraer agua de un producto que se sumerge en una solución osmótica hipertónica (Ispir & Togrul, 2009), ocasionando difusión simultánea de agua y solutos a través de la membrana celular. Aunque permite retención de propiedades fisicoquímicas, nutrientes, propiedades sensoriales y compuestos volátiles (Pereira *et al.*, 2007; Fahloul *et al.*, 2009), se obtienen productos parcialmente deshidratados, lo cual hace que esta tecnología deba ser combinada con otras para la obtención de productos estables en condiciones medioambientales estándar (Marques *et al.*, 2006; Andrés *et al.*, 2007).

El secado con microondas también ha sido aplicado como pretratamientos en procesos de liofilización (Cui *et al.*, 2008; Huang *et al.*, 2009b; Duan *et al.*, 2010; Pardo & Leiva, 2010). Mediante la aplicación de campos electromagnéticos las moléculas polares (generalmente agua), presentan rápida absorción de la energía emitida, causando fricción entre estas. Este mecanismo produce aumento en la temperatura del producto y evaporación, generando menor tiempo de secado, ahorro en términos energéticos, así como buena calidad de las frutas, relacionada con el color y sabor (Orsat *et al.*, 2007; Bórquez *et al.*, 2010; Azarpazhooh *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2009b). En cuanto a la textura, presenta una desventaja debido a que si la potencia no es controlada se puede llegar a degradar la estructura del producto, presentar reducción de volumen (Li *et al.*, 2010a; Wu *et al.*, 2010), afectando así la porosidad, la capacidad de rehidratación y por ende la textura (Andrés *et al.*, 2007).

En el presente trabajo se busca evaluar los procesos de deshidratación osmótica y microondas como pretratamientos de la liofilización, con el fin de obtener menores niveles de consumo energético durante este proceso. Así mismo se estudiará el efecto de estos sobre algunos atributos del tejido de piña en términos de contenido de vitamina C, textura, color y propiedades organolépticas. De esta manera se podrán

dar las bases para el desarrollo de procesos alternativos, combinando tecnologías orientadas a la obtención de diferentes perfiles de fruta deshidratada.

Por último es importante mencionar que este proyecto fue financiado por la convocatoria interna de menor cuantía de proyectos de investigación y desarrollo tecnológico - año 2010 de La Universidad de la Sabana.

ALCANCE DEL PROYECTO

El presente proyecto se planteó con el fin estudiar el efecto de diferentes tecnologías aplicadas como pretratamiento sobre el consumo energético y las propiedades de trozos de piña que se liofilizan. Lo anterior con el fin de buscar un proceso más económico que la liofilización pero que no presente efectos adversos sobre la calidad del producto. Este proyecto da las bases a nivel laboratorio para plantear una combinación de proceso que a escala industrial cumpla con los propósitos de favorecer al consumidor, con un producto de calidad similar al liofilizado, y al procesador, con un producto menos costoso.

La investigación permitió encontrar procesos combinados que reducen el consumo de energía en comparación con el proceso de liofilización sin pretratamiento, mayor retención de vitamina C, mayores cambios de color con respecto a la fruta fresca, incremento en la firmeza y aceptación del producto por parte de consumidores potenciales. Estos resultados permiten pensar en diferentes opciones para el procesamiento de frutas deshidratadas.

De continuarse con el escalamiento de los procesos combinados, se esperaría que los resultados del proyecto beneficiarán al sector frutícola, generando opciones de agregación de valor y reducción de pérdidas en postcosecha. Así mismo, disminución de consumos de energía durante procesos de deshidratación por

liofilización. Finalmente desarrollo de una nueva línea de productos (deshidratados) dirigidos al mercado nacional e internacional.

ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este documento se ha desarrollado con la recopilación de artículos, algunos publicados y otros por publicar en revistas relacionadas con el tema del proyecto como: Drying Technology, Food Engineering Reviews, Journal of Food Engineering o LWT-Food Science and Technology.

Algunos capítulos se utilizan como documento de enlace que permite al lector dar coherencia a todo el documento. Hay 6 capítulos que se describen a continuación:

Capítulo 1. Revisión bibliográfica. Tecnologías de deshidratación y su efecto en las propiedades de las frutas.

En este capítulo se presenta un artículo de revisión –Review- titulado: “Efecto de las tecnologías de deshidratación en el color de frutas deshidratadas” donde se describe el mecanismo, ventajas y desventajas de tecnologías como liofilización, deshidratación osmótica y microondas, aplicadas en el proyecto. Así mismo se analiza el color del tejido de diferentes frutas sometidas a éstas tecnologías. En éste capítulo también se describen los efectos de las tecnologías de deshidratación sobre la textura, retención de vitaminas y percepción sensorial de frutas deshidratadas, así como el consumo de energía de los procesos.

Capítulo 2. Metodología

Aquí se describen las condiciones de los procesos aplicados en los experimentos preliminares y finales. Igualmente se presentan los métodos de análisis utilizados para la evaluación de color, textura, contenido vitamínico y percepción sensorial de las muestras sometidas a la combinación de tecnologías propuestas, así como el procedimiento para el análisis de consumo de energía durante los procesos.

Capítulo 3. Resultados preliminares

En éste capítulo se presentan los resultados de los experimentos preliminares por medio de dos artículos:

“Effects of different pre-treatments on energy consumption during freeze drying of pineapple pieces”, donde se hace un análisis del consumo de energía durante la combinación de procesos de deshidratación en tejido de piña. Este artículo fue publicado en la revista de Ciencia y Tecnología de América-Interciencia (Pardo & Leiva, 2010).

“Efectos de la aplicación de procesos osmóticos y secado por microondas sobre la cinética de deshidratación y la calidad en tejido de piña liofilizado”. en éste artículo se analizan las pérdidas de humedad y ganancia de sólidos en trozos de piña sometida a la combinación de procesos de microondas y osmóticos. Igualmente se evalúa textura, color y propiedades sensoriales del tejido liofilizado.

Capítulo 4. Propiedades fisicoquímicas y organolépticas en piña deshidratada.

Este capítulo representa los resultados de los objetivos 1 y 2. Se presenta en forma de un artículo titulado: “Efecto de las tecnologías combinadas de deshidratación sobre las propiedades fisicoquímicas y organolépticas en tejido de piña”. En éste

artículo se analizan textura, color, vitamina y percepción sensorial de piña sometida a procesos de deshidratación osmótica, microondas y liofilización.

Capítulo 5. Consumo de energía.

Este capítulo se presenta en forma de artículo bajo el título: “Consumo de energía de tecnologías combinadas de deshidratación aplicadas en tejido de piña”. En éste artículo se hace una comparación del consumo de energía usando diferentes combinaciones de procesos aplicados para la obtención de piña deshidratada.

Capítulo 6. Discusión general

En este capítulo se realiza una discusión general de los resultados obtenidos para los objetivos planteados en el trabajo de tesis. Asimismo se presentan alternativas para el procesamiento de fruta deshidratada con base en diferentes perfiles de exigencias en calidad nutricional, sensorial y consumo energético.

DIVULGACIÓN DE RESULTADOS

A continuación se listan las publicaciones realizadas durante el desarrollo del proyecto:

- Efectos de pretratamientos de deshidratación sobre el consumo de energía y transferencia de masa en tejido de piña liofilizado. En: VIII Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos - CIBIA. Peru, 2011. (Anexo 1. Certificado de presentación Poster en CIBIA VIII 2011).
- Efectos de pretratamientos de deshidratación sobre el consumo de energía y transferencia de masa en tejido de piña liofilizado. En: VIII Congreso

Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos – CIBIA VIII. Peru, 2011. (Anexo 2 - Artículo que fue presentado en el libro de artículos y memorias).

- “Efectos de diferentes pretratamientos en el consumo de energía durante la liofilización de piña”. En: VII Seminario Internacional de Frutas Tropicales. Agroindustria e Innovación. Universidad Pontificia Bolivariana, 22 y 23 de Julio Medellín. 2010. (Anexo 3 - Artículo publicado en memorias)
- Effects of different pre-treatments on energy consumption during freeze drying of pineapple pieces. Artículo Publicado en Revista de Ciencia y Tecnología de América-Interciencia. Vol. 35, núm. 12, 2010, pp. 934-938(Anexo 4 - Artículo publicado en Interciencia)
- Aplicación de tecnologías eficientes para el procesamiento de frutas de alta calidad. En: V Jornada de socialización de resultados de investigación. Del 26-28 de Octubre 2011. Presentación oral. Universidad La Sabana. (Anexo 5. Certificado de participación en ponencia)

REFERENCIAS

- Andrés A, Fito P, Heredia A & Rosa EM (2007). Combined drying technologies for development of high-quality shelf-stable mango products. *Drying Technology* 25: 1857-1866.
- Azarpazhooh E. and Ramaswamy H. S (2010). Microwave-Osmotic Dehydration of Apples Under Continuous Flow Medium Spray Conditions: Comparison with Other Methods. *Drying Technology* 28: 49-56.
- Bórquez, R.M., Canales E.R. y Redon. J.P (2010). Osmotic dehydration of raspberries with vacuum pretreatment followed by microwave-vacuum drying. *Journal of food Engineering* 99: 121-127
- Cui Z. W., Li CH. Y (2008). Song Ch.F. and Song Y. Combined microwave vacuum and freeze drying of carrot and apple chips. *Drying Technology* 26: 1517-1523.
- Duan X., Zhang M., Mujumdar A. S. and Wang R (2010). Trends in Microwave-Assisted Freeze Drying of Foods. *Drying Technology* 28: 444-453.
- Elhadi, M (2009). ¿Es necesario producir más frutas y verduras en el mundo?. Sitio Web Horticultura Internacional. <http://www.horticom.com/revistasonline/extras/extra09/extra09.pdf> (último acceso: 10 de Septiembre de 2011).
- Fahloul D., Lahbari M., Benmoussa H. and Mezdour S (2009). Effect of osmotic dehydration on the freeze drying kinetics of apricots. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 7: 117-121.
- Huang L., Zhang M., Mujumdar A. and Sun D (2009b). Studies on Decreasing Energy Consumption for a Freeze-Drying Process of Apple Slices. *Drying Technology* 27: 938-946.

- Ispir A. and Togrul I (2009). Osmotic dehydration of apricot: kinetics and the effect of process parameters. *Chemical Engineering research and design* 87: 166-180
- Kearney J (2010). Food consumption trends and drivers. *Philosophical Transactions of the Royal society Biological Sciences* 365: 2793–2807.
- Li Z., Raghavan G.S.V. and Orsat V (2010a). Optimal power control strategies in microwave drying. *Journal of Food Engineering* 99: 263–268.
- Marques L., Silveira A., y Freire J. (2006). Freeze drying characteristics of tropical fruits. *Drying Technology* 24: 457-463.
- Orsat V., Yang W., Changrue V. and Raghavan G.S. V (2007). «Microwave assisted drying of materials.» *Food and Bioproducts Processing* 85: 255-263.
- Pardo M & Leiva A (2009). Combination of technologies for the dehydration of pineapple. *Ingeniería y Competitividad*, 11: 57 -65.
- Pardo, M. & Leiva A (2010). Effect of different pre-treatments on energy consumption during freeze drying of pineapple pieces. *Revista de Ciencia y tecnología de América –Interciencia* 35: 934-938.
- Pereira N, Marsaioli A. and Ahrné L (2007). Effect of microwave power, air velocity and temperature on the final drying of osmotically dehydrated bananas. *Journal of Food Engineering* 81: 79-87.
- Reyes A, Vega R, Bustos R y Araneda C (2008). Effect of processing conditions on drying kinetics and particle microstructure of carrot. *Drying Technology*, 26: 1272-1285.
- Tortoe C (2010). A review of osmodehydration for food industry. *African Journal of Food Science* 4: 303-324.
- Wang Z., Fang S. and Hu X. (2009). Effective Diffusivities and Energy Consumption of Whole Fruit Chinese Jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) in Microwave Drying. *Drying Technology: An International Journal* 27: 1097 – 1104.
- Wu G., Zhang M., Mujumdar A.S and Wang R (2010). Effect of Calcium Ion and Microwave Power on Structural and Quality Changes in Drying of Apple Slices. *Drying Technology* 28: 517-522.
- Xu Y, Zhang M, Mujumdar AS, Duan X & Jin-Cai S (2006). A two-stage vacuum freeze and convective air drying method for strawberries. *Drying Technology* 24: 1019-1023.
- Zhang M., Jiang H. y Rui-Xin L (2010). Recent Developments in Microwave-Assisted Drying of Vegetables, Fruits and Aquatic Products- Drying kinetics and Quality Considerations. *Drying Technology* 28: 1307-1316.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar el efecto al aplicar combinación de tecnologías de deshidratación en tejido de piña, sobre el consumo energético del proceso y la calidad del producto terminado.

2.2 Objetivos específicos

- Estudiar el efecto de procesos de liofilización con pretratamientos de microondas y deshidratación osmótica sobre el contenido de vitamina C, color y textura en muestras de piña.
- Evaluar a nivel sensorial las muestras de piña obtenidas a partir de la combinación de procesos de deshidratación.
- Cuantificar el consumo energético de los procesos combinados de deshidratación.
- Diseñar alternativas de proceso de deshidratación con combinación de tecnologías, mediante un modelo empírico orientadas a diferentes perfiles de exigencias en calidad nutricional, sensorial y consumo energético.

3. CAPITULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA TECNOLOGÍAS DE DESHIDRATACIÓN Y SU EFECTO EN LAS PROPIEDADES DE LAS FRUTAS

3.1 Artículo de Revisión – Review

EFFECTO DE LAS TECNOLOGÍAS DE DESHIDRATACIÓN EN EL COLOR DE FRUTAS DESHIDRATADAS.

Resumen

Este artículo presenta la revisión de 135 artículos relacionados con los últimos avances en tecnologías de tercera y cuarta generación como deshidratación osmótica, liofilización y microondas, así como la combinación entre éstas y otras tecnologías. Se enfoca en trabajos que evalúan el efecto de estos procesos en la calidad del producto y especialmente en términos de color de frutas deshidratadas, por ser una de las propiedades organolépticas más importantes para el consumidor. En el presente artículo se analizan frutas como kiwi, papaya, mango, piña, manzana, banano y fresa. En general se observaron más investigaciones en éstos 3 últimos tejidos. Así mismo se encontró una mayor cantidad de estudios de deshidratación osmótica y secado por aire caliente, en comparación con procesos de calentamiento por microondas y liofilización. También se observó que el 70 % de los valores de cambio de color medido como ΔE , se encuentran entre 7.9-22, con respecto a la fruta fresca. La mayor influencia en los cambios de color es ejercida por cambios en la luminosidad del tejido (parámetro L^*). Finalmente se encontró que los procesos de calentamiento con microondas podrían tener un impacto negativo en la aceptabilidad de los productos deshidratados, especialmente de kiwi y banano, por presentar mayores cambios de tono con respecto a la fruta fresca.

Palabras Clave: liofilización, Calentamiento por microondas, deshidratación osmótica, calidad, color, fruta.

INTRODUCCIÓN

En las regiones agrícolas es común la deshidratación de bioproductos con el fin de alargar su vida útil, reducir las pérdidas por excesos de cosecha y reducir el peso de transporte (Sagar & Suresh, 2010; Sun, 2005). Este proceso de deshidratación se puede llevar a cabo utilizando diferentes tecnologías las cuales han sido clasificadas en 4 grandes grupos denominados generaciones (Vega *et al.*, 2001). En la primera generación se incluye principalmente el secado por convección para la obtención de granos, frutas y verduras que puedan ser almacenadas a temperatura ambiente. La segunda generación involucra secadores por aspersion y secadores de tambor para la producción de polvos; en la tercera se incluyen tecnologías como deshidratación osmótica y liofilización las cuales evitan el daño térmico de los productos y pueden minimizar la pérdida de características valoradas en los productos frescos como el aroma, sabor y color. Finalmente, en la cuarta generación se han incluido tecnologías como secado al vacío, lecho fluidizado, ventanas refractivas, radio frecuencia y microondas. Esta clasificación hecha por Vega y colaboradores también se relaciona con el desarrollo histórico del procesamiento de alimentos, que en principio se enfocó en la producción a gran escala (generaciones 1 y 2) y más recientemente en el efecto sobre la calidad de los productos (generaciones 3 y 4). Así mismo, las tecnologías de tercera y cuarta generación están relacionadas con las tendencias mundiales que muestran grupos crecientes de consumidores interesados en alimentos saludables, fáciles de preparar, fáciles de almacenar y apetecibles (Sloan, 2007; Barrett *et al.*, 2010; Kearney, 2011).

La industria procesadora de alimentos actualmente tienen el reto de satisfacer a un cliente cada vez más exigente e informado y las empresas de deshidratación no se quedan por fuera. Por lo tanto es importante seguir avanzando en el desarrollo de tecnologías que permitan obtener alimentos con propiedades fisicoquímicas, nutricionales y organolépticas aceptables para el consumidor. El presente artículo se inserta en este contexto haciendo una revisión de investigaciones recientes que estudian el efecto de la deshidratación sobre una de las propiedades organolépticas más

importantes: el color (Barrett *et al.*, 2010). La bibliografía se organizó por tipos de fruta que fueron sometidas a tres diferentes tecnologías de tercera y cuarta generación - liofilización, microondas, deshidratación osmótica-.

Este documento no recoge todos los estudios desarrollados con deshidratación por convección, por tanto se invita al lector interesado a buscar revisiones hechas con anterioridad (Ratti, 2009; Askari *et al.*, 2009; Contreras *et al.*, 2007; Pereira *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2006; Mujumdar, 2007; Vega *et al.*, 2001).

TECNOLOGÍAS DE DESHIDRATACIÓN

- **Liofilización**

El proceso de liofilización (FD) se fundamenta en la sublimación del agua congelable (Wang *et al.*, 2010; Marques *et al.*, 2006; Ratti, 2001), con lo cual se debe llevar al producto debajo del punto triple del agua (273.2 K., presión parcial de vapor 611.7 Pa.). Estas condiciones se logran fácilmente en alto vacío por lo tanto en el equipamiento tradicional se incluyen bombas de alto vacío, bombas de calor y cámaras resistentes a presiones negativas. Este proceso se puede dividir en 3 etapas, congelación por debajo de la temperatura de transición vítrea, sublimación en alto vacío y desorción de agua no congelable (Sagar & Suresh, 2010; Erdogdu, 2009). También se han estudiado procesos de FD a presión atmosférica utilizando grandes flujos de aire u otro gas seco que permita mantener la presión parcial de vapor de agua por debajo del punto triple (Mujumdar, 2007), sin embargo no existen referencias de su aplicación industrial.

Los productos obtenidos a partir de FD, son reconocidos por su calidad, así que es común encontrar en la literatura éste método como referencia en procesos de deshidratación (Jiang *et al.*, 2010; Beaudry *et al.*, 2004; Marques *et al.*, 2009). FD permite preservar pigmentos, sabores, aromas, nutrientes y la estructura en los alimentos

(Wu *et al.*, 2010; Fahloul *et al.*, 2009; Krokida & Philippopoulos, 2006; Sagar & Suresh, 2010; Kopjar *et al.*, 2008). También permite obtener productos de baja densidad y alta capacidad de rehidratación (Krokida & Maroulis, 2000; Wang *et al.*, 2010); Sin embargo, FD es también conocida por sus tasas de secado lento, el alto costo de la operación y la baja eficiencia energética cuando se compara con otras tecnologías (Marques *et al.*, 2006; Ratti, 2001; Wu *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2009b; Cui *et al.*, 2008).

Debido a lo anterior, se ha suscitado el interés de replicar los efectos de FD con menores costos, lo cual se refleja en las publicaciones de las últimas dos décadas. Algunos de estos estudios se han centrado en la supresión del costo de generación de alto vacío y por lo tanto los esfuerzos se concentraron en el desarrollo de equipos de FD atmosférica (Mujumdar, 2007). Otros han intentado varias combinaciones de tratamientos para reducir el consumo de energía durante el FD (Huang *et al.*, 2009b; Xu *et al.*, 2006; Reyes *et al.*, 2008), otros reducir el tiempo por mejorar la transferencia de calor (Duan *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2006). Por último hay un grupo de estudios que buscan reproducir los efectos de FD utilizando otras tecnologías. Este último es el caso de los tratamientos combinados, como deshidratación osmótica y secado por aire caliente (Moreno *et al.*, 2010; Fernandes *et al.*, 2006; Mandala *et al.*, 2005), deshidratación osmótica y microondas (Bórquez *et al.*, 2010; Andrés *et al.*, 2007; Li & Ramaswamy, 2006; Pardo & Leiva, 2009), calentamiento por microondas y FD (Cui *et al.*, 2008; Huang *et al.*, 2009b; Duan *et al.*, 2010; Pardo & Leiva, 2010), radiación infrarroja y FD (Pan *et al.*, 2008; Shih *et al.*, 2008), aire caliente y FD (Xu *et al.*, 2006), microondas y secado de aire caliente (Kassem *et al.*, 2011) entre otras. Algunas de estas combinaciones han demostrado un efecto favorable sobre la transferencia de masa durante el proceso, consumo de energía y las propiedades de los productos, como apariencia, sabor, color, rehidratación y contenido nutricional.

- **Deshidratación osmótica**

La deshidratación osmótica (OD) se basa en la transferencia de masa por diferencia de potencial químico y el mecanismo más utilizado es la inmersión del alimento en una solución hipertónica (Pereira *et al.*, 2006; Azarpazhooh & Ramaswamy, 2010; Lombard *et al.*, 2008; Torreggiani & Bertolo, 2004), que genera una difusión simultánea de agua y solutos (Antonio *et al.*, 2004; Ispir & Togrul, 2009b), debido al gradiente de concentración entre la solución osmótica y el producto (Andrés *et al.*, 2007). El proceso se puede realizar a presión atmosférica y/o presión subatmosférica (vacío). Básicamente cuando se deshidrata a presión atmosférica se presentan los fenómenos de osmosis y difusión, mientras que a presiones bajas (vacío) se presentan los mecanismos hidrodinámicos HDM (Fito & Chiralt, 1997). OD da lugar a tres tipos de transferencia de masa en contracorriente: transferencia de agua del producto a la solución osmótica, transferencia de soluto de la solución al producto y salida de solutos nativos (azúcares, ácidos orgánicos, minerales y vitaminas) del producto hacia la solución, considerándose esta última como despreciable por algunos autores (Sablani & Rahman, 2003; Van *et al.*, 2001). Entre los principales factores que afectan este proceso están la temperatura, el tiempo de inmersión, la presión, la composición y concentración de la solución, el tamaño y la geometría de la muestra a deshidratar, la relación masa - solución (Ispir & Togrul, 2009a), así como la microestructura del tejido (Chiralt & Fito, 2003).

El proceso OD permite retener los pigmentos naturales, el contenido nutricional y los compuestos volátiles (Antonio *et al.*, 2004; Sanjinez *et al.*, 2005), así como disminuir las reacciones de pardeamiento enzimático (Bórquez *et al.*, 2010; Drouzas *et al.*, 1999; Sagar & Suresh, 2010) y la actividad de polifenoloxidasas (Ponting, 1973), adicionalmente permite obtener buena calidad de los productos en términos de sabor y textura (Tortoe, 2010; Agnieszka & Andrzej, 2010; Andrés *et al.*, 2007; Barat *et al.*, 2002).

OD también es reconocido por obtener productos de humedad intermedia (Torreggiani & Bertolo, 2004; Sanjinez *et al.*, 2005; Tortoe, 2010), lo cual hace que deba ser combinado con otras tecnologías para mejorar la estabilidad del producto u otros métodos de preservación como congelación (Marques *et al.*, 2006; Antonio *et al.*, 2004). Este proceso como pretratamiento ha sido utilizado no solamente por la calidad de los productos finales, sino también por reducir los costos de procesos, debido a que requiere bajo consumo de energía (Azarpazhooh & Ramaswamy, 2010; Lenart, 1996), y por tanto menor daño por calentamiento en los tejidos, y mayor retención de propiedades sensoriales (Torreggiani, 1993; Andrés *et al.*, 2007; Panagiotou *et al.*, 1999; Barat *et al.*, 2002). Sin embargo una de las características de OD es la generación de grandes cantidades de solución osmótica con residuos de fruta (Azarpazhooh & Ramaswamy, 2010).

- **Calentamiento por Microondas**

En este tipo de tecnología se aplican dos mecanismos principales, la rotación dipolar y la conducción iónica. La rotación dipolar es una interacción que somete a las moléculas polares a un campo eléctrico exterior creando un momento de giro en cada molécula obligándola a rotar. Esta rotación provoca choques y rozamientos con las moléculas vecinas aumentando la energía cinética y la temperatura del líquido. La conducción iónica indica el desplazamiento de los iones presentes en los tejidos. Estos iones son acelerados y movidos en dirección opuesta a su polaridad por los campos eléctricos, provocando colisiones con las moléculas del material (Orsat *et al.*, 2007).

Esta energía cinética desordenada genera un aumento en la temperatura del producto, evaporación y aumento en la velocidad de deshidratación (Bórquez *et al.*, 2010; Khraisheh *et al.*, 1997; Pereira *et al.*, 2007). El calentamiento por microondas (M) utiliza la energía en un rango de frecuencias de 300 MHz a 300 GHz, siendo 2450 MHz la frecuencia más utilizada (Orsat *et al.*, 2007).

Algunos investigadores han encontrado que el calentamiento por M permite un menor tiempo de secado y consumo de energía en comparación con secado convectivo y FD (Zhang *et al.*, 2010; Orsat *et al.*, 2007; Bórquez *et al.*, 2010; Azarpazhooh & Ramaswamy, 2010; Huang *et al.*, 2009b; Duan *et al.*, 2008), al igual que buena calidad de las frutas (Maskan, 2000) en términos de color y sabor (Rodríguez *et al.*, 2004). Sin embargo, la temperatura interna del producto aumenta con el proceso M (Pereira *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2010b; Lu *et al.*, 1999) y si la potencia no es controlada se puede llegar a degradar la estructura del producto, (Cui *et al.*, 2008) o incluso puede llegar a quemarse el tejido y producir sabores desagradables, esto debido a la no uniformidad del campo electromagnético (Huang *et al.*, 2009a; Zhang *et al.*, 2006). Otras de las desventajas es que el volumen del producto puede reducirse (Li *et al.*, 2010a), afectando la porosidad, la capacidad de rehidratación y por ende la textura (Andrés *et al.*, 2007); finalmente a nivel industrial se pueden presentar costos altos de instalación (Marques *et al.*, 2006; Rodríguez *et al.*, 2004).

Con el fin de mejorar la eficiencia del proceso y en especial la calidad del producto, el calentamiento por M se ha combinado con técnicas como el vacío (Huang *et al.*, 2009b, Huang *et al.*, 2011), aplicado para preservar las vitaminas en alimentos térmicamente sensibles como las frutas y hortalizas; y también se ha combinado con el secado por aire caliente (Chou & Chua, 2001; Andrés *et al.*, 2004) el cual permite mayor uniformidad en el calentamiento durante el proceso (Berteli & Marsaioli, 2005).

FUNDAMENTOS DE COLOR

El color es el resultado de la evaluación de la energía radiante en términos de una correlación visual, basada en las propiedades del ojo humano. La luz es constituida por ondas electromagnéticas, pero la que el ser humano percibe es sólo una parte del espectro electromagnético comprendida entre los 380 y 760 nanómetros, que representa la luz visible (Manresa, 2007).

El color y la apariencia son los primeros atributos que evalúa el consumidor en los productos (Andrés *et al.*, 2007; Askari *et al.*, 2009), seguidos de sabor (flavor), textura y valor nutritivo (Barrett *et al.*, 2010).

La evaluación del color depende principalmente de aspectos como el tipo de iluminante empleado y el ángulo de iluminación - visión. Por tanto, con el fin de especificar el color de un producto bajo una norma de calidad, la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE, Comisión Internacional de l'Eclairage) ha definido los iluminantes CIEA (lámpara de filamento incandescente), B (luz del medio día), C (luz diurna promedio), D (luz natural del día) y F (lámpara fluorescente); estos iluminantes permiten estandarizar las condiciones bajo las cuales se observa el color, siendo los iluminantes de la serie D y C los más utilizados en la actualidad (Hunt & Pointer, 2011).

La CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) propuso un nuevo espacio cromático para transformaciones no lineales del sistema CIE 1931 al que se denomina CIE Lab*, y fue aprobado en 1976 como una buena aproximación de un espacio de color uniforme. El sistema CIE Lab* describe el color en términos de coordenadas rectangulares ($L^*a^*b^*$) y coordenadas cilíndricas (L^* , C, H) también conocidos como parámetros de color sicométrico. Específicamente a^* es la coordenada cromática que determina las variaciones entre verde (-) rojo (+), b^* entre azul (-) amarillo (+), L^* determina la luminosidad eje perpendicular al espacio a^* y b^* que va desde el negro ($L^* = 0$, abajo) al blanco ($L^* = 100$, arriba), C es la cromaticidad o croma métrico y H es el ángulo del tono o Hue. Estos atributos permiten inferir el color de una muestra y determinar la diferencia de color total entre pares de muestras (Klein, 2010; Artigas *et al.*, 2002).

Para determinar la diferencia de color entre dos muestras de alimentos se ha utilizado la diferencia matemática sobre los parámetros cromáticos del sistema CIELab* o la evaluación de C y H (Pereira *et al.*, 2007; Wais *et al.*, 2004; Changrue *et al.*, 2008; Shishegarha *et al.*, 2002). La ecuación 1 permite obtener las diferencias de color (ΔE) entre dos muestras:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$$\Delta L^*: L^*_{\text{muestra}} - L^*_{\text{referencia}}$$

$$\Delta a^*: a^*_{\text{muestra}} - a^*_{\text{referencia}}$$

$$\Delta b^*: b^*_{\text{muestra}} - b^*_{\text{referencia}}$$

En la actualidad el sistema de color CIELab* se usa con frecuencia en el control de la calidad del color. El valor ΔE no siempre se relaciona con el valor percibido por el consumidor. Los humanos detectan primero las diferencias de tono, luego las de saturación y por último las de claridad. Por tanto, el hombre acepta por lo general cambios más grandes en Luminosidad (L^*) que en Cromo. Por otro lado en cuanto a tecnología, diversos investigadores han desarrollado diferentes equipos para medir el color tales como los colorímetros HunterLab, Gardner, Color Eye, Color Master, Momcolor, Dr. Lange y Minolta, los espectrofotómetros de las marcas Macbeth, Hunter, Minolta y los de última generación X-Rite, Diano Match Scan, Minolta Haze gloss de BYK-Gardner, entre otros (Manresa, 2007).

Teniendo en cuenta las investigaciones seleccionadas de deshidratación, la evaluación de color ha sido enfocada en su mayoría en tejidos de manzana, banano y fresa, con un 28, 24 y 15 %, respectivamente, de las referencias citadas en el presente artículo, y en un menor porcentaje (menos del 10%) los demás tejidos como piña, kiwi, mango, papaya, guayaba, melón, durian y uchuva.

Entre las tecnologías que más han sido evaluadas para el análisis de color están OD (47%) y secado por aire caliente (37%) en comparación con M (29%) y FD (27%); en cuanto a las combinaciones de tecnologías, las más estudiadas han sido OD- aire caliente (25%), OD- M (19%) y M-FD (19%); las menos estudiadas OD –FD y las tecnologías como FD combinadas con infrarrojo (3%).

EFEECTO DE LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE DESHIDRATACIÓN EN EL COLOR DE TEJIDO DE FRUTA

Usualmente los procesos térmicos cambian el color original de los productos especialmente de alimentos como las frutas y las hortalizas. Los procesos de secado con aire (AD), al vacío (V) y M pueden producir pardeamiento afectando la calidad de los productos finales, sin embargo existen tecnologías como FD que permiten en general conservar el color en los productos (Hawlder *et al.*, 2006; Sagar & Suresh, 2010; Zhang *et al.*, 2006).

El color se deriva de los pigmentos naturales en frutas y verduras, que cambian con las etapas de maduración. Los pigmentos de colores primarios como las clorofilas (verde) y los carotenoides (amarillo, naranja y rojo) son en general compuestos lipídicos; por el contrario las antocianinas (rojo, azul), flavonoides (amarillo), y betalaínas (rojo) son hidrofílicos (Barrett *et al.*, 2010).

Los cambios de color están relacionados con reacciones de pardeamiento que se producen durante el secado de frutas y verduras. El oscurecimiento de las frutas y verduras durante el secado se debe a reacciones de pardeamiento enzimático y no enzimático (Van, 2008). El aumento del valor de a^* denota un color más rojo, lo cual es un indicativo de la reacción de pardeamiento. El calentamiento por microondas causa un incremento menor de rojo, lo que significa que los productos finales son menos pardos que los sometidos a secado convencional con aire (Vadivambal & Jayas, 2007).

En procesos OD los cambios en las variables a^* y b^* de las frutas son pocos, debido a que la estructura del fruto no permite gran salida de pigmentos hacia la solución; los mayores cambios se ven en la luminosidad (L^*) especialmente en procesos con vacío debido a la oxidación de los pigmentos producida a causa del aumento de la actividad enzimática por el crecimiento de microorganismos durante el tiempo de deshidratación, produciendo el oscurecimiento o pardeamiento de las muestras (Moreno *et al.*, 2010).

La Tabla 3.1 resume diferentes investigaciones donde se ha evaluado el color en frutas sometidas a diferentes procesos de deshidratación; entre los tejidos analizados se encuentran frutas como: durian, manzana, fresa, kiwi, banano, guayaba, piña, mango, arándano y papaya. En esta Tabla se han tenido en cuenta principalmente tecnologías como OD, FD, M, AD, I (infrarrojo) y V. Adicionalmente, la Tabla 3.2 muestra las investigaciones en tecnologías combinadas.

Tabla 3.1 Investigaciones de evaluación del color en fruta sometida a tecnologías de deshidratación (TD)

TD	FRUTA	AUTORES
OD	Banano	Atares <i>et al.</i> , 2011; Pereira <i>et al.</i> , 2007; Chua <i>et al.</i> , 2004; Wais <i>et al.</i> , 2004; Waliszewski <i>et al.</i> , 1999; Waliszewski <i>et al.</i> , 2002
	Fresa	Castelló <i>et al.</i> , 2010; Changrue <i>et al.</i> , 2008; Contreras <i>et al.</i> , 2008; Taiwo <i>et al.</i> , 2003
	Mango	Moreno <i>et al.</i> , 2010; Andrés <i>et al.</i> , 2007; Tedjo <i>et al.</i> , 2002
	Uchuva	Restrepo <i>et al.</i> , 2009
	Piña	Saxena <i>et al.</i> , 2009; Lombard <i>et al.</i> , 2008; Tan <i>et al.</i> , 2001
	Manzana	Contreras <i>et al.</i> , 2008; Mandala <i>et al.</i> , 2005; Wais <i>et al.</i> , 2004; Prothon <i>et al.</i> , 2001; Tregunno & Goff, 1996
	Guayaba	Pereira <i>et al.</i> , 2006; Pascual <i>et al.</i> , 2010
	papaya	Rodríguez <i>et al.</i> , 2003; Pereira <i>et al.</i> , 2006
	Litchis	Singh & Nath, 2008.
	Arándanos	Beaudry <i>et al.</i> , 2004; Yang <i>et al.</i> , 1987; Grabowski <i>et al.</i> , 2007
	Kiwi	Talens <i>et al.</i> , 2001; Marani <i>et al.</i> , 2007
melón	Pereira <i>et al.</i> , 2006	
FD	Manzana	Huang <i>et al.</i> , 2011; Wu <i>et al.</i> , 2010; Huang <i>et al.</i> , 2009b; Acevedo <i>et al.</i> , 2008; Cui <i>et al.</i> , 2008; Venir <i>et al.</i> , 2007; Hawlader <i>et al.</i> , 2006
	Arándanos	Yang <i>et al.</i> , 1987
	Fresas	Huang <i>et al.</i> , 2009a; Shih <i>et al.</i> , 2008; Xu <i>et al.</i> , 2006; Hammami & René, 1997; Shishegarha <i>et al.</i> , 2002
	Banano	Pan <i>et al.</i> , 2008; Moraga <i>et al.</i> , 2011; Jiang <i>et al.</i> , 2010
	Mango	Chen & Wang, 2007
	Guayaba	Hawlader <i>et al.</i> , 2006
AD	Mango	Moreno <i>et al.</i> , 2010; Chen & Wang, 2007; Gujral & Brar, 2003; Reis <i>et al.</i> , 2006
	Manzana	Askari <i>et al.</i> , 2009; Contreras <i>et al.</i> , 2008; Cui <i>et al.</i> , 2008; Mandala <i>et al.</i> , 2005; Wais <i>et al.</i> , 2004; Funebo & Ohlsson, 1998; Krokida <i>et al.</i> , 1998
	Piña	Ramallo & Mascheroni, 2011; Ponkham <i>et al.</i> , 2011
	Papaya	Lemus <i>et al.</i> , 2009
	fresa	Askari <i>et al.</i> , 2009; Contreras <i>et al.</i> , 2008; Shih <i>et al.</i> , 2008; Xu <i>et al.</i> , 2006; Tsami E. & Katsioti M., 2000
	Banano	Wais <i>et al.</i> , 2004; Maskan, 2000; Krokida <i>et al.</i> , 1998; Boudhrioua <i>et al.</i> , 2002; Thuwapanichayanan <i>et al.</i> , 2011
Kiwi	Maskan, 2001; Mohammadi <i>et al.</i> , 2008; Femenia <i>et al.</i> , 2009	
M	Durian	Bai-Ngew <i>et al.</i> , 2011
	Manzana	Li <i>et al.</i> , 2010b; Li <i>et al.</i> , 2010a; Askari <i>et al.</i> , 2009; Picouet <i>et al.</i> , 2009; Contreras <i>et al.</i> , 2008; Cui <i>et al.</i> , 2008; Prothon <i>et al.</i> , 2001; Funebo & Ohlsson, 1998
	fresa	Askari <i>et al.</i> , 2009; Changrue <i>et al.</i> , 2008; Contreras <i>et al.</i> , 2008
	Kiwi	Maskan, 2001
	Banano	Maskan, 2000
V	Manzana	Huang <i>et al.</i> , 2011; Acevedo <i>et al.</i> , 2008; Wu <i>et al.</i> , 2010; Hawlader <i>et al.</i> , 2006
	Mango	Jaya & Das, 2003
	Guayaba	Hawlader <i>et al.</i> , 2006

Tabla 3.2 .Investigaciones en evaluación del color para fruta sometida a combinación de tecnologías de deshidratación (TCD)

TCD	FRUTA	AUTORES
OD-M	Piña	Botha <i>et al.</i> , 2011
	Fresas	Changrue <i>et al.</i> , 2008; Contreras <i>et al.</i> , 2008
	Manzana	Contreras <i>et al.</i> , 2008; Prothon <i>et al.</i> , 2001
	Mango	Andrés <i>et al.</i> , 2007
	Banano	Pereira <i>et al.</i> , 2007
	Arándanos	Beaudry <i>et al.</i> , 2004
OD -AD	fresa	Contreras <i>et al.</i> , 2008
	Mango	Moreno <i>et al.</i> , 2010
	Piña	Silveira <i>et al.</i> ,1996
	Manzana	Contreras <i>et al.</i> , 2008; Mandala <i>et al.</i> , 2005;Wais <i>et al.</i> , 2004
	Papaya	Lemus <i>et al.</i> , 2009
	Arándanos	Beaudry <i>et al.</i> , 2004
	Banano	Wais <i>et al.</i> , 2004; Krokida & Maroulis, 2000
M-FD	Manzana	Huang <i>et al.</i> , 2011; Wu <i>et al.</i> , 2010; Huang <i>et al.</i> ,2009b; Cui <i>et al.</i> ,2008
	Banano	Jiang <i>et al.</i> , 2010
OD-FD	Arándanos	Beaudry <i>et al.</i> , 2004; Yang <i>et al.</i> , 1987
OD-V	Mango	Moreno <i>et al.</i> , 2010
	Arándanos	Beaudry <i>et al.</i> , 2004
	Piña	Silveira <i>et al.</i> ,1996
I- FD	Fresa	Shih <i>et al.</i> , 2008
	Banano	Pan <i>et al.</i> , 2008
I- OD	Piña	Saxena <i>et al.</i> ,2009
	Banano	Chua <i>et al.</i> , 2004
M -AD	fresa	Askari <i>et al.</i> , 2009
	manzana	Askari <i>et al.</i> , 2009; Krokida & Maroulis, 1999
	Kiwi	Maskan, 2001
	Banano	Maskan, 2000 ; Krokida & Maroulis, 1999

Es claro que son pocas las investigaciones hechas con métodos combinados cuando se comparan con las reportadas para métodos únicos, con lo cual se abre una oportunidad para seguir investigando en los efectos de la combinación de tecnologías sobre las propiedades de las frutas.

- **Color Fruta Fresca**

En la Figura 3.1 se presentan los parámetros de color L^* , a^* y b^* de fruta fresca. Estos valores son los promedios calculados a partir de las siguientes publicaciones donde han analizado el color de la pulpa en fruta.

Básicamente las frutas analizadas son manzana (Wu *et al.*, 2010; Askari *et al.*, 2009; Picouet *et al.*, 2009; Contreras *et al.*, 2008; Mandala *et al.*, 2005; Funebo & Ohlsson, 1998), fresa (Castelló *et al.*, 2010; Askari *et al.*, 2009; Taiwo *et al.*, 2003; Hammami & René, 1997; Contreras *et al.*, 2008), mango (Moreno *et al.*, 2010; Andrés *et al.*, 2007; Tedjo *et al.*, 2002; Hofman *et al.*, 1997; Sriwimon & Boonsupthip, 2011), piña (Saxena *et al.*, 2009; Lombard *et al.*, 2008; Chutintrasri & Noomhorm, 2007; Ramallo & Mascheroni, 2011; Bartolomé *et al.*, 1995), banano (Pan *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2007; Maskan, 2000), kiwi (Maskan, 2001; Femenia *et al.*, 2009) y papaya (Santamaría *et al.*, 2009a; Santamaría *et al.*, 2009b; Fuggateea *et al.*, 2010). Aquí se presentan las principales frutas que han sido analizadas en procesos de deshidratación. Algunas publicaciones únicas como en pera, uchuva, durian, guayaba y melón no están incluidas en la Figura (Marani *et al.*, 2007; Restrepo *et al.*, 2009; Bai-Ngew *et al.*, 2011; Hawlader *et al.*, 2006; Pereira *et al.*, 2006).

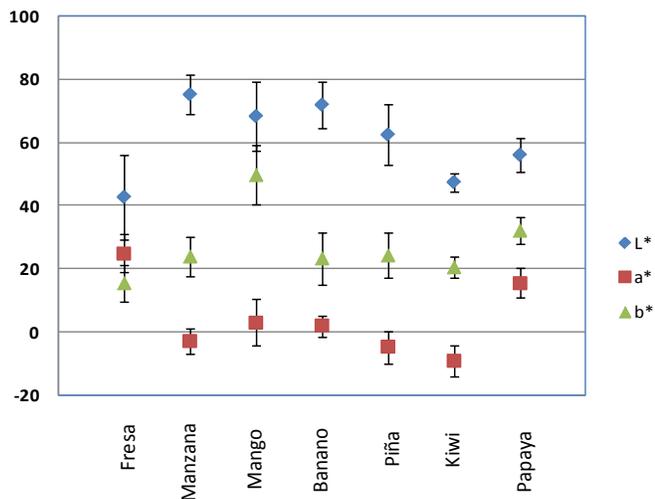
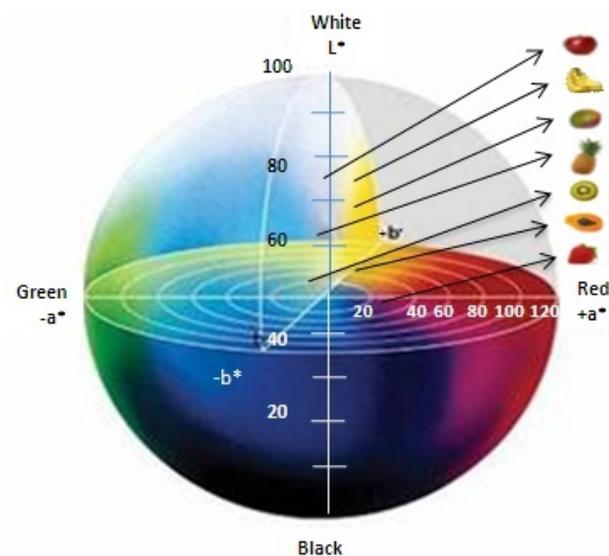


Figura 3.1. Parámetros de color en frutas.



	FRESA	MANZANA	MANGO	BANANO	PIÑA	KIWI	PAPAYA
L*	42,8 ± 13,5	75,3 ± 6,3	68,4 ± 10,8	72, ± 7,5	62,6 ± 9,7	47,5 ± 3	56,1 ± 5,3
a*	25,1 ± 6,1	(-2,9) ± 4	3,2 ± 7,3	2,1 ± 3,4	(-4,6) ± 5,2	(-9) ± 4,9	15,8 ± 4,8
b*	15,7 ± 5,8	24,2 ± 6,1	50 ± 9,4	23,6 ± 8,2	24,5 ± 7	20,8 ± 3,1	32,3 ± 4,4

Figura 3.2. Espacio cromático de la fruta fresca

Fuente: Imagen adaptada de <http://www2.konicaminolta.eu/eu/Measuring/pcc/en/part1/07.html>

En la Figura 3.2 se presenta la ubicación en el espacio cromático de las frutas frescas analizadas, presentándose en la tabla los promedios de los valores L^* , a^* y b^* de las investigaciones revisadas. Se observa que la piña, la manzana y el kiwi están en el 1er cuadrante del plano $(-a)^*+b^*$ del espacio cromático. Fresa y papaya en el plano $+a^*$ y $+b^*$; las otras frutas como mango y banano aunque también se encuentran en éste plano tienen valores cercanos al cero en el parámetro a^* de 3.2 y 2.1, respectivamente, es decir con baja tonalidad roja; igualmente estas tres frutas presentan niveles altos de luminosidad.

Adicionalmente, de la información recolectada se observan las variaciones de color entre frutas. Así es que los rangos de a^* van de -9 en kiwi a 25.1 en fresa. Los rangos de b^* van de 15.7 en fresa a 50 en mango. Los rangos de luminosidad L^* van desde 42.8 en fresa a 75.3 en manzana. Se observa además que la amplitud de los rangos de los parámetros de color en las frutas analizadas es similar de 32.6, 34.1 y 34.3, para L^* , a^* y b^* respectivamente.

- **Cambio de Color (ΔE)**

La Figura 3.3 resume el efecto de tecnologías como OD, M, FD, AD y la combinación entre éstas, sobre los cambios de color (ΔE) en diferentes tipos de fruta. Los valores presentados en ésta Figura son los promedios de los ΔE para cada fruta. Algunos valores ΔE fueron tomados directamente de las referencias citadas en ésta revisión. Otros valores fueron calculados utilizando la ecuación Ec. 1, a partir de los parámetros reportados L^* , a^* , b^* de fruta deshidratada y los valores de referencia de la fruta fresca (Figura 3.1). Por último otros valores de ΔE fueron obtenidos a partir de gráficas publicadas.

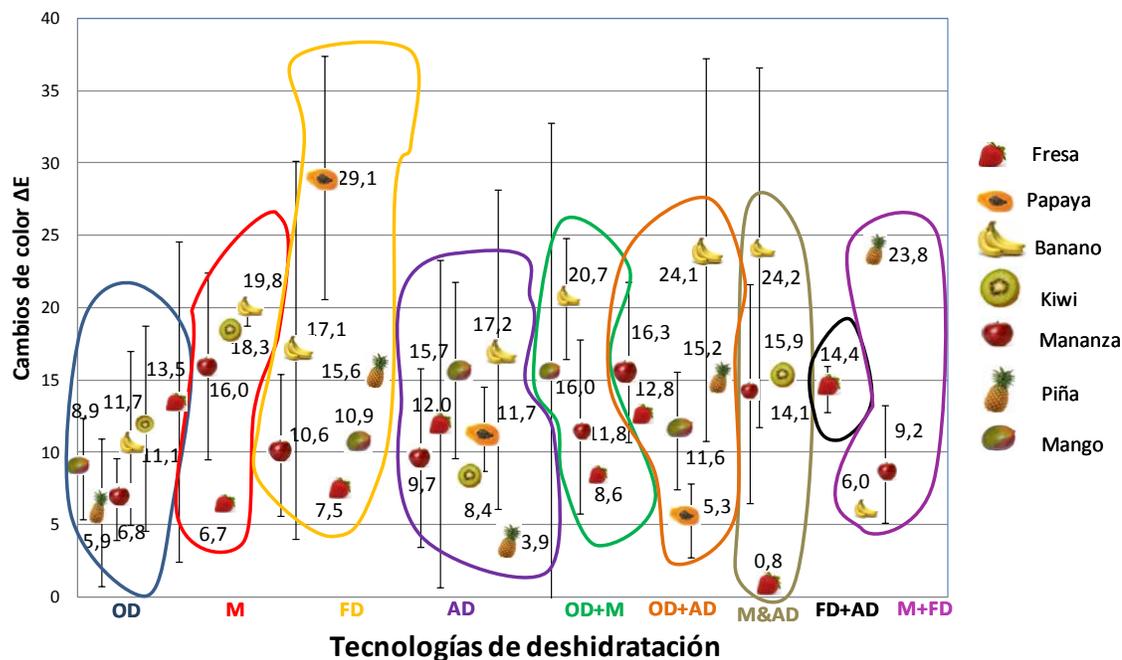


Figura 3.3 Efectos de procesos de deshidratación en los cambios de color de tejido de fruta.

La Figura 3.3 presenta valores de ΔE entre 0.8 y 29.1 en tejidos de fresa y papaya, respectivamente (Askari *et al.*, 2009; Hawlader *et al.*, 2006). Es de resaltar que el valor en papaya liofilizada de 29,1 se muestra como un valor atípico ya que si se compara con papaya sometida a otros procesos los valores de ΔE son bajos, igualmente al comparar con respecto a otras frutas liofilizadas. Por tanto de acuerdo a lo anterior el rango de ΔE podría cambiar a 0.8-24,2 encontrarse éstos valores en tejidos de fresa y banano, respectivamente. Como se observa en la Figura 3.3 se presentan rangos de ΔE para el banano de 6 -24.2, manzana 6.8- 16.3 fresa 0.8 -14.4, mango 8.9-16, piña 3.9-23.8, papaya 5.3-29.1 y kiwi 8.4-18.3, presentándose mayor variabilidad de ΔE en tejido de banano.

Al dividir la Figura 3.3 en 4 partes se obtienen en general para las tecnologías analizadas niveles de cambio de color: 0.8-7.9 (bajo ΔE), 7.9-14.9 (medio- bajo ΔE), 14.9-22 (medio- alto ΔE) y 22-29.1 (alto ΔE). En ésta Figura se observa que la fresa y la papaya se encuentra en la zona baja; el mango y el kiwi se encuentran en la zona media, la piña en la zona alta, la manzana en la zona medio-bajo ΔE , el banano en la zona medio-alto ΔE , presentándose que el 70 % de los promedios de ΔE se encuentran en la zona media.

Otras frutas como la uchuva y la pera sometidas a procesos OD presentan bajos niveles en ΔE , de 9.2y un rango entre 0.5-8, respectivamente (Restrepo *et al.*, 2009; Marani *et al.*, 2007). El durian sometido a M presenta un rango entre 5,6-7.8 (Bai-Ngew *et al.*, 2011) y la guayaba sometida a FD con niveles de 6 (Hawlader *et al.*, 2006).

Igualmente se observan pocas investigaciones en tecnologías combinadas AD- FD. Las tecnologías más estudiadas hasta el momento son OD y AD. Hasta el momento no se han observado investigaciones en procesos combinados de OD- FD donde analicen ΔE .

- **Impacto en los Parámetros de Color**

La Figura 3.4 compara el impacto de los parámetros ΔL^* , Δa^* y Δb^* sobre los cambios de color en las frutas. Esta Figura resume el número de veces (porcentualmente) que cada uno de estos parámetros aparece como el más influyente en las investigaciones analizadas.

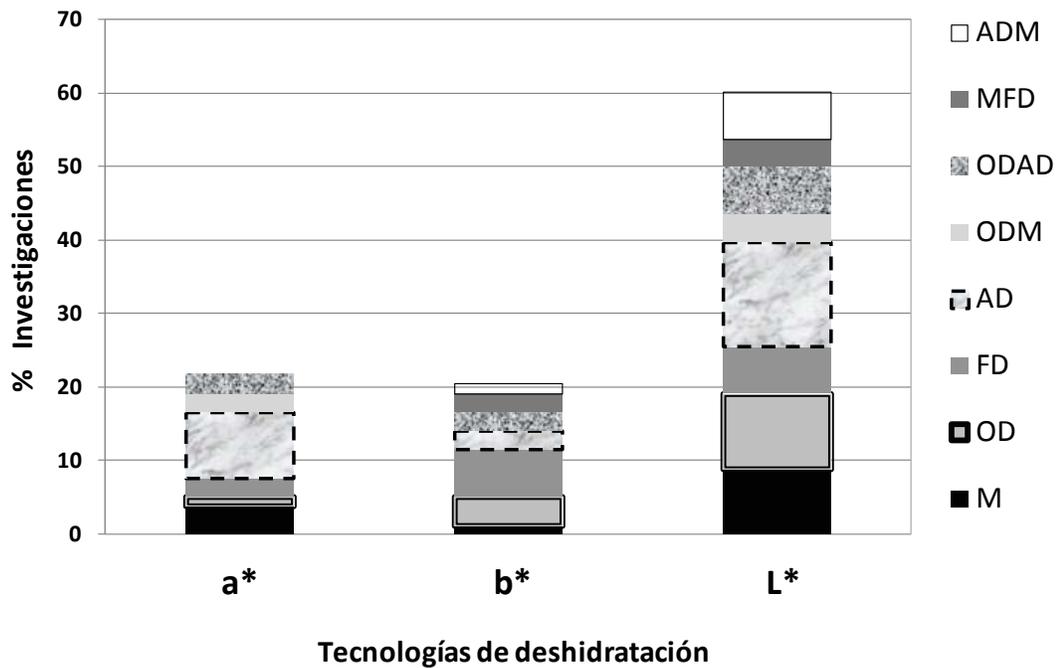


Figura 3.4. Impacto de las tecnologías de deshidratación en los parámetros de color L^* , a^* y b^* .

El 60 % de las investigaciones reporta que L^* es el parámetro que presenta mayor impacto sobre ΔE . El 40% restante se distribuye entre Δa^* y Δb^* de manera similar. Finalmente se observa que los procesos que más influyen en ΔL^* son AD y OD, aunque ésta tendencia está influenciada por el número de publicaciones el cual es mayor para estas dos tecnologías.

- **Cambio de Luminosidad ΔL**

La Figura 3.5 presenta los efectos de la aplicación de las tecnologías de deshidratación en los cambios de luminosidad de frutas. En general se observa para las frutas analizadas un rango de ΔL entre -22.3 y 15.9, presentándose éstos valores máximos en tejidos de banano al aplicar tecnologías combinadas de M-AD (Maskan, 2000; Krokida & Maroulis, 1999) y FD (Jiang *et al.*, 2010; Moraga *et al.*, 2011; Pan *et al.*, 2008).

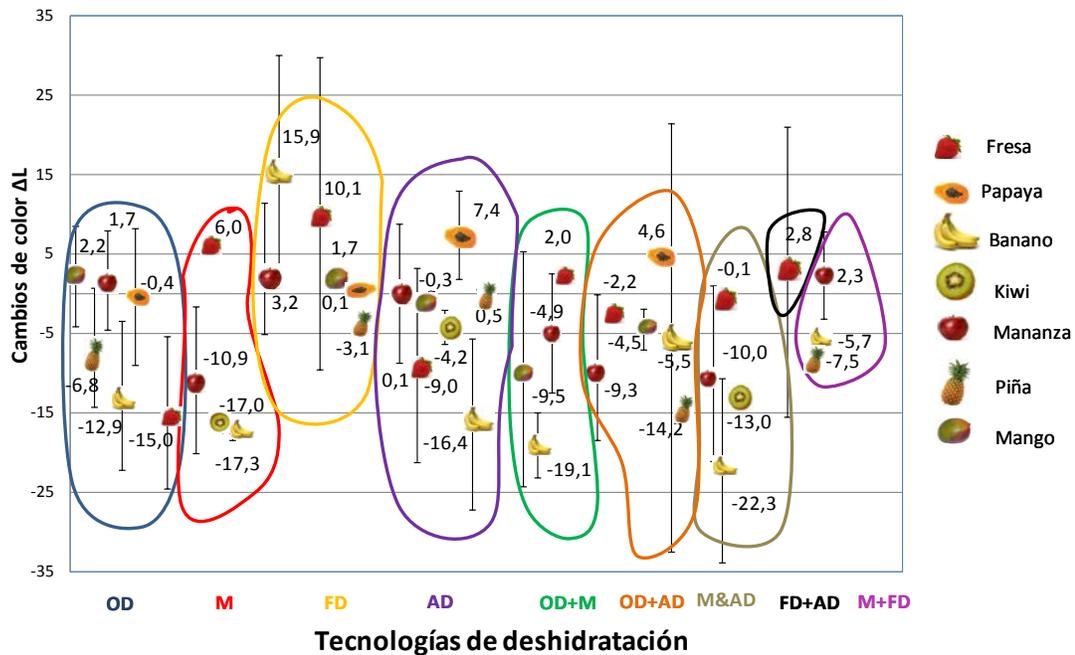


Figura 3.5. Efectos de procesos de deshidratación en los cambios de luminosidad (ΔL^*) de tejido de fruta.

En la Figura 3.5 se observan rangos de ΔL para cada fruta sometida a diferentes tecnologías de deshidratación, en banano un nivel entre -22.3 a 15.9, manzana -10.9 a 3.2, fresa -15 a 10.1, mango -9.5 a 2.2, piña -14.2 a 0.5, papaya -0.4 a 7.4 y kiwi de -17 a -4.2. Presentándose mayor variabilidad de ΔL en tejido de banano y fresa.

Por otro lado se obtuvo que el 63 % de los resultados son negativos lo que indica que los procesos de deshidratación tienden a disminuir la luminosidad de las frutas con respecto a la fruta fresca presentando más opaco el tejido.

Al dividir la Figura 3.5 en 4 partes, partiendo de un rango (-24 a 24) el cual involucra los promedios obtenidos en ΔL , se obtiene: de -24 a -12 (opaco), -12 a 0 (levemente opaco), 0 a 12 (levemente luminoso) y de 12 a 24 (luminoso). En general se observa que el 22, 41,34 y 2% de los promedios de cambios de luminosidad se encuentran entre estos rangos, respectivamente.

El banano es el tejido que más se afecta con los procesos de deshidratación, es el que más opaco se vuelve, se encuentra en la zona establecida de -24 a -12, especialmente cuando el tejido es sometido a OD, M y AD. Para éste mismo tejido se observó mayor luminosidad al someterlo a FD. Cabe destacar que algunos autores sometieron el tejido a antioxidantes como el ácido cítrico y ácido ascórbico antes de los tratamientos para prevenir reacciones de pardeamiento enzimático (Pereira *et al.*, 2007; Waliszewski *et al.*, 2002; Thuwapanichayanan *et al.*, 2011; Pan *et al.*, 2008).

Otras frutas como melón, uchuva y guayaba sometidas a OD presentaron niveles en los cambios de luminosidad de -10, -5 y 2.7, respectivamente (Pereira *et al.*, 2006; Restrepo *et al.*, 2009), así como el durian sometido a M presentó un valor de -1.3 (Bai-Ngew *et al.*, 2011).

• **Cambio de Tono ΔH**

La Figura 3.6 presenta el impacto de las tecnologías de deshidratación sobre el tono del tejido de diferentes frutas. Los valores representan los promedios de los cambios de tono con respecto a la fruta fresca. El Tono es calculado de acuerdo con la ecuación 2.

$$\text{Angulo HUE} = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \text{ Ec. 2}$$

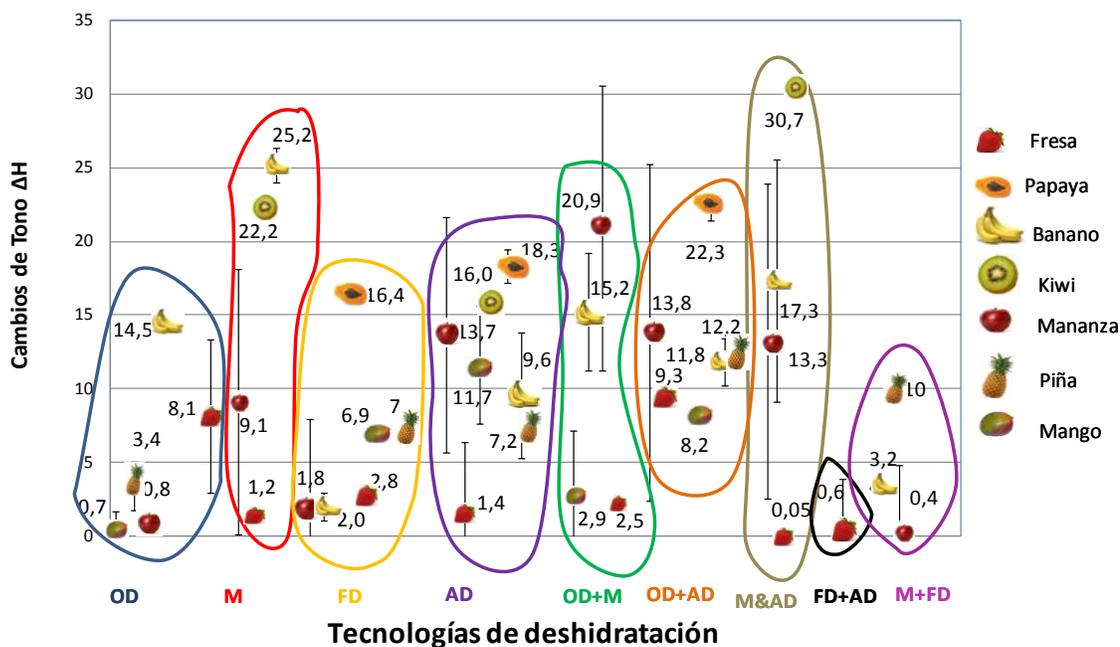


Figura 3.6. Efectos de procesos de deshidratación en los cambios de Tono (ΔH*) de tejido de fruta.

En la Figura 3.6 se observa cambios de tono entre 0.05 en fresa (Askari *et al.*, 2009) a 30.7 en kiwi (Maskan, 2001), presentándose en general mayores cambios en papaya y kiwi, así como menores cambios de tono en fresa.

Igualmente se observan los rangos de ΔH para cada fruta sometida a diferentes tecnologías de deshidratación, obteniéndose en banano un nivel entre 2 a 25.2, manzana de 0.4 a 20.9, fresa de 0.05 a 9.3, mango de 0.7 a 11.7, piña de 3.4 a 12.2, papaya de 16.4 a 22.3 y kiwi de 16 a 30.7.

Al dividir la Figura 3.6 en 4 partes obtenemos rangos entre 0.05-7.71 (bajo ΔH), 7.71-15.38 (medio- bajo ΔH), 15.38-23 (medio- alto ΔH) y 23-30.7 (alto ΔH). De acuerdo con Manresa (2007), las mayores diferencias se detectan en el tono y la saturación. El ojo humano detecta primero las diferencias de tono, luego las de saturación y por último las de claridad. Por tanto las frutas que presentan mayores cambios, detectados más fácilmente a nivel sensorial son banano (25.2) sometido a M y kiwi sometido a ADM (30.7).

CONCLUSIONES

- En cuanto a la fruta sin procesar, la piña, la manzana y el kiwi están en el 1er cuadrante del plano $-a^*+b^*$ del espacio cromático. La fresa y la papaya en el plano $+a^*$ y $+b^*$; las otras frutas como mango y banano aunque también se encuentran en éste plano tienen valores cercanos a cero en el parámetro a^* .
- La manzana, la fresa y el banano son las frutas más estudiadas en la evaluación del efecto de tecnologías de deshidratación sobre el color del tejido.
- El 70% de las investigaciones presentan niveles intermedios (7.9-22) en cambios de color de fruta sometida a M, OD, FD AD y las combinaciones entre estas.
- El 60 % de las investigaciones reportan mayor impacto en los cambios de color por cambios en la luminosidad ΔL^* .
- Los procesos de deshidratación tienden a disminuir la luminosidad de las frutas con respecto a la fruta fresca presentando más opaco el tejido.
- Finalmente las frutas que podrían ser menos aceptadas por consumidores potenciales son kiwi y banano, especialmente al ser sometidas a procesos de calentamiento por microondas.

AGRADECIMIENTOS

Loa autores agradecen a La Universidad de La Sabana (Colombia) por la financiación del proyecto 643 de la convocatoria interna

REFERENCIAS

- Acevedo N., Briones V., Buera P. and Aguilera J (2008). Microstructure affects the rate of chemical, physical and color changes during storage of dried apple discs. *Journal of Food Engineering* 85: 222-231.
- Agnieszka C. and Andrzej L (2010). Structural Impact of Osmotically Pretreated Freeze-Dried Strawberries on Their Mechanical Properties. *International Journal of Food Properties* 13:1134 – 1149.
- Andrés A., Bilbao C., & Fito P (2004). Drying kinetics of Apple cylinders under combined hot air microwave dehydration. *Journal of Food Engineering*, 63: 71-78.
- Andrés A., Fito P., Heredia A. and Rosa E. M (2007). Combined drying technologies for development of high quality shelf stable mango products. *Drying Technologies* 25: 1857-1866.
- Antonio G.C., Azoubel P.M., Alves D.G., El-Aouar A.A. and Murr F.E.X (2004). Osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya* L.): Influence of process variables. In *Proceedings of the 14th International Drying Symposium São Paulo, Brazil. C. 1998–2004.*
- Artigas J.M, Capilla P., Pujol J. (2002). *Tecnología del color*. Valencia: Maite Simon,
- Askari G. R, Emam-Djomeh Z. and Mousavi S. M (2009). An Investigation of the Effects of Drying Methods and Conditions on Drying Characteristics and Quality Attributes of Agricultural Products during Hot Air and Hot Air/Microwave-Assisted Dehydration. *Drying Technology: An International Journal* 27: 831 – 841.
- Atares L., Sousa Gallagher M.J., Oliveira F.A.R (2011). Process conditions effect on the quality of banana osmotically dehydrated. *Journal of Food Engineering* 103: 401–408
- Azarpazhooh E. and Ramaswamy H. S (2010). Microwave-Osmotic Dehydration of Apples Under Continuous Flow Medium Spray Conditions: Comparison with Other Methods. *Drying Technology* 28: 49-56.
- Bai-Ngew S., Therdthai N, Dhamvithee P (2011). Characterization of microwave vacuum-dried durian chips. *Journal of Food Engineering* 104: 114–122.
- Barat J.M., Talens P., Barrera C., Chiralt A. and Fito P (2002). Pineapple candying at mild temperature by applying vacuum impregnation. *Journal of Food Science*. 67(8): 3046–3052.
- Barrett D., Beaulieu J., Shewfelt T R (2010). Color, Flavor, Texture, and Nutritional Quality of Fresh-Cut Fruits and vegetables: Desirable Levels, Instrumental and Sensory Measurement, and the Effects of Processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 50: 369–389.
- Bartolomé A. P., Rupérez P. & Fúster C (1995). Pineapple fruit: morphological characteristics, chemical composition and sensory analysis of Red Spanish and Smooth Cayenne cultivars. *Food Chemistry* 53: 75-79.
- Beaudry C., Raghavan G. S. V., Ratti C, and Rennie T. J. (2004). Effect of Four Drying Methods on the Quality of Osmotically Dehydrated Cranberries. *Drying technology*. 22 (3): 521–539.
- Berteli, M. N., & Marsaioli, A (2005). Evaluation of short cut pasta air dehydration assisted by microwaves as compared to the conventional drying process. *Journal of Food Engineering*, 68(2): 175–183.
- Bórquez R.M., Canales E.R. and Redon J.P (2010). Osmotic dehydration of raspberries with vacuum pretreatment followed by microwave-vacuum drying. *Journal of Food Engineering*, 99: 121-127.
- Botha, G.E., Oliveira, J.C., Ahrné, L., (2011). Quality optimisation of combined osmotic dehydration and microwave assisted air drying of pineapple using constant power emission, *Food and Bioproducts Processing*. doi:10.1016/j.fbp.2011.02.006
- Boudhrioua N., Michon C., Cuvelier G., Bonazzi C. (2002). Influence of ripeness and air temperature on changes in banana texture during drying. *Journal of Food Engineering*, 55:115–121
- Castelló M.L., Fito P.J., Chiralt A (2010). Changes in respiration rate and physical properties of strawberries due to osmotic dehydration and storage. *Journal of Food Engineering* 97: 64–71.
- Contreras C., Martín-Esparza M. E., Chiralt A. and Martínez- Navarrete N (2008). Influence of microwave application on convective drying: Effects on drying kinetics and optical and mechanical properties of apple and strawberry. *Journal of Food Engineering* 88: 55-64.

- Contreras C., Martín-Esparza M. E., Martínez-Navarrete N. and Chiralt A (2007). Influence of osmotic pre-treatment and microwave application on properties of air dried strawberry related to structural changes. *European Food Research and Technology* 224: 499-504.
- Cui Z. W., Li CH. Y., Song Ch.F. and Song Y (2008). Combined microwave vacuum and freeze drying of carrot and apple chips. *Drying Technology* 26:1517-1523.
- Changrue V., Orsat V. and Raghavan G.S.V (2008). Osmotically dehydrated microwave-vacuum drying of strawberries. *Journal of Food Processing and Preservation* 32: 798-816.
- Chen G. and Wang W (2007). Role of Freeze Drying in Nanotechnology. *Drying Technology* 25: 29–35.
- Chiralt A. and Fito P (2003). Transport mechanisms in osmotic dehydration: the role of the structure. *Food Science and Technology International*. 9: 179–186.
- Chou SK & Chua KJ (2001). New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs. *Food Science and Technology* 12: 359–369
- Chua K.J. , Chou S.K., Mujumdar A.S., Ho J.C., Hon C.K. (2004). Radiant-convective drying of osmotic treated agro-products: effect on drying kinetics and product quality. *Food Control* 15: 145–158
- Chutintrasria B, Noomhorm A. Color degradation kinetics of pineapple puree during thermal processing. *LWT* 40 (2007): 300–306.
- Drouzas A.E., Tsami E. and Saravacos, G.D (1999). Microwave/vacuum drying of model fruit gels. *Journal of Food Engineering* 39: 117–122.
- Duan X., Zhang M., Li X.L. and Mujumdar A.S (2008). Microwave freeze drying of sea cucumber coated with nanoscale silver. *Drying Technology*. 26 (4): 413–419.
- Duan X., Zhang M., Mujumdar A. S. and Wang R (2010). Trends in Microwave-Assisted Freeze Drying of Foods. *Drying Technology* 28: 444–453.
- Erdogdu Ferrh (2009). Optimization in food Engineering. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Fahloul D., Lahbari M., Benmoussa H. and Mezdour S (2009). Effect of osmotic dehydration on the freeze drying kinetics of apricots. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 7:117-121.
- Femenia A., Sastre-Serrano G., Simal S., Garau M.C., Eim V. , Rossello C (2009). Effects of air-drying temperature on the cell walls of kiwifruit processed at different stages of ripening. *LWT - Food Science and Technology* 42: 106–112.
- Fernandes F., Rodrigues S., Gaspareto O., Oliveira E. (2006). Optimization of osmotic dehydration of papaya followed by air-drying. *Food Research International* 39: 492–498
- Fito P, Chiralt A (1997). Osmotic dehydration: an approach of the modelling of solid food liquid operations. En Fito P, Ortega-Rodriguez E, Barbosa- Canovas GV (Eds.) *Food Engineering 2000*. Cap.13. Chapman and Hal l. New York, EEUU. pp. 231-252.
- Funebo T., & Ohlsson T (1998). Microwave-assisted Air Dehydration of Apple and Mushroom. *Journal of Food Engineering* 38: 353-361.
- Fuggate P., Wongs-Areea C., Noichindac S., Kanlayanarata S., Quality and volatile attributes of attached and detached ‘Pluk Mai Lie’ papaya during fruit ripening. *Scientia Horticulturae* 126 (2010): 120–129.
- Grabowski S., Marcotte M., Quan D., Taherian A. R., Zareifard M. R., Poirier M., Kudra T. (2007). Kinetics and quality aspects of canadian blueberries and cranberries dried by osmo-convective method. *Drying Technology*, 25: 367–374.
- Gujral H., Brar S.(2003). Effect of Hydrocolloids on the Dehydration Kinetics, Color, and Texture of Mango Leather. *International journal of food properties* 6 (2): 269–279.
- Hammami C., & Rene F (1997). Determination of Freeze-drying Process Variables for Strawberries. *Journal Food Engineering* 32: 133-154.
- Hawlader M.N.A. Perera C.O., Tian M., Yeo K.L (2006). Drying of guava and papaya: Impact of different drying methods. *Drying technology* 24:77-87.
- Hofman P. J., Smith L. G., Joyce D. C., Johnson G. I., Meiburg G. F (1997). Bagging of mango (*Mangifera indica* cv. ‘Keitt’) fruit influences fruit quality and mineral composition. *Postharvest Biology and Technology* 12: 83–91.

- Huang L., Zhang M., Yan W., Mujumdar A. and Sun D (2009a). Effect of coating on post-drying of freeze-dried strawberry pieces. *Journal of Food Engineering* 92: 107-111.
- Huang L., Zhang M., Mujumdar A. and Sun D (2009b). Studies on Decreasing Energy Consumption for a Freeze-Drying Process of Apple Slices. *Drying Technology* 27: 938–946.
- Huang L, Zhang M, Mujumdar A., Rui L (2011). Comparison of four drying methods for re-structured mixed potato with apple chips. *Journal of Food Engineering* 103: 279–284
- Hunt RWG & Pointer MR (2011). Measuring colour. http://books.google.com.co/books?id=NrNW0POjFxC&pg=PA94&dq=colour+illuminants+C+y+D&hl=es&ei=0GxNTpyACY-Utwe0zrmeBw&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1&ved=0CCkQ6AEwAA#v=onepage&q=colour%20illuminants%20C%20y%20D&f=false. (último acceso: 15 de julio de 2011)
- Ispir A. and Togrul I. (2009a). The influence of application of pretreatment on the osmotic dehydration of apricots. 33: 58-74.
- Ispir A. and Togrul I (2009b). Osmotic dehydration of apricot: kinetics and the effect of process parameters. *Chemical Engineering research and design* 87: 166-180.
- Jaya S. & Das H. (2003). A Vacuum Drying Model for Mango Pulp. *Drying Technology*. 21:1215-1234
- Jiang Hao., Zhang Min. and Mujumdar Arun S (2010). Microwave Freeze-Drying Characteristics of Banana Crisps. *Drying Technology*. 28: 1377–1384.
- Kassem A.S., Shokr A.Z., El-Mahdy A.R., Aboukarima A.M., Hamed E.Y (2011). Comparison of drying characteristics of Thompson seedless grapes using combined microwave oven and hot air drying. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 10: 33–40
- Kearney J (2010). Food consumption trends and drivers. *Philosophical Transactions of the Royal society Biological Sciences* 365: 2793–2807
- Khraisheh M.A., Cooper T.J. and Magee T.R (1997). Shrinkage characteristic of potatoes dehydrated under combined microwave and convective air conditions. *Drying Technology International* 15: 1003–1022.
- Klein, G (2010). *Industria color physics*. SpringerLink. <http://www.springerlink.com/content/978-1-4419-1196-4/#section=717903&page=7&locus=41> (último acceso: 15 de julio de 2011).
- Kopjar M., Pilizota V., Hribar J., Simcic M., Zlatic E. and Nedic T. N (2008). Influence of trehalose addition and storage conditions on the quality of strawberry cream filling. *Journal of Food Engineering*, 87(3): 341–350.
- Krokida, M.K.; Karathanos, V.T.; Maroulis, Z.B.(1998). Effect of freeze-drying conditions on shrinkage and porosity of dehydrated agricultural products. *Journal of Food Engineering*, 35: 369–380.
- Krokida M. and Maroulis Z. Quality changes during of food materials. *Drying Technology in Agriculture and Food Sciences*. Mujumdar, A.S., Ed.; Science Publishers: Enfield, NH. (2000): 61-106.
- Krokida M. and Maroulis Z (1999). Effect of microwave drying on some quality properties of dehydrated products. *Drying technology*, 17(3): 449-466.
- Krokida M. and Philippopoulos C. Volatility of apples during air and freeze drying. *J. Food Eng.* 73 (2006): 135-141.
- Lemus-Mondaca R., Miranda M., Andrés Grau A., Briones V., Villalobos R., Vega-Gálvez A (2009). «Effect of Osmotic Pretreatment on Hot Air Drying Kinetics and Quality of Chilean Papaya (*Carica pubescens*.» *Drying Technology* 27: 1105–1115.
- Lenart A (1996): Osmo-convective drying of fruits and vegetables: Technology and application. *Drying Technology*.14: 391–413.
- Li H. & Ramaswamy H.S (2006). Osmotic dehydration of apple cylinders: III. Continuous medium flow microwave heating conditions. *Drying Technology* 24: 643–651.
- Li Z., Raghavan G.S.V. and Orsat V (2010a). Optimal power control strategies in microwave drying. *Journal of Food Engineering* 99: 263–268.
- Li Z., Raghavan G.S.V. and Orsat V (2010b). Temperature and power control in microwave drying. *Journal of Food Engineering* 97: 478-483.

- Lombard G.E, Oliveira J.C, Fito P. and Andrés A (2008). Osmotic dehydration of pineapple as a pre-treatment for further drying. *Journal of Food Engineering* 85: 277-284.
- Lu L., Tang J. and Ran X (1999). Temperature and moisture changes during microwave drying of sliced food. *Drying Technology*. 17: 413–432.
- Mandala I.G, Anagnostaras E.F., Oikonomou C.K (2005). Influence of osmotic dehydration conditions on apple air-drying kinetics and their quality characteristics. *Journal of Food Engineering* 69: 307–316.
- Manresa A. (2007). El color en la industria de los alimentos. Cuba: Editorial Universitaria. p 30.
- Marani C.M, Agnelli M.E (2007). Mascheroni R.H. Osmo-frozen fruits: mass transfer and quality evaluation. *Journal of Food Engineering* 79 : 1122–1130.
- Marques L., Prado M. and Freire J (2009). Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits. *Food Science and Technology* 42: 1232-1237.
- Marques L., Silveira A. and Freire J (2006). Freeze drying characteristics of tropical fruits. *Drying Technology* 24: 457-463.
- Maskan M (2001). Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering* 48: 169-175.
- Maskan M (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44(2): 71–78.
- Mohammadi A., Rafiee S., Emam-Djomeh Z., Keyhani A (2008). Kinetic Models for Colour Changes in Kiwifruit Slices During Hot Air Drying. *World Journal of Agricultural Sciences* 4 (3): 376-383.
- Moraga G., Talens P., Moraga M.J., Martínez-Navarrete N (2011). Implication of water activity and glass transition on the mechanical and optical properties of freeze-dried apple and banana slices. *Journal of Food Engineering* 106: 212–219
- Moreno A., León L. and Rios E (2010). Estudio de la cinética fisicoquímica del mango (*Mangifera indica* L. Var. Tommy Atkins) tratado por métodos combinados de secado. *Dyna* 162: 75-84.
- Mujumdar A.S (2007). Handbook of industrial drying. 3^a Ed., New York. Taylor & Francis.
- Orsat V., Yang W., Changrue V. and Raghavan G.S. V (2007). Microwave assisted drying of materials. *Food and Bioproducts Processing* 85: 255-263.
- Pan Z., Shih C., McHugh T. and Hirschberg E (2008). Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying. *Food Science and Technology* 41: 1944-1951.
- Panagiotou N.M., Karathanos V.T. and Maroulis, Z.B (1999). Effect of osmotic agent on osmotic dehydration of fruits. *Drying Technology*. 17 (1–2): 175–189.
- Pardo, M. & Leiva A. (2010). Effect of different pre-treatments on energy consumption during freeze drying of pineapple pieces. *Revista de Ciencia y tecnología de América –Interciencia* 35: 934-938.
- Pardo M. and Leiva D (2009). Combination of technologies for the dehydration of pineapple. *Ingeniería y Competitividad* 11: 57-65.
- Pascual L. A.; Azuara E.; Díaz R.; Silva E. R (2010). Use of osmotic dehydration by stages to extend the postharvest life of guava. *CyTA – Journal of Food* 8(3): 217–228.
- Pereira L M., Ferrari C.C , Mastrantonio S.D.S, Rodrigues A.C.C. and Hubinger M.D (2006). Kinetic aspects, texture and color evaluation of some tropical fruits during osmotic dehydration. *Drying Technology* 24: 475-484.
- Pereira N, Marsaioli A. and Ahrné L (2007). Effect of microwave power, air velocity and temperature on the final drying of osmotically dehydrated bananas. *Journal of Food Engineering* 81: 79-87.
- Picouet P. A., Landl A., Abadias M., Castellari M., Viñas I (2009). Minimal processing of a Granny Smith apple purée by microwave heating. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 10: 545–550.
- Ponkham K., Meeso N., Soponronnarit S., Siriamornpun S. (2011). Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage. *Food Bioprod Process*, doi:10.1016/j.fbp.2011.02.008

- Ponting J.D (1973). Osmotic dehydration of fruits - recent modifications and applications. *Process Biochem.* 8: 18-20.
- Prothon F., Ahrn´e L., Funebo T., Kidman S., Langton M. and Sjolholm (2001). *LWT-Food Sci Technology.* DOI 34:95–101.
- Ramallo L.A., Mascheroni R.H (2011). Quality evaluation of pineapple fruit during drying process. *Food and Bioproducts Processing*, 2011: doi:10.1016/j.fbp.2011.06.001.
- Ratti C (2009). *Advances in food dehydration.* Boca Raton, FL: CRC P Taylor & Francis.
- Ratti C (2001). Hot air and freeze-drying of high-values foods: A review. *Journal of Food Engineering.* 49: 311–319.
- Reis R. C., Ramos A. M., Regazzi A. J., Minim V. P. R., Stringueta P. C (2006). Almacenamiento de mango secado: análisis fisicoquímico, microbiológico, color y sensorial storageof dried mango: physicochemical, microbiological, color and sensory analysis. *Ciencia y Tecnología. Alimentaria.* 5(3) :214-225.
- Restrepo A., Cortés M. and Márquez C (2009). Uchuvas (*Physalis peruviana* L.) mínimamente procesadas fortificadas con vitamina E. *Vitae* 16: 19-30.
- Reyes A, Vega R, Bustos R y Araneda C (2008). Effect of processing conditions on drying kinetics and particle microstructure of carrot. *Drying Technology*, 26: 1272-1285.
- Rodríguez R., Lombrana J.I. and Aguado R (2004). Thermal response of a food model dried under microwave. In *Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, Saõ Paulo, Brazil. C: 1735–1742.
- Rodrigues A, Cunha R., Hubinger M (2003). Rheological properties and colour evaluation of papaya during osmotic dehydration processing. *Journal of Food Engineering* 59: 129–135
- Sablani SS. and Rahman MS (2003). Effect of syrup concentration, temperature and sample geometry on equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of mango. *Food Res. Int.* 36: 65-71.
- Sagar V. R. and Suresh Kumar P (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal Food Science Technology* 47: 15-26.
- Sanjinez E.J., Menegalli F.C., Cunha R.L. and Hubinger M.D (2005). Evaluation of total carotenoids and ascorbic acid in osmotic pretreated guavas during convective drying. *Italian Journal of Food Science.*17: 305–314.
- Santamaría F., Díaz R. , Sauri E., Espadas F , Santamaría J., Larqué A (2009a). Características de calidad de frutos de papaya maradol en la madurez de consumo. *Agricultura Técnica en México* 35: 347-353.
- Santamaría F., Sauri E., Espadas F , Díaz R., Larqué A., Santamaría J. (2009b). Postharvest ripening and maturity indices for maradol papaya. *Interciencia* 34: 583-588.
- Saxena S., Mishra B.B. , Chander R., Sharma A (2009). Shelf stable intermediate moisture pineapple (*Ananas comosus*) slices using hurdle technology. *LWT - Food Science and Technology* 42: 1681–1687.
- Shih C., Pan Z., McHugh T., Wood D. and Hirschberg E (2008). Sequential infrared radiation and freeze drying method for producing crispy strawberries. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 51: 205-216.
- Shishegarha F., Makhlouf J., Ratti C.(2002). Freeze-drying characteristics of strawberries. *Drying technology*, 20(1): 131–145.
- Silveira E. , Rahman S., Buckle K (1996) .Osmotic dehydration of pineapple: kinetics and product quality. *Food Research International.* 29: 227-233.
- Singh N. & Nath N. (2008). Changes in qualities of minimally processed litchis: Effect of antibrowning agents, osmo-vacuum drying and moderate vacuum packaging. *Swiss Society of Food Science and Technology.* *LWT* 41: 660–668
- Sloan E (2007). Top 10 Food Trends. *Food Technology Magazine.* Volume 61, No.4 . <http://www.ift.org/food-technology/past-issues/2007/april.aspx>. (último acceso: 15 de julio de 2011)
- Sriwimon W., Boonsupthip W (2011). Utilization of partially ripe mangoes for freezing preservation by impregnation of mango juice and sugars. *LWT - Food Science and Technology* 44: 375-383.
- Sun D. (2005). *Emerging technologies for food processing.* Ed.,San Diego. Elsevier Academic Press.

- Taiwo K. A., Eshtiaghi M. N. , Ade-Omowaye B. I. O. & Knorr D (2003). Osmotic dehydration of strawberry halves: influence of osmotic agents and pretreatment methods on mass transfer and product characteristics. *International Journal of Food Science and Technology* 38: 693–707.
- Talens P., Martinez-Navarrete N., Fito P., Chiralt A (2001). Changes in optical and mechanical properties during osmodehydrofreezing of kiwi fruit. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 3: 191-199.
- Tan M.; Chua K. J.; Mujumdar A. S.; Chou S. K (2001). Effect of osmotic pre-treatment and infrared radiation on drying rate and color changes during drying of potato and pineapple. *drying technology*, 19(9): 2193–2207.
- Tedjo W., Taiwo K.A., Eshtiaghi M. N. , Knorr D (2002). Comparison of pretreatment methods on water and solid diffusion kinetics of osmotically dehydrated mangos. *Journal of Food Engineering* 53: 133–142.
- Thuwapanichayanan R., Prachayawarakorn S., Kunwisawa J., Soponronnarit S. (2011). Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. *LWT - Food Science and Technology* 44: 1502-1510
- Torreggiani D (1993). Osmotic dehydration in fruits and vegetable processing. *Food Res Int.* 26: 59–68.
- Torreggiani D. and Bertolo, G (2004). Present and future in process control and optimization of osmotic dehydration. In Steve L. Taylor (Ed.), *Advanced in Food and Nutrition Research.* 48: 174–225.
- Tortoe C (2010). A review of osmodehydration for food industry. *African Journal of Food Science* 4: 303-324.
- Tregunno N. B. & Goff H. D. (1996). Osmodehydrofreezing of apples: structural and textural effects. *Food Research International*, 29:411-419.
- Tsami E. & Katsioti M (2000). Drying kinetics for some fruits: predicting of porosity and color during dehydration. *Drying technology*, 18(7): 1559-1581.
- Vadivambal R., Jayas D.S (2007). Changes in quality of microwave-treated agricultural products—a review. *Biosystems Engineering* 98:1 – 16.
- Van Boekel M (2008). Kinetic Modeling of Food Quality: A Critical Review. *Comprehensive reviews in food science and food safety* 7: 144-157
- Van-Nieuwenhuijzen NH., Zareifard MR. and Ramaswamy HS (2001). Osmotic drying kinetics of cylindrical apple slices of different sizes. *Drying. Technology.* 19: 525-545.
- Vega H, Gongora M., Barvosa G (2001). Advances in dehydrations of foods. *Journal of Food Engineering* 49: 271-289.
- Venir E., Munari M., Tonizzo A. and Maltini E (2007). Structure related changes during moistening of freeze dried apple tissue. *Journal of Food Engineering* 81: 27-32.
- Waliszewski K., Cortes H.D, Pardio V. T., Garcia M.A (1999). Color parameter changes in banana slices during osmotic dehydration. *Drying technology* 17: 955-960.
- Waliszewski K.N., Delgado J.L. and Garcia M.A (2002). Equilibrium concentration and water and sucrose diffusivity in osmotic dehydration of pineapple slabs. *Drying Technology.* 20: 527–538.
- Wang R, Zhang M. and Mujumdar A. S (2010). Effect of vacuum and microwave freeze drying on microstructure and quality of potato slices. *Journal of Food Engineering* 101: 131-139.
- Wang Z., Fang S. and Hu X (2009). Effective Diffusivities and Energy Consumption of Whole Fruit Chinese Jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) in Microwave Drying. *Drying Technology: An International Journal* 27: 1097 – 1104.
- Wais N.L., Santos, M.V., Marani, C.M., Agnelli, M.E. and Mascheroni R.H (2004). Osmotic dehydration and combined osmotic dehydration-hot air drying of banana and apple slices. mass transfer and quality issues. *Drying 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004) São Paulo, Brazil, 22-25 August.* (C): 2201-2206
- Wu G., Zhang M., Mujumdar A.S and Wang R (2010). Effect of Calcium Ion and Microwave Power on Structural and Quality Changes in Drying of Apple Slices. *Drying Technology* 28: 517-522.

- Xu Y., Zhang M., Mujumdar A., Duan X. and Jin-cai S (2006). A Two-Stage Vacuum Freeze and Convective Air Drying Method for Strawberries. *Drying Technology: An International Journal* 24: 1019 – 1023.
- Yang A., Wills C., Yang T. (1987). Use of a Combination Process of Osmotic Dehydration and Freeze Drying to Produce a Raisin-Type Lowbush Blueberry Product. *Journal of food science* 52:1651-1653
- Zhang M., Jiang H. y Rui-Xin L. (2010). Recent Developments in Microwave-Assisted Drying of Vegetables, Fruits and Aquatic Products- Drying kinetics and Quality Considerations. *Drying Technology*. 28: 1307-1316.
- Zhang M., Tang J., Mujumdar A.S. and Wang S (2006). Trends in microwave related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology* 17: 524-534.

3.2 Efecto de las tecnologías de deshidratación sobre las propiedades de los tejidos en las frutas

La calidad de los productos deshidratados es muy importante en las decisiones de compra para este tipo de productos. El color es uno de los primeros atributos que evalúa el consumidor, seguidos de sabor, textura y valor nutritivo (Barrett *et al.*, 2010; Andrés *et al.*, 2007; Askari *et al.*, 2009). A continuación se presentan los efectos en la textura, contenido vitamínico y propiedades organolépticas, al aplicar algunas tecnologías de deshidratación en tejidos de frutas. Así como el efecto en el consumo energético.

3.2.1 Efecto en la textura

Las propiedades físicas de los tejidos vegetales son susceptibles de cambio durante el proceso de secado. El encogimiento es uno de los principales cambios físicos que se produce. Es el resultado del colapso de los capilares durante la evaporación del agua, que tiene un impacto negativo en la calidad de los productos. Al principio, la contracción provoca cambios en la forma del producto. Estos cambios se deben a los esfuerzos desarrollados mientras el agua se retira del tejido (Mayor *et al.*, 2011).

Autores como Wu *et al.*, (2010) encontraron en rodajas de manzana que la energía de microondas tiene un impacto en la dureza, aumentando el encogimiento con el incremento en los niveles de potencia, atribuido a la disminución en los niveles de protopectina en las células. Igualmente Contreras *et al.*, (2007) obtuvo al combinar

deshidratación osmótica con microondas que ambas tecnologías aumentan la resistencia mecánica y la rigidez en los tejidos. De acuerdo con (Sagar & Kumar, 2010) los cambios químicos asociados con los cambios de textura en frutas y hortalizas son la cristalización de la celulosa, la degradación de pectina, y gelatinización del almidón.

El encogimiento reduce el número y tamaño de los poros (Lewicki, 1998), afectando la calidad del producto en términos de rehidratación y textura (Genskow, 1998). Algunos autores han encontrado relación lineal entre encogimiento y contenido de humedad, por ejemplo en manzanas secas en un horno a 70 °C (Witrowa *et al.*, 2009). De acuerdo con Cui *et al.*, (2008) y Agnieszka & Andrzej (2010) el proceso de liofilización permite obtener estructuras mas porosas, en comparación con el proceso de microondas en el cual se genera un colapso estructural debido a la velocidad de evaporación del agua durante el secado.

3.2.2 Efecto en contenido vitamínico

Las frutas son ricas en vitamina C, la cual es relativamente inestable al calor, oxígeno y la luz. (Marques *et al.*, 2006, Sagar & Kumar, 2010). La retención de este nutriente es un índice de calidad de productos deshidratados. De acuerdo con Lin et al (1998) si el contenido de vitamina C es retenido, los otros nutrientes también son generalmente conservados. Autores como Santos & Silva, (2008); Ramallo & Mascheroni, 2011; Khraisheh *et al.*, (2004) y Bohm *et al.*, 2006 afirman que los parámetros como la temperatura y el tiempo de secado influyen en las pérdidas de vitamina C, afectando la calidad en los productos (Chou & Chua, 2001).

En tratamientos osmóticos el incremento de la temperatura afecta en mayor medida el contenido de vitamina C en comparación con la concentración de la solución (Heng *et al.*, 1990). Bórquez *et al.*, (2010) argumenta también que en este proceso al reutilizar la solución se reducen las pérdidas de vitamina.

En procesos de microondas ésta vitamina se afecta por el incremento en los niveles de potencia (Wu *et al.*, 2010), sin embargo en comparación con procesos como secado por aire caliente el calentamiento por microondas permite mayor retención debido a los bajos niveles de oxígeno (Sablani, 2006; Santos & Silva, 2008).

En tecnologías de liofilización las bajas temperaturas y el vacío permiten mayor retención de vitamina C en las frutas alcanzando valores hasta el 97 % (Fahloul *et al.*, 2009; Cui *et al.*, 2008).

3.2.3 Efecto en propiedades organolépticas

En términos sensoriales la calidad de los productos deshidratados se ve afectada al aplicar procesos como calentamiento por microondas. En estos procesos altos niveles de potencia y largos tiempos de proceso deterioran el producto a nivel sensorial especialmente en términos de sabor y apariencia, debido al sobrecalentamiento que se puede presentar en el tejido (Li *et al.*, 2010b; Jiang *et al.*, 2010). Autores como (Sham *et al.*, 2001 y Han *et al.*, 2010) han encontrado que la aplicación de microondas con vacío permite mejorar la calidad en los productos puesto que pueden ser desarrollados a más bajas temperaturas. De acuerdo con (Marques *et al.*, 2006) las diferencias en el “Flavor” entre la fruta fresca y deshidratada se debe a las pérdidas de compuestos volátiles durante las pérdidas de humedad. El flavor es la combinación de sensaciones de sabor y aroma que se pueden percibir para ese caso en las frutas. El flavor puede tener el mayor impacto en la aceptación y en el deseo de consumir un producto de nuevo (Barrett *et al.*, 2010).

Una de las tecnologías de deshidratación que permite obtener productos de alta calidad es la liofilización (Xu *et al.*, 2006). De acuerdo con (Huang *et al.*, 2009 by Krokida *et al.*, 1998) ésta tecnología permite mayor retención de sabor, color y aroma en los productos en comparación con otras tecnologías de secado.

En procesos de deshidratación osmótica es posible que los productos se obtengan o más dulces o más salados dependiendo del tipo de soluto en la solución, así mismo se pueden obtener productos menos ácidos lo cual es favorable en algunos casos (Jiang *et al.*, 2010; Tortoe, 2010). De acuerdo con Konopacka *et al.*, (2009) los procesos osmóticos no solamente afectan el sabor sino también el perfil de textura en fruta deshidratada. Igualmente autores como Changrue *et al.*, (2008) afirman que este proceso pueden influir positivamente en la aceptación del sabor y la apariencia de fresas deshidratadas sometidas a calentamiento con microondas.

3.2.4 Efecto en consumo de energía

Tal como se comentó anteriormente, la liofilización aunque es reconocida por la calidad en los productos, requiere de tiempos largos de proceso y altos consumos de energía (Ratti, 2009; Duan *et al.*, 2010; Cui *et al.*, 2008). De acuerdo con Erdogdu, (2009) esto se debe principalmente a las etapas de sublimación, presiones de vacío (por debajo de 100 Pa) y condensación de vapores recuperados (a temperaturas por debajo de -50 °C).

Por el contrario algunos investigadores han encontrado que tecnologías como microondas son eficientes en términos de energía y tiempo (Zhang *et al.*, 2010; Bórquez *et al.*, 2010; Orsat *et al.*, 2007). Autores como Gunasekaran (1999), Mandal *et al.*, (2007) y Cendres *et al.*, (2011) reportan que la aplicación de pulsos en microondas con cortos tiempos de proceso, puede ser más eficiente a nivel energético; Igualmente controlando la potencia generando menos fluctuaciones en la temperatura interna del tejido (Li *et al.*, (2010a). Por tanto teniendo en cuenta los beneficios de esta tecnología algunos autores la han combinado con liofilización para optimizar este proceso (Huang *et al.*, 2009b).

La deshidratación osmótica también ha sido combinada para disminuir los consumos de energía (Botha, 2011; Tortoe, 2010). En anteriores investigaciones se han combinado microondas y deshidratación osmótica aplicadas previamente en procesos de liofilización de piña obteniendo mayor eficiencia (Pardo & Leiva, 2010).

Con el fin de medir el efecto de procesos combinados de microondas y liofilización en el consumo de energía, autores como Huang *et al.*, (2009) evaluaron en manzana el consumo mediante un balance de energía teniendo en cuenta las etapas más importantes durante el proceso. Para este fin se tuvo en cuenta las etapas durante la liofilización de la fruta (sublimación, desorción, calentamiento, vacío, condensación y evaporación) y durante el proceso de microondas (calentamiento, evaporación y fusión). Estos resultados fueron comparados con el proceso de liofilización a nivel individual obteniendo ahorros hasta por debajo del 50%.

Por tanto, la combinación de tecnologías de deshidratación se convierte en una posibilidad para desarrollar procesos mas eficientes y por ende productos más competitivos (Raghavan *et al.*, 2005).

BIBLIOGRAFÍA

- Agnieszka C. and Andrzej L (2010). Structural Impact of Osmotically Pretreated Freeze-Dried Strawberries on Their Mechanical Properties. *International Journal of Food Properties* 13:1134 – 1149.
- Andrés A., fito P., Heredia A. and Rosa E. M (2007). Combined drying technologies for development of high quality shelf stable mango products. *Drying Technologies* 25: 1857-1866.
- Askari G. R, Emam-Djomeh Z. and Mousavi S. M (2009). An Investigation of the Effects of Drying Methods and Conditions on Drying Characteristics and Quality Attributes of Agricultural Products during Hot Air and Hot Air/Microwave-Assisted Dehydration. *Drying Technology: An International Journal* 27: 831 – 841.
- Barrett D., Beaulieu J., Shewfelt T R (2010). Color, Flavor, Texture, and Nutritional Quality of Fresh-Cut Fruits and vegetables: Desirable Levels, Instrumental and Sensory Measurement, and the Effects of Processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 50: 369–389.
- Bohm V; Kuhnert H.R ; Scholze G.(2006). Improving the nutritional quality of microwave vacuum dried strawberries: Apreliminary study. *Food Science and Technology International* 12 (1), 67–75.
- Bórquez R.M., Canales E.R.and Redon J.P (2010). Osmotic dehydration of raspberries with vacuum pretreatment followed by microwave-vacuum drying. *Journal of Food Engineering*, 99: 121-127.
- Botha, G.E., Oliveira, J.C., Ahrn´e, L., (2011). Quality optimisation of combined osmotic dehydration and microwave assisted air drying of pineapple using constant power emission, *Food and Bioproducts Processing*. doi:10.1016/j.fbp.2011.02.006
- Cendres A., Chemat F., Maingonnat J., Renard C. (2011). An innovative process for extraction of fruit juice using microwave heating. *LWT - Food Science and Technology* 44: 1035 -1041
- Contreras C., Martín-Esparza M. E., Martínez-Navarrete N. and Chiralt A (2007). Influence of osmotic pre-treatment and microwave application on properties of air dried strawberry related to structural changes. *European Food Research and Technology* 224: 499-504.
- Cui Z. W., Li CH. Y., Song Ch.F. and Song Y (2008). Combined microwave vaccum and freeze drying of carrot and apple chips. *Drying Technology* 26:1517-1523.

- Changrue V., Orsat V. and Raghavan G.S.V (2008). Osmotically dehydrated microwave-vacuum drying of strawberries. *Journal and Food Processing and Preservation* 32: 798-816.
- Chou, S. K., & Chua, K. J. (2001). New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs. *Trends in Food Science and Technology*,12: 359–369.
- Duan X., Zhang M., Li X.L. and Mujumdar A.S (2008). Microwave freeze drying of sea cucumber coated with nanoscale silver. *Drying Technology*. 26 (4): 413–419.
- Erdogdu Ferrh (2009). *Optimization in food Engineering*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Fahloul D., Lahbari M., Benmoussa H. and Mezdour S (2009). Effect of osmotic dehydration on the freeze drying kinetics of apricots. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 7:117-121.
- Genskow, L.R (1998). Considerations in drying consumer products. In *Proceedings of the Fourth International Drying Symposium*; Roques, M.A., Mujumdar, A.S., Eds.; Versailles 39–46.
- Gunasekaran, S (1999). Pulsed microwave-vacuum drying of food materials. *Drying Technol.* 17, 395–412.
- Han Q. H., Yin L.J., Li S.J., Yang B.N. and Ma J. W (2010). Optimization of Process Parameters for Microwave Vacuum Drying of Apple Slices Using Response Surface Method. *Drying Technology* 28: 523-532.
- Heng, K.; Guilbert, S.; Cuq, J.L (1990). Osmotic dehydration of papaya: Influence of process variables on the product quality. *Sciences des Aliments* 10, 831–848.
- Huang L., Zhang M., Mujumdar A. and Sun D (2009b). Studies on Decreasing Energy Consumption for a Freeze-Drying Process of Apple Slices. *Drying Technology* 27: 938–946.
- Jiang Hao., Zhang Min. and Mujumdar Arun S (2010). Microwave Freeze-Drying Characteristics of Banana Crisps. *Drying Technology*. 28: 1377–1384.
- Khraisheh, M. A. M, McMinn, W. A. M, and Magee, T.R.A. (2004). Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. *Food Research International*, 37: 497-503.
- Konopacka D; jesionkowsk A; klewicki R & Bonazzi C. (2009). The effect of different osmotic agents on the sensory perception of osmo-treated dried fruit *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* Isafruit Special Issue 80–84
- Krokida, M.K.; Karathanos, V.T.; Maroulis, Z.B. Effect of freeze-drying conditions on shrinkage and porosity of dehydrated agricultural products. *Journal of Food Engineering*, 35, 1998, 369–380.
- Lewicki, P.P (1998). Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties: A review. *International Journal of Food Properties*, 1: 1–22.
- Li Z., Raghavan G.S.V. and Orsat V (2010a). Optimal power control strategies in microwave drying. *Journal of Food Engineering* 99: 263–268.
- Li Z., Raghavan G.S.V. and Orsat V (2010b). Temperature and power control in microwave drying. *Journal of Food Engineering* 97: 478-483.
- Lin, T.M.; Durance, T.D.; Scaman, C.H. (1998). Characterization of vacuum microwave, air and freeze-dried carrot slices. *Food Research International*, 31 (2): 111–117.
- Mandal V., Mohan Y., Hemalatha S. Microwave Assisted Extraction – An Innovative and Promising Extraction Tool for Medicinal Plant Research Review (2007). *Pharmacognosy Reviews* 1 (1): 7-18
- Marques L., Silveira A. and Freire J (2006). Freeze drying characteristics of tropical fruits. *Drying Technology* 24: 457-463.
- Mayor L (2011). Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) fruits *Journal of Food Engineering* 103: 1, 29-37
- Orsat V., Yang W., Changrue V. and Raghavan G.S. V (2007). Microwave assisted drying of materials. *Food and Bioproducts Processing* 85: 255-263.
- Pardo, M. & Leiva A. (2010). Effect of different pre-treatments on energy consumption during freeze drying of pineapple pieces. *Revista de Ciencia y tecnología de América –Interciencia* 35: 934-938.
- Raghavan, G.S.V.; Orsat, V.; Meda, V. (2005). Microwave processing of foods. *Stewart Postharvest Review* 3 (2): 1–7
- Ramallo L.A., Mascheroni R.H (2011). Quality evaluation of pineapple fruit during drying process. *Food and Bioproducts Processing*, 2011: doi:10.1016/j.fbp.2011.06.001.
- Ratti C (2009). *Advances in food dehydration*. Boca Raton, FL: CRC P Taylor & Francis.

- Sablani SS (2006) Drying of fruits and vegetables: retention of nutritional/ functional quality. *Drying Technol* 24:428–432
- Sagar V. R. and Suresh Kumar P (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal Food Science Technology* 47: 15-26.
- Santos PHS & Silva MA (2008): Retention of vitamin C in drying processes of fruits and vegetables a review. *Drying Technology*. 26: 1421-1437
- Sham, P.W.Y.; Scaman, C.H.; Durance, T.D. (2001). Texture of vacuum microwave dehydrated apple chips as affected by calcium pretreatment, vacuum level, and apple variety. *Journal of Food Science*, 66 (9):1341–1347.
- Tortoe C (2010). A review of osmodehydration for food industry. *African Journal of Food Science* 4: 303-324.
- Witrowa-Rajchert D. and Rzaca M (2009). Effect of drying method on the microstructure and physical properties of dried apples. *Drying Technology* 27: 903-909.
- Wu G., Zhang M., Mujumdar A.S and Wang R (2010). Effect of Calcium Ion and Microwave Power on Structural and Quality Changes in Drying of Apple Slices. *Drying Technology* 28: 517-522.
- Xu Y., Zhang M., Mujumdar A., Duan X. and Jin-cai S (2006). A Two-Stage Vacuum Freeze and Convective Air Drying Method for Strawberries. *Drying Technology: An International Journal* 24: 1019 – 1023.
- Zhang M., Jiang H. y Rui-Xin L. (2010). Recent Developments in Microwave-Assisted Drying of Vegetables, Fruits and Aquatic Products- Drying kinetics and Quality Considerations. *Drying Technology*. 28: 1307-1316.

4 CAPITULO 2. METODOLOGÍA

La metodología se describe de acuerdo con la estructura de la tesis. En primer lugar se presenta los procedimientos que se tuvieron en cuenta en el desarrollo de los experimentos preliminares (numeral 4.3). En éste punto se describe las tecnologías aplicadas que permitieron un primer avance en el análisis de consumos de energía y propiedades del tejido deshidratado, que hacen parte de la primera publicación del presente proyecto (Anexo 4). Adicionalmente en éste punto se presenta la metodología de los tratamientos aplicados previamente al proceso de liofilización (numeral 4.3.2) como deshidratación osmótica, calentamiento por microondas y la combinación microondas –deshidratación osmótica. Cabe aclarar que los resultados obtenidos en ésta primera etapa fueron base fundamental para la selección de los procesos combinados.

En segundo lugar se describe el proceso de liofilización aplicado en las muestras sometidas a los pretratamientos seleccionados (Numeral 4.4). Finalmente se presentan los métodos para el análisis de estas muestras en términos de contenido de sólidos solubles, contenido de humedad, color, textura, propiedades sensoriales, contenido de vitamina y análisis de consumo de energía.

4.1 Selección de la materia prima

Se utilizó Piña (*Ananas comosus*) variedad Golden para el desarrollo de los experimentos. Esta fue obtenida en el mercado local procedente de la región del Valle del Cauca. Las piñas fueron seleccionadas con grado de maduración 3 (basada en la carta NTC 4102, 1997) teniendo en cuenta el color de la corteza; adicionalmente sin presencia de daños por insectos, golpes o fisuras.

4.2 Preparación de las muestras

Las piñas fueron manualmente peladas, tajadas en rodajas y posteriormente cortadas en trapecios de 10 x 30 mm en lados paralelos y 5 mm de espesor, con un peso promedio por muestra de 6 ± 0.5 g.

4.3 Tratamientos preliminares

Los experimentos preliminares se desarrollaron con el fin de analizar el consumo de energía de los procesos combinados de secado por microondas (M), deshidratación osmótica (OD) y liofilización (FD), como también los efectos de éstas combinaciones en la textura, el color y las propiedades organolépticas. Así mismo evaluar la cinética de los pretratamientos de deshidratación en OD y la combinación de MOD, ver artículos del capítulo 3.

4.3.1. Metodología para el análisis de consumo de energía y propiedades en el tejido

Muestras de piña fueron sometidas a FD, como también a procesos combinados ODFD, MFD y MDFD (Figura 4.1).

El proceso OD se desarrolló en soluciones concentradas de sacarosa (60 °Brix, relación 1:5 producto: solución w/w, 20 ° C), sin agitación a presión atmosférica durante 75 minutos. Al terminar los procesos el exceso de la solución fue retirada con paños absorbentes.

El proceso M se llevó a cabo con muestras de 50 g de piña utilizando un horno microondas (HACEB HM1.1), suministrando una potencia de 20 kW/kg, durante 1 minuto (sin tener en cuenta la ineficiencia del equipo).

Para los procesos previos combinados de M y OD, se tuvo en cuenta las condiciones anteriores con un tiempo de proceso de 1 minuto y 74 minutos, respectivamente.

El proceso FD se llevó a cabo en un liofilizador Labconco a una presión de 0,15 mbar y temperatura de secado a 40 ° C. Este proceso se realizó durante 8 horas, tiempo en el cual se pesaron las muestras cada media hora con una balanza electrónica de Mettler (+ / - 0,01 g) dentro de la cámara de secado, con el fin de analizar la cinética de sublimación. Igualmente se liofilizaron muestras durante 48h con el fin de analizar el consumo de energía, textura, color y las propiedades organolépticas del producto terminado.

- *Diseño Experimental:*

Como se muestra en la Figura 4.1., se trabajó con experimentos de un factor. En total 4 tratamientos desarrollados bajo las siguientes condiciones:

Potencia en M: 20 kW/kg

Tiempo de proceso de M: 1 minuto

Concentración de OD: 60°Brix

Tiempo de OD: 75 y 74 minutos

Temperatura de congelación en FD: -40°C

Temperatura de placas de secado en FD: 40°C

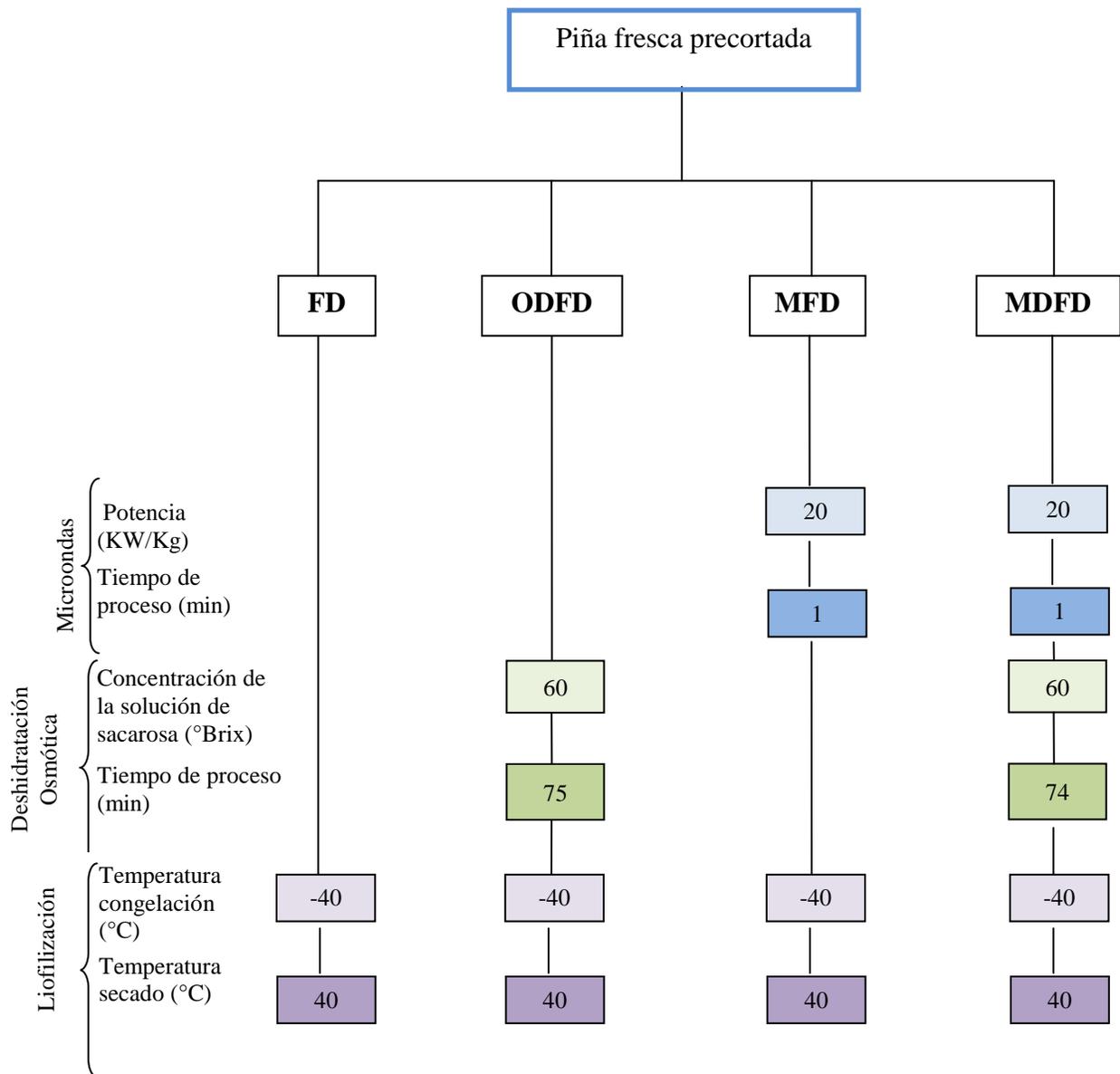


Figura 4.1. Diseño experimental procesos FD, ODFD, MFD y MDFD

4.3.2 Metodología para el análisis de cinética de deshidratación

Las muestras de piña fueron sometidas a OD utilizando solución de sacarosa a 40 y 60 °Brix, manteniendo una proporción producto solución de 1:5 p/p. El proceso fue llevado a cabo durante 30, 90 y 150 minutos, a 20°C (Figura 4.2). Al finalizar el tratamiento las muestras fueron retiradas de la solución, eliminando el contenido superficial del jarabe de sacarosa con papel absorbente.

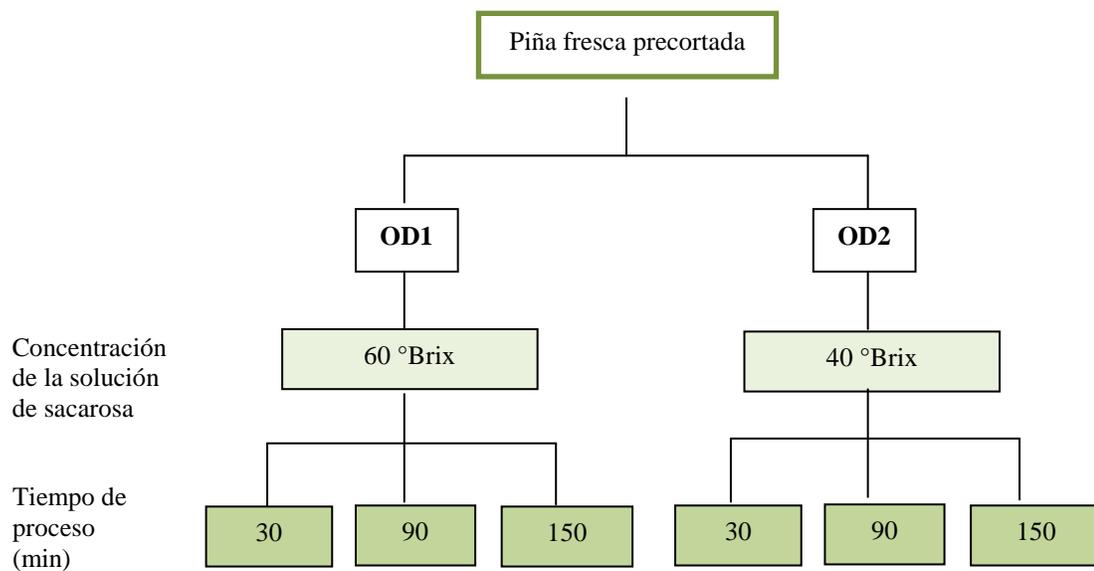


Figura 4.2. Diseño experimental proceso OD

- *Diseño Experimental:*

Como se muestra en la Figura 4.2, se trabajó con un diseño factorial completo, con dos factores:

Concentración de la solución en OD: 60 y 40 °Brix

Tiempo de OD: 30, 90 y 150 minutos

Las muestras de piña también fueron sometidas al proceso M aplicado en un equipo HACEB HM1.1. El proceso se realizó a 40, 20 y 8 kW/kg durante 1, 2 y 5 minutos respectivamente (Figura 4.3), garantizando un mismo nivel de energía entregada (27 kJ).

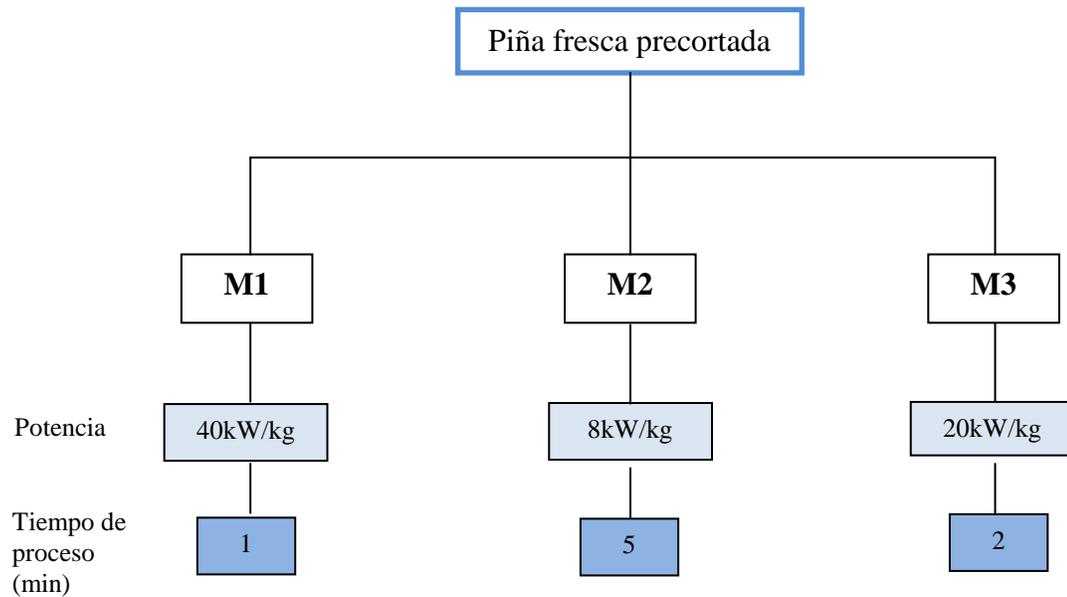


Figura 4.3. Diseño experimental proceso M

- *Diseño Experimental:*

Como se muestra en la Figura 4.3, se trabajó con experimentos de un factor. En total tres tratamientos se presentan (M1, M2, M3), bajo las siguientes condiciones:

M1: 40 kW/kg, durante 1 minuto

M2: 8 kW/kg, durante 5 minutos

M3: 20 kW/kg, durante 2 minutos

Finalmente se combinaron los dos procesos, aplicando primero microondas seguido de deshidratación osmótica (MOD), bajo las mismas condiciones descritas anteriormente (Figura 4.4).

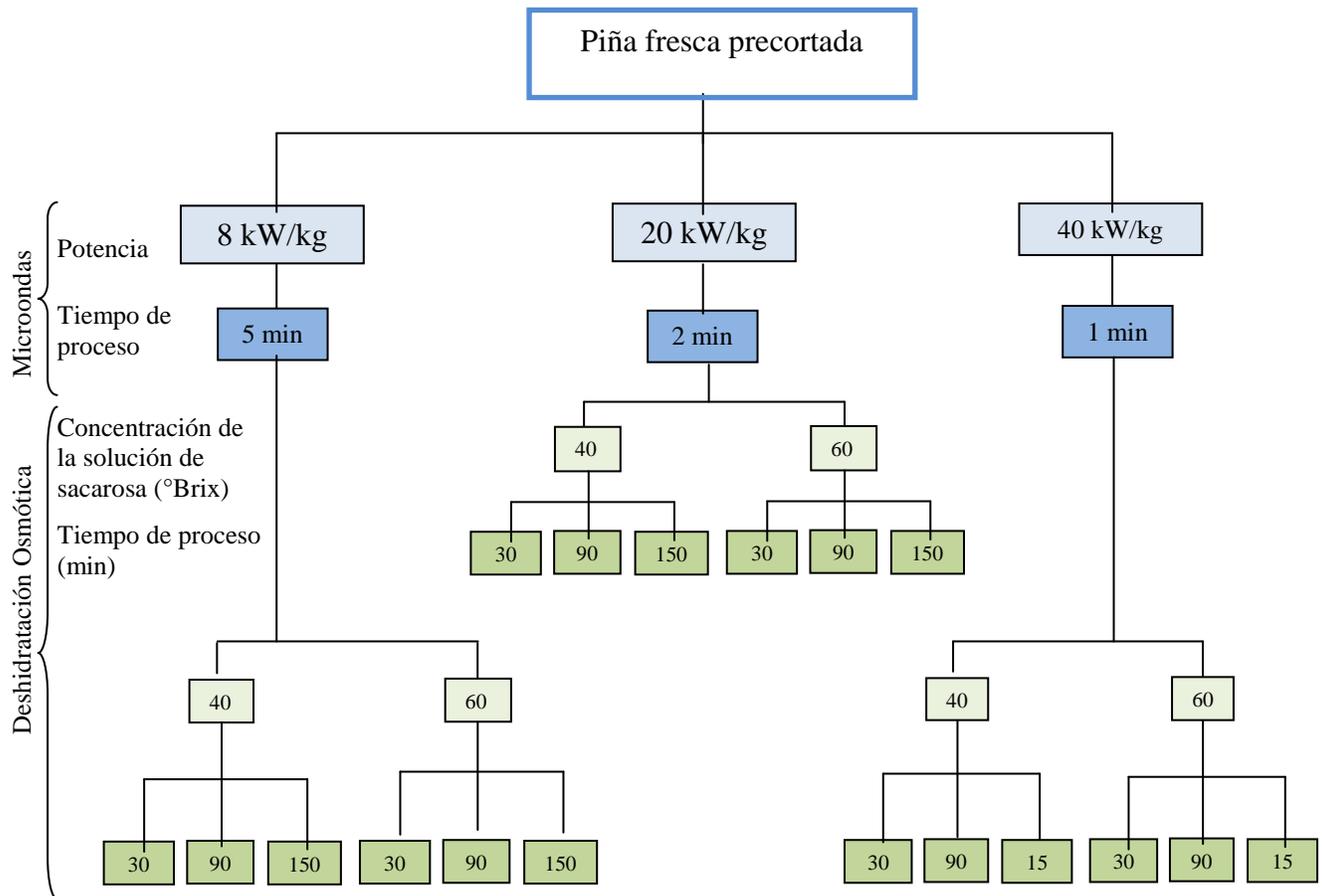


Figura 4.4. Diseño experimental proceso MOD

- *Diseño Experimental:*

Como se muestra en la Figura 4.4, se trabajó con un diseño factorial completo, con tres factores:

Tratamiento de microondas: M1 (40 kW/kg, 1 minuto), M2(8 kW/kg, 5 minutos), M3 (20 kW/kg, 2 minutos)

Concentración de OD: 60 y 40 °Brix

Tiempo de OD: 30, 90 y 150 minutos

Las muestras deshidratadas mediante OD y MOD, fueron analizadas en términos de pérdidas de humedad (ΔM_w) y ganancia de sólidos (ΔM_s), teniendo en cuenta las ecuaciones Ec.1 y Ec.2, respectivamente (Shi *et al*, 1995); éstas variables de respuesta fueron analizadas mediante un análisis de varianza ANOVA ($p < 0,05$).

$$\Delta M_w = \frac{M_t X_{wt} - M_0 X_{w0}}{M_0} \quad (\text{Ec.1})$$

$$\Delta M_s = \frac{M_t X_{st} - M_0 X_{s0}}{M_0} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde:

M_0 es peso inicial (g)

M_t es peso en el tiempo t (g)

X_{w0} es fracción de masa inicial de agua (g/g)

X_{s0} es fracción de masa inicial de solutos solubles (g/g)

X_{wt} es fracción de masa de agua en el tiempo t (g/g)

X_{st} es la fracción de masa de solutos solubles en el tiempo t (g/g).

4.4 Aplicación de tecnologías combinadas con el proceso de liofilización -Procesos finales

A partir de los procesos OD, M y la combinación MOD desarrollados en las preliminares donde se analizó la cinética de deshidratación (numeral 4.3.2) se seleccionaron:

- En OD, 4 procesos teniendo en cuenta los que presentaron mayor y menor grado de deshidratación, así como mayor y menor ganancia de sólidos.
- En M se seleccionaron 2, de acuerdo al mayor y menor grado de deshidratación
- En MOD se seleccionaron 4, de acuerdo con los que presentaron mayor y menor grado de deshidratación, así como mayor y menor ganancia de sólidos.

Finalmente fueron liofilizadas las muestras de piña sometidas a los pretratamientos seleccionados en un equipo Labconco Modelo 79480, congelando a -40°C , con temperatura de secado a 40°C , durante 48 h y 14.7 Pa. Igualmente se liofilizó fruta fresca tomando los productos como blancos para el análisis de los demás procesos combinados.

4.5 Métodos Analíticos

A continuación se presenta los métodos utilizados para el análisis de las muestras de fruta deshidratada.

4.5.1 Determinación del contenido de sólidos solubles

La medición de sólidos solubles se realizó por refractometría ($^{\circ}\text{Brix}$) según método 932.12 AOAC (2000) por triplicado, a partir de una alícuota obtenida después de haber pasado la muestra en un Stomacher-80 Micro-Biomaster (120 segundos).

4.5.2 Determinación del contenido de humedad

El contenido de humedad se determinó mediante el método 934.06 AOAC (2000) empleando una balanza analítica marca Mettler Toledo® de precisión 0,0001g. Los análisis se realizaron por triplicado tanto para la fruta fresca como para las muestras sometidas a los diferentes procesos.

4.5.3 Análisis de color

Las muestras liofilizadas fueron evaluadas de acuerdo con los parámetros de luminosidad L*(negro/blanco), a* (verde/rojo) y b*(azul/amarillo) analizando el cambio de color ΔE con respecto a la fruta fresca, teniendo en cuenta la ecuación Ec.3. Estos parámetros fueron obtenidos a partir del análisis digital de imágenes usando el software ImageJ 1.44 (Rasband, 1997 - 2011), para obtener los parámetros RGB y posteriormente utilizando el programa Easy RGB (libre en la web) teniendo en cuenta una fuente de luz D65 y ángulo de observación de 10° (Fairchild, 2005).

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

$$\Delta L^*: L^*_{\text{muestra}} - L^*_{\text{referencia}}$$

$$\Delta a^*: a^*_{\text{muestra}} - a^*_{\text{referencia}}$$

$$\Delta b^*: b^*_{\text{muestra}} - b^*_{\text{referencia}}$$

En general se evaluaron 3 muestras por tratamiento y de cada una se analizó 3 zonas representativas del tejido.

4.5.4 Análisis de textura

La firmeza fue evaluada como la fuerza máxima de penetración empleando un texturometro TATX2® (Stable Micro Systems LTD. Surrey, Inglaterra) con una sonda cilíndrica de 5 mm de diámetro y base plana (P5). Los parámetros de operación fueron: velocidad pre-ensayo 5mm/s, velocidad de ensayo 3mm/s, velocidad post-ensayo 10mm/s, fuerza de 0.049 N y distancia de penetración 2 mm. Se realizó la medición a cinco muestras de piña liofilizada por replica de tratamiento.

4.5.5 Análisis sensorial

La calidad sensorial fue evaluada por un panel de potenciales consumidores de la fruta deshidratada, con el fin de determinar la aceptación general del producto, en términos de textura, sabor y color. Para este fin participaron 30 consumidores, quienes hicieron la evaluación teniendo en cuenta una escala hedónica de 4 puntos. Estos puntos fueron definidos como: 4-Me gusta mucho, 3- me gusta, 2 no me gusta y 1- me disgusta mucho. Al finalizar la prueba, cada consumidor seleccionó la muestra que más les gustó.

4.5.6 Análisis de vitamina

El contenido de vitamina C se cuantificó mediante cromatografía líquida de alta eficiencia HPLC (Norma UNE-EN 14130: 2003), por duplicado. Ver Anexo 9.

4.5.7 Análisis consumo de energía

Para calcular la energía consumida durante los tratamientos de secado se identificaron puntos de consumo en el proceso FD (es decir, durante el enfriamiento, congelación, subenfriamiento, sublimación, condensación, calentamiento, evaporación y energía de la bomba de vacío), como también durante el proceso M. Se cuantificó el consumo de energía por medio de balances de materia y energía (ver Capítulo 5).

REFERENCIAS

- A.O.A.C (2000). Official methods of analysis of the association of official analytical chemists 17th Edition.
- Fairchild, M. (2005). Color Appearance Models. John Wiley & Sons, England.
- NTC4102 (1997). Frutas Frescas: Piña Manzana - Especificaciones. Instituto Colombino de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC. pp. 1 – 15.
- Rasband, W. S. (1997 - 2011). ImageJ 1.44p, National Institutes of Health. Maryland, USA: [http:// imagej.nih.gov./ij/](http://imagej.nih.gov/ij/).
- Shi XQ, Fito P, Chiralt A (1995). Influence of vacuum treatment on mass transfer during osmotic dehydration of fruits. Food Res. Int. 28: 445-454.
- UNE-EN 14130 (2003). Productos alimenticios. Determinación de vitamina C mediante HPLC. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR),pp. 1 – 16.

5 CAPITULO 3. RESULTADOS PRELIMINARES.

5.1 Introducción experimentos preliminares

En éste capítulo se presentan los resultados de los experimentos preliminares por medio de dos artículos. El objetivo de estos experimentos era hacer un tamiz y preseleccionar procesos que mostraran resultados positivos con respecto a la disminución de energía y bajo impacto negativo sobre las propiedades del producto. Estos preliminares son la base para escoger el mejor diseño experimental con los tratamientos seleccionados.

5.2 ARTÍCULO No 2. Effects of different pre-treatments on energy consumption during freeze drying of pineapple pieces.

Este artículo fue publicado en la revista de Ciencia y Tecnología de América-Interciencia (Anexo 4). En el se analiza las tecnologías combinadas de deshidratación osmótica y calentamiento por microondas como pretratamientos en procesos de liofilización de piña, sobre el consumo de energía, tiempo de secado y parámetros cinéticos.

5.3 ARTÍCULO No.3. Efectos de la aplicación de procesos osmóticos y secado por microondas sobre la cinética de deshidratación y la calidad en tejido de piña liofilizado

En este artículo presentado a continuación, se analiza pérdidas de humedad y ganancia de sólidos, en trozos de piña sometidos a procesos combinados de microondas y deshidratación osmótica. Igualmente se evalúa textura, color y propiedades sensoriales del tejido liofilizado.

EFFECTOS DE LA APLICACIÓN DE PROCESOS OSMÓTICOS Y SECADO POR MICROONDAS SOBRE LA CINÉTICA DE DESHIDRATACIÓN Y LA CALIDAD EN TEJIDO DE PIÑA LIOFILIZADO

RESUMEN

Procesos de deshidratación osmótica (OD), microondas (M) y liofilización (FD) fueron aplicados para obtener piña deshidratada. Se evaluó la cinética de deshidratación en procesos OD (con sacarosa, 20 °C, a 40 y 60°Brix, durante 30, 90 y 150 minutos) y M (a 8, 20 y 40 kW/kg) a nivel individual y combinado. Para este fin se analizó pérdidas de humedad y ganancia de sólidos. Así mismo se analizó textura, color y propiedades organolépticas en el tejido liofilizado sometido a FD, ODFD, MFD Y MDFD, teniendo en cuenta iguales condiciones para M (1 minuto, 1000 W) y FD (40 °C, 48 h). El proceso OD se aplicó a 60 °Brix, durante 75 minutos (en ODFD) y 74 minutos (en MDFD). En general se observó mayor transferencia de agua (hasta en un 58%) en pretratamientos combinados MOD aplicando 40 kW/kg y mayor ganancia de sólidos con 8 kW/kg, ambos con inmersión a 60°Brix durante 90 minutos. En términos de calidad se observó un mayor efecto en la textura por procesos OD. En color se obtuvo cambios hasta del 26.5 en procesos combinados MDFD. A nivel sensorial mayor aceptación en términos de sabor y color se observaron especialmente en tratamientos combinados con pretratamientos OD.

Palabras Clave: liofilización, microondas, deshidratación osmótica, cinética, calidad, fruta.

INTRODUCCIÓN

La piña (*Ananas comosus*) es una fruta de la familia de las Bromeliaceae, nativa de América del Sur. Es una de las frutas tropicales más populares por su sabor, propiedades nutricionales y variedades encontradas en el mercado (Saxena *et al.*, 2009); debido a esto el comercio internacional de la piña ha mostrado gran dinamismo en los últimos años, adicionalmente debido a las múltiples posibilidades de consumo en fresco y procesado (FAO, 2005).

Los procesos de deshidratación reducen la actividad de agua y alargan la vida útil de frutas y verduras (Zhang *et al.*, 2006). Es por esto que son catalogados como principales métodos de conservación de alimentos (Zhang *et al.*, 2010).

La liofilización (FD) es un proceso de secado por sublimación, que permite obtener alimentos deshidratados de gran calidad y buena capacidad de rehidratación, sin embargo una de las desventajas son los tiempos de proceso y alto consumo de energía, reflejados en los costos de operación. (Erdogdu, 2008; Wang *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2009b). Por tanto se han realizado diversas investigaciones combinando procesos de liofilización con otras tecnologías de secado. Con el fin de minimizar costos durante FD, algunos autores han orientado sus investigaciones en reducir el consumo de energía (Xu *et al.*, 2006; Reyes *et al.*, 2008), otros se han centrado en hacer más eficiente el proceso en términos de tiempo, transferencia de masa y calor, así como en analizar combinaciones de tecnologías que han permitido también mejorar algunas propiedades fisicoquímicas de los productos (Andrés *et al.*, 2007; Pardo & Leiva, 2009; Orsat *et al.*, 2007).

En los últimos años se ha combinado tecnologías como el calentamiento por microondas (M) con FD (Wu *et al.*, 2010; Jiang *et al.*, 2010). Esta tecnología permite mediante la aplicación de ondas electromagnéticas menores tiempos de secado, eficiencia energética y mejor calidad de los productos (Zhang *et al.*, 2010). Algunas de las limitaciones son altos costos de puesta en marcha (Schubert, 2006), la no uniformidad del campo

electromagnético que puede producir un sobrecalentamiento en el alimento desarrollando sabores desagradables pérdida de nutrientes y cambios en la estructura (Zhang *et al.*, 2006).

La deshidratación osmótica (OD) es otra que ha sido combinada con FD (Agnieszka & Andrzej, 2010; Fahlou *et al.*, 2009). Esta tecnología es un proceso no térmico que consiste en extraer agua de un producto que se sumerge en una solución osmótica hipertónica, (Azarpazhooh & Ramaswamy, 2010; Ispir & Togrul, 2009), ocasionando difusión simultánea de agua y solutos a través de la membrana celular (Ruiz *et al.*, 2011). La difusión del agua durante el proceso depende de diferentes factores como temperatura, concentración de la solución, tamaño y geometría del producto a deshidratar, relación en masa de producto solución y niveles de agitación. (Andrés *et al.*, 2007), así como características del producto tal como microestructura del tejido (Pereira *et al.*, 2006). Sin embargo a pesar de las numerosas ventajas que presenta OD, entre las que se encuentran retención de propiedades fisicoquímicas, de nutrientes, de propiedades sensoriales y compuestos volátiles (Pereira *et al.*, 2007; Fahloul *et al.*, 2009), es un proceso de deshidratación parcial donde se obtienen productos con alta actividad de agua. Es por esto que OD debe ser combinado con otras tecnologías de deshidratación para mejorar la estabilidad del producto (Marques *et al.*, 2006).

La selección de la tecnología o la combinación de tecnologías influye en la calidad del producto deshidratado, por lo tanto el objetivo de este proyecto es evaluar los efectos de las tecnologías de deshidratación osmótica y microondas sobre la cinética de deshidratación, así como analizar el efecto sobre la textura, el color y las propiedades organolépticas del tejido de piña liofilizado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Piña Fresca (*Ananás comosus*) variedad Golden con grado de maduración 3, fue pelada y cortada en trapecios (10 mm x 30 mm, de lados paralelos y 5 mm de espesor).

Cinética de deshidratación

Las muestras de piña fueron sometidas a OD utilizando solución de sacarosa a 40 y 60 °Brix, manteniendo una proporción producto solución de 1:5 p/p. El proceso fue llevado a cabo durante 30, 90 y 150 minutos, a 20°C. Al finalizar el tratamiento las muestras fueron retiradas de la solución, eliminando el contenido superficial del jarabe de sacarosa con papel absorbente.

Igualmente el proceso M fue aplicado en un equipo HACEB HM1.1. Este se desarrolló a 40, 20 y 8 kW/kg durante 1, 2 y 5 minutos respectivamente, garantizando un mismo nivel de energía entregada (27 KJ).

Finalmente se combinaron los dos procesos, aplicando primero microondas seguido de deshidratación osmótica (MOD), bajo las mismas condiciones descritas anteriormente.

Las muestras deshidratadas mediante OD y MOD, fueron analizadas en términos de pérdidas de humedad (ΔM_w) y ganancia de sólidos (ΔM_s), teniendo en cuenta las ecuaciones Ec.1 y Ec.2, respectivamente; éstas variables de respuesta fueron analizadas mediante un análisis de varianza ANOVA ($p < 0,05$). El contenido de humedad se determinó mediante el método 934.06 AOAC (2000) y el contenido de sólidos solubles por refractometría según método 932.12 AOAC (2000). El contenido de humedad y los sólidos solubles se determinaron por triplicado en muestras frescas y procesadas.

$$\Delta M_W = \frac{M_t X_{wt} - M_0 X_{w0}}{M_0} \quad (\text{Ec.1})$$

$$\Delta M_S = \frac{M_t X_{st} - M_0 X_{s0}}{M_0} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde:

M_0 es peso inicial (g)

M_t es peso en el tiempo t (g)

X_{w0} es fracción de masa inicial de agua (g/g)

X_{s0} es fracción de masa inicial de solutos solubles (g/g)

X_{wt} es fracción de masa de agua en el tiempo t (g/g)

X_{st} es la fracción de masa de solutos solubles en el tiempo t (g/g).

Evaluación de la Calidad

La calidad se evaluó en términos de textura, color y propiedades sensoriales en trozos de piña sometidos a tecnologías FD, ODFD, MFD Y MDFD. Se aplicó OD (1:5 producto: solución sacarosa w/w, a 60 °Brix) durante 75 minutos (para ODFD) y 74 minutos (para MDFD) a 20 °C. Igualmente se aplicó M (20 kW/kg, sin tener en cuenta la ineficiencia del equipo) y FD (40°C, 48h), desarrollando 3 replicas por proceso.

- ***Textura***

La textura fue evaluada en términos de firmeza analizando la fuerza máxima de penetración empleando un texturometro TATX2® (Stable Micro Systems LTD. Surrey, Inglaterra) utilizando una sonda cilíndrica de 5 mm de diámetro y base plana (P5). Los parámetros de operación fueron: velocidad pre-ensayo 5mm/s, velocidad de ensayo 3mm/s, velocidad post-ensayo 10mm/s, fuerza de 0.049 N y distancia de penetración 2 mm. Se realizó la medición a cinco muestras de piña liofilizada por replica de tratamiento.

- **Color**

Las muestras liofilizadas fueron evaluadas de acuerdo con los parámetros de luminosidad L^* (negro/blanco), a^* (verde/rojo) y b^* (azul/amarillo) analizando el cambio de color ΔE con respecto a la fruta fresca, teniendo en cuenta la ecuación Ec.3. Estos parámetros fueron obtenidos a partir del análisis digital de imágenes usando el software Image J 1.44 (Rasband, 1997 - 2011), para obtener los parámetros RGB y posteriormente utilizando el programa Easy RGB (libre en la web) teniendo en cuenta una fuente de luz D65 y ángulo de observación de 10° (Fairchild 2005).

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

$$\Delta L^*: L^*_{\text{muestra}} - L^*_{\text{referencia}}$$

$$\Delta a^*: a^*_{\text{muestra}} - a^*_{\text{referencia}}$$

$$\Delta b^*: b^*_{\text{muestra}} - b^*_{\text{referencia}}$$

En general se evaluaron 3 muestras por tratamiento y de cada una se analizó 3 zonas representativas del tejido

- **Propiedades organolépticas**

La calidad sensorial fue evaluada por un panel de potenciales consumidores de la fruta deshidratada, con el fin de determinar la aceptación general del producto, en términos de textura, sabor y color. Para este fin participaron 30 consumidores, quienes hicieron la evaluación teniendo en cuenta una escala hedónica de 4 puntos. Estos puntos fueron definidos como: 4-Me gusta mucho, 3- me gusta, 2 no me gusta y 1- me disgusta mucho.

Análisis estadístico

Los resultados obtenidos se analizaron mediante un análisis de la varianza – ANOVA con un nivel de confianza del 95%, y una prueba de diferencia de medias Tukey, empleando el software Statgraphics Centurion XV versión 15.2.14. Esta prueba se realizó teniendo en cuenta todos los tratamientos combinados, incluyendo el blanco (FD).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las muestras de piña en fresco fueron evaluadas en cuanto a humedad y sólidos solubles, previamente a los tratamientos OD, M y MOD, obteniendo valores de 86.14% \pm 1.73 (bh) y 13.4 \pm 0.17 respectivamente.

Cinética de deshidratación

La Figura 5.1 presenta ΔM_w y ΔM_s , de la piña sometida a OD. Como se observa, las muestras sometidas a soluciones de 60°Brix presentan mayores pérdidas de humedad en comparación con las muestras sometidas a 40°Brix, especialmente a 90 y 150 minutos. Autores como Tortoe (2010) relacionan que bajas concentraciones en la solución son causa de mínimas pérdidas de agua, puesto que hay menor transferencia de masa por la baja presión osmótica ejercida sobre el tejido. Los valores ΔM_w para 40°Brix y 60 °Brix alcanzan niveles hasta del 12% y 19%, respectivamente., sin presentarse diferencias significativas para cada concentración entre 90 y 150 minutos. Esto puede ser debido a que la salida del agua se hace más difícil durante las últimas etapas, debido a la acumulación de sacarosa en la superficie de la fruta, lo que conduce a una menor diferencia de potencial osmótico (Azarpazhooh & Ramaswamy, 2010). En ΔM_s se observó la misma tendencia obteniéndose valores hasta del 15% en procesos a 60°Brix durante 150 minutos.

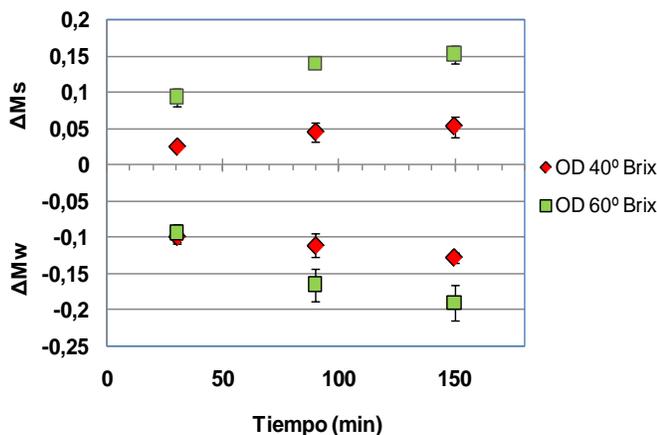


Figura 5.1. Pérdidas de humedad y ganancia de sólidos en muestras de piña sometidas a OD

Resultados similares fueron encontrados por Shi *et al.*, (1995) reportando ΔM_w del 17% en piña sometida a OD (30°C, 65 °Brix y 120 minutos). Igualmente Rastogi *et al.*, (2004) analizaron la transferencia de masa en piña durante OD, encontrando un efecto significativo en la cinética de deshidratación debido al aumento en la concentración de la solución, obteniendo en ΔM_w (entre 14% y 19%) y ΔM_s (entre 9% y 18%) durante 40 y 120 minutos, respectivamente, especialmente a 55°Brix y 30°C. Por otro lado Lombard *et al.*, (2008) encontró en este mismo tejido sometido a 45°Brix, ΔM_w del 15% y 27% durante 40 y 120 minutos, respectivamente. Estos resultados al ser comparados con los obtenidos en la presente investigación (a 40 °Brix) son mayores debido a que el proceso fue desarrollado a 40°C, lo cual aumentó la cinética de deshidratación.

Al aplicar M a nivel individual, se observó un incremento de pérdidas de humedad al aumentar los niveles de potencia, presentándose valores de 30, 49 y 62 % a 8, 20 y 40 kW/kg respectivamente. Algunos autores aunque han trabajado a niveles de potencia más bajos, han obtenido una tendencia similar. Tal es el caso de Mitra & Meda (2009) quienes aplicaron microondas para secar bayas obteniendo que la potencia de microondas y el tiempo de secado afectan significativamente el contenido de humedad.

Ellos encontraron que al pasar de 0.5 a 0.7 kW/kg el contenido de humedad decrece de 52.44 a 22.01 %.

La Figura 5.2 presenta las pérdidas de humedad y ganancia de sólidos del proceso combinado MOD durante tres tiempos de proceso 30, 90 y 150 minutos. Se observa ΔM_w en un rango del 30 al 58% y ΔM_s con niveles de 2 a 14%. En general se demuestra el efecto de la potencia en M y la concentración de la solución en OD, presentándose mayores niveles de ΔM_w al aplicar 60°Brix y 40 kW/kg.

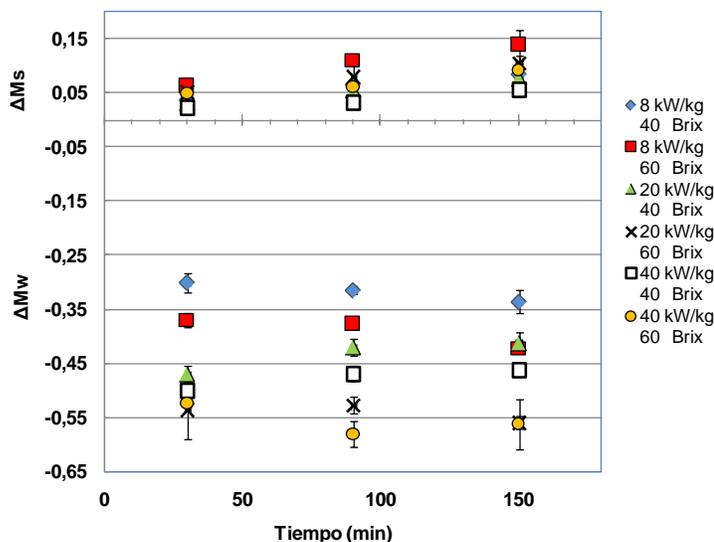


Figura 5.2 Pérdidas de humedad y Ganancia de Sólidos en muestras de piña sometidas a MOD (ver resultados en Anexo 6- resumen estadístico. Página 162)

La Figura 5.2 también se presenta mayor ΔM_s en muestras sometidas a 60°Brix en comparación con tratamientos a 40°Brix, con mayores valores al aplicar 8 kW/kg. Posiblemente debido a que el aumento de la temperatura a 20 y 40 kW/kg contribuyen a la ruptura de la célula provocando daño estructural irreversible en el tejido (Contreras *et al.*, 2008), disminuyendo así la transferencia de masa durante OD. En investigaciones anteriores (Pardo & Leiva, 2010) se obtuvo resultados similares (al aplicar 8 kW/kg y 60 °Brix) también en muestras de piña. Valores ΔM_w de 33.5% y ΔM_s de 14.6% en procesos MOD (60°Brix, 20°C y 75 minutos) fueron encontrados.

Evaluación de la Calidad

- *Textura*

En la Figura 5.3 se presenta la evaluación de textura para cada uno de los procesos aplicados en trozos de piña FD, ODFD, MFD, MDFD. Como se observa en esta Figura, someter las muestras a pretratamientos como OD y M aumenta la firmeza del producto con respecto a los procesos FD. Las muestras sometidas a OD presentan mayores niveles sin presentarse diferencias significativas entre los tratamientos combinados ODFD Y MDFD obteniéndose valores de 27.4 y 29.3 N respectivamente, lo cual indica que el efecto en la firmeza del tejido se debe más al aumento de sólidos en la estructura que a los efectos generados por M. También se observa que los tratamientos MFD son los que presentan menos cambios (4 N) con respecto a FD. Esto era de esperarse puesto que la adición de sólidos en la estructura fortalece las células en las frutas, tal como lo obtuvo Agnieszka & Andrzej (2010) en tejido de fresa sometido a ODFD, en comparación con el proceso FD. De acuerdo con Ciurzynska & Lenart, (2008) esta tenencia puede ser debida al engrosamientos de las paredes celulares las cuales se cristalizan durante el secado provocando rompimiento y daño especialmente de la capa superficial del tejido.

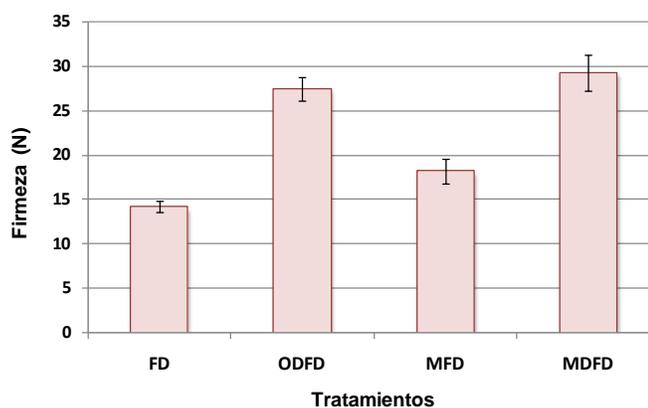


Figura 5.3. Evaluación de firmeza en piña sometida a combinación de tecnologías - preliminares

- **Color**

En la Figura 5.4 se presentan los cambios de color en el tejido deshidratado con respecto a la fruta fresca. Se observan mayores valores al aplicar microondas (hasta de 26,5), sin presentarse diferencias entre tratamientos combinados MFD y MODFD.

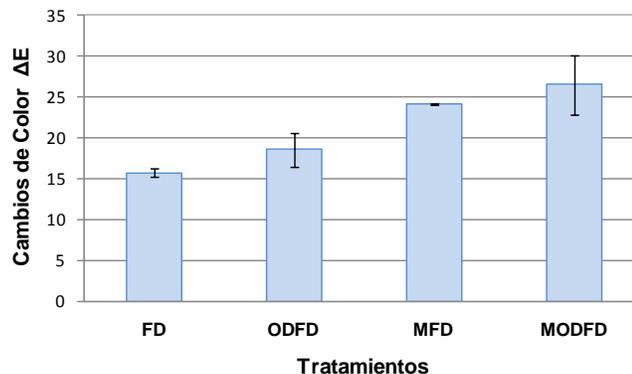


Figura 5.4. Cambios de color ΔE en piña sometida a combinación de tecnologías - preliminares

Jiang *et al.*, (2010) obtuvieron también cambios de color en banano al aplicar diferente niveles de potencia (1.5, 1.7, 2.0, 2.2 W/g) en MFD, obteniendo mejor nivel de color con mayor ΔE (aproximadamente 16) a 2.2 W/g. Estos niveles son menores a los presentados en la figura 5.4 debido a la baja potencia aplicada. Otros autores como Huang *et al.*, 2011 no presentaron diferencias significativas en los cambios de color para muestras de manzana, obteniendo 12.7 y 13.8 en MFD y FD respectivamente.

- **Propiedades Organolépticas**

En Figura 5.5 se presenta los niveles de aceptación por parte del consumidor potencial en muestras de piña deshidratada. Los parámetros evaluados en esta prueba fueron textura, sabor y color.

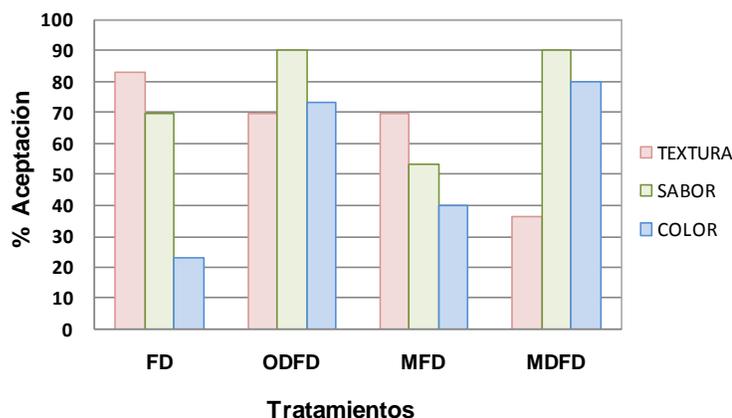


Figura 5.5. Evaluación sensorial muestras sometidas a combinación de tecnologías - preliminares

Se observa en general mayor aceptación del sabor y el color en muestras sometidas a pretratamiento osmótico. Contrario a la percepción en cuanto a textura, especialmente en muestras MDFD (36.7 % de aceptación). De acuerdo con Tortoe (2010) y Konopacka *et al.*, (2009) los procesos sometidos a altas concentraciones de solución osmótica conllevan a desarrollar en el producto sabores más dulces, en comparación con tecnologías de secado convencionales.

De acuerdo con Li *et al.* (2010b) durante el tratamiento M se produce una rápida evaporación del tejido haciendo el tejido más poroso, esto hace que aumente el contenido de solución en la estructura durante OD (Azarpazhooh & Ramaswamy, 2010) y por ende mayor dureza lo cual no es muy apetecido por consumidores potenciales. Autores como (Ramallo & Mascheroni, 2011) también afirman que los cambios en el color son debidos a la concentración de pigmentos durante la deshidratación.

CONCLUSIONES

La aplicación de microondas previo a procesos osmóticos permite pérdidas de humedad hasta del 58%, por efectos de altos niveles en la concentración de la solución y la potencia aplicada. Por el contrario bajos niveles de potencia permiten mayor ganancia de sólidos.

Mayores niveles de firmeza se obtienen al aplicar procesos osmóticos generando menor aceptación por parte del consumidor.

Altos cambios en el color (hasta de 26.5) se presentan en procesos sometidos a microondas.

Mayor aceptación a nivel sensorial se obtiene en procesos con deshidratación osmótica especialmente en términos de sabor y color.

BIBLIOGRAFÍA

- Agnieszka C. and Andrzej L (2010). Structural Impact of Osmotically Pretreated Freeze-Dried Strawberries on Their Mechanical Properties. *International Journal of Food Properties* 13:1134 – 1149.
- Andrés A, Fito P, Heredia A & Rosa E. (2007). Combined drying technologies for development of high-quality shelf-stable mango products. *Drying Technology*, 25: 1857-1866.
- A.O.A.C (2000). Official methods of analysis of the association of official analytical chemists 17th Edition.
- Azarpazhooh E. and Ramaswamy H. S (2010). Microwave-Osmotic dehydration of apples under continuous flow medium spray conditions: comparison with other methods. *Drying Technology*, 28: 49-56.
- Ciurzynska A. and Lenart A. (2008). Influence of osmotic dehydration on changes in structure of freeze-dried strawberries. *Acta Agrophysica* 12, 613–624 (in Polish).
- Contreras C., Martín-Esparza M. E., Chiralt A. and Martínez- Navarrete N. (2008). Influence of microwave application on convective drying: Effects on drying kinetics and optical and mechanical properties of apple and strawberry. *Journal of Food Engineering*, 88: 55-64.
- Erdogdu F. (2008). *Optimization in food Engineering*. Ed. CRC Press. USA
- Fahloul D., Lahbari M., Benmoussa H. and Mezdour S (2009). Effect of osmotic dehydration on the freeze drying kinetics of apricots. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7: 117-121.
- Fairchild, M. *Color Appearance Models*. John Wiley & Sons, 2005. England.
- FAO. (2005). «Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.» *Situación actual y perspectivas a plazo medio para las frutas tropicales*.

http://www.fao.org/es/esc/common/ecg/218/es/Sit_web_s.pdf (último acceso: 10 de Septiembre de 2011).

- Huang L, Zhang M, Mujumdar A., Rui L (2011). Comparison of four drying methods for re-structured mixed potato with apple chips. *Journal of Food Engineering* 103: 279–284
- Huang L., Zhang M., Mujumdar A. and Sun D. (2009b). Studies on Decreasing Energy Consumption for a Freeze-Drying Process of Apple Slices. *Drying Technology*, 27: 938–946.
- Ispir A & Togrul I. (2009). Osmotic dehydration of apricot: Kinetics and the effect of process parameters. *Chemical Engineering Research and Design*, 87: 166–180.
- Jiang Hao., Zhang Min. and Mujumdar Arun S (2010). Microwave Freeze-Drying Characteristics of Banana Crisps. *Drying Technology*. 28: 1377–1384.
- Konopacka D; Jesionkowsk A; Klewicki R & Bonazzi C. (2009). The effect of different osmotic agents on the sensory perception of osmo-treated dried fruit *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* ISAFRUIT Special Issue 80–84
- Li Z., Raghavan G.S.V. and Orsat V (2010b). Temperature and power control in microwave drying. *Journal of Food Engineering* 97: 478-483.
- Lombard G., Oliveira J., Fito P y Andres A. (2008). Osmotic dehydration of pineapple as a pre-treatment for further drying. *Journal of Food Engineering*, 85: 277-284
- Marques L., Silveira A., y Freire J. (2006). Freeze drying characteristics of tropical fruits. *Drying Technology*, 24: 457-463.
- Mitra P. and Meda V (2009). Optimization of Microwave-Vacuum Drying Parameters of Saskatoon Berries Using Response Surface Methodology. *Drying Technology: An International Journal*, 27: 1089 – 1096.
- Orsat V, Yang W, Changrue V & Raghavan GSV (2007). Microwave-assisted drying of biomaterials. *Food and Bioproducts Processing*, 85: 255-263.
- Pardo M & Leiva A (2009) Combination of technologies for the dehydration of pineapple. *Ingeniería y Competitividad*, 11: 57 -65.
- Pardo, M. & Leiva A. (2010). Effect of different pre-treatments on energy consumption during freeze drying of pineapple pieces. *Revista de Ciencia y tecnología de América –Interciencia* 35: 934-938.
- Pereira L M., Ferrari C.C, Mastrantonio S.D.S, Rodrigues A.C.C. and Hubinger M.D. (2006). Kinetic aspects, texture and color evaluation of some tropical fruits during osmotic dehydration. *Drying Technology* 24: 475-484.
- Pereira N, Marsaioli A. y Ahrné L. (2007). Effect of microwave power, air velocity and temperature on the final drying of osmotically dehydrated bananas. *Journal of Food Engineering*, 81: 79-87.
- Ramallo L.A., Mascheroni R.H (2011). Quality evaluation of pineapple fruit during drying process. *Food and Bioproducts Processing*, 2011: doi:10.1016/j.fbp.2011.06.001.
- Rastogi N.K, Raghavarao K.S.M.S. (2004). Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration. *Lebensm.-Wiss. U.-Technology*, 37: 43–4
- Rasband, W. S. (1997 - 2011). ImageJ 1.44p, National Institutes of Health. Maryland, USA: [http:// imagej.nih.gov/ij/](http://imagej.nih.gov/ij/).
- Reyes A, Vega R, Bustos R y Araneda C (2008). Effect of processing conditions on drying kinetics and particle microstructure of carrot. *Drying Technology*, 26: 1272-1285.
- Ruiz I.I., Ruiz H., Herman E., Zárate G. (2011). Modelling of kinetics, equilibrium and distribution data of osmotically dehydrated carambola (Averrhoa carambola L.) in sugar solutions. *Journal of Food Engineering* , 104: 218–226.
- Saxena, S.; B. Mishra; R. Chander y A. Sharma. (2009). Shelf Stable Intermediate Moisture Pineapple (Ananas comosus) Slices Using Hurdle Technology. *Food Science and Technology*. 42: 1681–1687.
- Schubert HMR (2006). Novel and Traditional Microwave Applications in the Food Industry. *Advances in Microwave and Radio Frequency Processing*, ed. Willer T-Porada M.. Springer. Berlin, Germany 259-270.

- Shi X, Fito P & Chiralt A.(1995).Influence of vacuum treatment on mass transfer during osmotic dehydration of fruits.Food Research International, 28: 5, 445-454
- Tortoe, C. (2010). A review of osmodehydration for food industry. African Journal of Food Science, 4: 303 - 324.
- Wang Z., Fang S. and Hu X. (2009). Effective Diffusivities and Energy Consumption of Whole Fruit Chinese Jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) in Microwave Drying. Drying Technology: An International Journal, 27: 1097 – 1104.
- Wu G., Zhang M., Mujumdar A.S and Wang R (2010). Effect of Calcium Ion and Microwave Power on Structural and Quality Changes in Drying of Apple Slices. Drying Technology 28: 517-522.
- Xu Y, Zhang M, Mujumdar AS, Duan X & Jin-Cai S (2006) A two-stage vacuum freeze and convective air drying method for strawberries. Drying Technology, 24: 1019-1023.
- Zhang M., Jiang H. y Rui-Xin L. (2010). Recent Developments in Microwave-Assisted Drying of Vegetables, Fruits and Aquatic Products- Drying kinetics and Quality Considerations. Drying Technology, 28: 1307-1316.
- Zhang, M.; Tang. J.; Mujumdar A.S. y WangS.. (2006). Trends in microwave related drying of fruits and vegetables. Trends in Food Science and Technology, 17: 524-534.

5.4 Discusión de resultados preliminares

La liofilización como se ha mencionado anteriormente es un proceso de deshidratación que aunque permite alargar la vida útil y preservar la calidad de los productos es una tecnología costosa debido a los consumos energéticos durante el procesamiento (Fahloul *et al.*, 2009; Sagar & Suresh, 2010)

Por tanto la combinación de tecnologías se presenta como una posibilidad de optimizar los tiempos de proceso, ganancia de sólidos, pérdidas de agua y consumo de energía, facilitando la conservación de alimentos deshidratados (Huang *et al.*, 2009b; Bórquez *et al.*, 2010, Xu *et al.*, 2006; Reyes *et al.*, 2008).

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizaron algunas investigaciones preliminares con el fin de analizar el efecto en el consumo de energía, de la combinación de tecnologías previas a procesos de liofilización. Para esto se desarrollaron experimentos aplicando en trozos de piña, microondas-liofilización (MFD), deshidratación osmótica-liofilización (ODFD), microondas-deshidratación osmótica-liofilización (MDFD) y se compararon con el proceso individual de liofilización (FD).

De acuerdo con los resultados del artículo publicado a partir de los experimentos preliminares “*Effects of different pre-treatments on energy consumption during freeze drying of pineapple pieces*” (Pardo & Leiva, 2010) (Anexo 4), se observa que la combinación de tecnologías MDFD permiten reducir el consumo de energía hasta en un 38.7 % (medido en kJ/kg de producto) con respecto a procesos individuales FD. Lo cual indica que este tipo de tecnologías combinadas se convierten en una opción para el procesamiento de frutas deshidratadas, las cuales pueden ser replicadas a otro tipo de frutas.

A partir de los anteriores resultados se evaluó la combinación de microondas y deshidratación osmótica, para diferentes niveles de potencia, concentración y tiempos de proceso; esto con el fin de analizar cual tecnología o combinación de tecnologías serían las mas convenientes para aplicar previamente al proceso de liofilización.

En términos de cinética de deshidratación y teniendo en cuenta los resultados encontrados en el artículo “*Efectos de la aplicación de procesos osmóticos y secado por microondas sobre la cinética de deshidratación y la calidad en tejido de piña liofilizado*” (numeral 5.3), se observó que la combinación de calentamiento por microondas y deshidratación osmótica permiten pérdidas hasta de un 58 % de humedad en el tejido de piña. Lo cual indica que este tipo de tratamientos podrían aplicarse previamente a procesos de liofilización con el fin de reducir los consumos de energía. Esto debido a que solamente se tendrá que sublimar aproximadamente un 42 %.

A partir del artículo anterior se seleccionaron 9 tratamientos para ser combinados con procesos de liofilización. Esta selección se hizo teniendo en cuenta tanto las mayores y menores pérdidas de humedad en el tejido, como las mayores y menores ganancias de sólidos. La Tabla 5.1 presenta los tratamientos seleccionados a partir de los resultados obtenidos los cuales se analizarán comparándolos con los procesos de fruta fresca liofilizada.

Tabla 5.1. Pretratamientos de deshidratación seleccionados

Tratamiento	Concentración (°Brix)	Tiempo Osmótico (minutos)	Potencia (kW/Kg)
Fruta fresca	x	x	x
OD1	60	90	x
OD2	40	30	x
M1	x	x	40
M2	x	x	8
MD1	60	150	20
MD2	60	90	40
MD3	40	30	8
MD4	60	90	8
MD5	40	30	40

Tal como se verá en los capítulos 4 y 5 estos tratamientos seleccionados fueron aplicados previamente a procesos de liofilización en tejido de piña para analizar color, textura, contenido de vitamina C, propiedades sensoriales y consumos de energía. Esto con el fin de poder determinar la combinación de tratamientos que permita obtener piña deshidratada apetecible para los consumidores mediante procesos rentables para productores industriales.

BIBLIOGRAFÍA

- Bórquez R.M., Canales E.R. and Redon J.P (2010). Osmotic dehydration of raspberries with vacuum pretreatment followed by microwave-vacuum drying. *Journal of Food Engineering*, 99: 121-127.
- Fahloul D., Lahbari M., Benmoussa H. and Mezdour S (2009). Effect of osmotic dehydration on the freeze drying kinetics of apricots. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7: 117-121.
- Huang L., Zhang M., Mujumdar A. and Sun D. (2009b). Studies on Decreasing Energy Consumption for a Freeze-Drying Process of Apple Slices. *Drying Technology*, 27: 938-946.
- Pardo, M. & Leiva A. (2010). Effect of different pre-treatments on energy consumption during freeze drying of pineapple pieces. *Revista de Ciencia y tecnología de América –Interciencia* 35: 934-938.
- Sagar V. R. and Suresh Kumar P (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal Food Science Technology* 47: 15-26.
- Xu Y, Zhang M, Mujumdar AS, Duan X & Jin-Cai S (2006) A two-stage vacuum freeze and convective air drying method for strawberries. *Drying Technology*, 24: 1019-1023.

6 CAPÍTULO 4. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y ORGANOLÉPTICAS EN PIÑA DESHIDRATADA

6.1 ARTÍCULO No. 4

EFECTO DE LA APLICACIÓN DEL CALENTAMIENTO POR MICROONDAS Y DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA COMO TECNOLOGÍAS PREVIAS AL PROCESO DE LIOFILIZACIÓN, SOBRE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y ORGANOLÉPTICAS DE PIÑA.

RESUMEN

Se sometieron trozos de piña a diferentes tratamientos previos a la liofilización utilizando calentamiento por microondas y deshidratación osmótica. Las muestras de piña fueron sometidas a tratamientos por microondas (8, 20, 40 kW/kg durante 5, 2 y 1 minuto, respectivamente) y deshidratación osmótica (40 y 60 °Brix durante 30, 90 y 150 minutos) previos a liofilización (40 °C). Se evaluó el efecto de los pretratamientos sobre la calidad de las muestras, en términos de color, textura, contenido de vitamina C y propiedades sensoriales. Se observaron mayores efectos en los cambios de color y textura en procesos combinados de microondas y deshidratación osmótica. Valores de cambio de color (ΔE) hasta de 28.4 y de firmeza hasta de 43.8 N fueron obtenidos. Igualmente se obtuvo mayor retención de vitamina C (de 2-2,5 veces) en los pretratamientos con microondas a baja potencia, en comparación con los procesos combinados microondas-deshidratación osmótica, especialmente los desarrollados a 60 °Brix. A nivel sensorial se presentó mayor aceptabilidad de las muestras (en sabor y color) del 90% cuando se aplicó deshidratación osmótica con soluciones a 60 °Brix. En términos de textura se observó una mayor aceptación al aplicar tratamientos leves que no afectaron la estructura de la muestra: microondas a 8 kW/kg con deshidratación osmótica a 40 °Brix (73% de aceptación) y liofilización (67%). Finalmente a nivel global en términos sensoriales las muestras preferidas fueron las sometidas a procesos de liofilización, como también las sometidas a tratamientos osmóticos (60 °Brix, 90 minutos).

Palabras Clave: Deshidratación Osmótica, Microondas, Liofilización, frutas, calidad

INTRODUCCIÓN

La piña es una fruta tropical con atractivas características sensoriales (especialmente en sabor, acidez, propiedades mecánicas, color) y nutricionales (ácido ascórbico, minerales, fibra antioxidantes, etc). Sin embargo, los procesos de deshidratación pueden provocar numerosos cambios físicos y químicos en el tejido. Por lo tanto, durante el secado de la fruta es posible que se presenten pérdidas de la capacidad de rehidratación, pérdidas de vitaminas, cambios de color, contracción en el tejido, etc, (Ramallo & Mascheroni, 2011).

En los últimos años se han analizado tecnologías combinadas con deshidratación osmótica y calentamiento por microondas identificando efectos significativos en la calidad de los productos. Como pretratamiento la deshidratación osmótica se ha empleado para mejorar las propiedades fisicoquímicas, organolépticas y nutricionales (Moreno *et al.*, 2010). Este proceso permite potencializar el sabor y mantener la textura, así como retener los pigmentos naturales y los compuestos volátiles (Tortoe, 2010; Proton *et al.*, 2001; Antonio *et al.*, 2004; Sanjinez *et al.*, 2005).

Mediante el secado asistido por microondas se puede obtener buena calidad de las frutas (Maskan *et al.*, 2000) en términos de color y sabor (Rodríguez *et al.*, 2004). Sin embargo, al aumentar la temperatura interna del tejido (Pereira *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2010b; Lu *et al.*, 1999) se puede llegar a degradar la estructura del producto, mas aun si la potencia no es controlada, produciendo sabores desagradables (Cui *et al.*, 2008).

Otras tecnologías como liofilización permiten preservar pigmentos, sabores, aromas, nutrientes y la estructura en los alimentos (Wu *et al.*, 2010; Fahloul *et al.*, 2009; Sagar & Suresh, 2010; Kopjar *et al.*, 2008). De acuerdo con (Ratti, 2001) este proceso es considerado como uno de los mejores métodos para mantener los atributos de calidad

debido al proceso de sublimación (es decir ausencia de agua líquida) y a las temperaturas bajas que se manejan, limitando las reacciones de degradación.

Se han combinado calentamiento por microondas con tecnologías como secado con aire caliente, con el fin de mejorar la calidad en los productos (Berteli & Marsaioli, 2005), con el objetivo de reducir el daño estructural y pérdidas de nutrientes causadas por la rápida evaporación que se presenta durante el proceso (Zhang *et al.*, 2006).

El vacío también es utilizado con microondas en alimentos que son térmicamente sensibles como las frutas y hortalizas. Algunos estudios describen que además ésta combinación ha permitido preservar el contenido de vitaminas debido a los bajos niveles de oxígeno y en general obtener productos de alta calidad, debido a la disminución de la transferencia de energía. Microondas al vacío y liofilización también han sido combinados por permitir mayor retención de vitamina C (Sagar & Suresh, 2010; Huang *et al.*, 2009b).

Por lo anterior, el objetivo del presente estudio es analizar los efectos de la aplicación de tecnologías como calentamiento por microondas y deshidratación osmótica, previos a procesos de liofilización, sobre el color, textura, contenido vitamínico y propiedades sensoriales, de trozos de piña liofilizado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Piña (*Ananas comosus*) variedad Golden obtenida en el mercado local procedente de la región del Valle del Cauca-Colombia, fueron seleccionadas con grado de maduración 3 (basada en la carta NTC 4102, 1997) teniendo en cuenta el color de la corteza, sin presencia de daños por insectos, golpes o fisuras.

Las piñas fueron manualmente peladas, tajadas en rodajas y posteriormente cortadas en trapecios de 10 x 30 mm en lados paralelos y 5 mm de espesor, con un peso promedio por muestra de $6 \pm 0.5\text{g}$.

Tratamientos

Las muestras de piña fueron sometidas a procesos combinados de deshidratación, aplicando microondas (M) y deshidratación osmótica (OD) previas a procesos de liofilización (FD).

La tabla 6.1 Resume las condiciones de los pretratamientos seleccionados de M y OD a partir de experimentos preliminares (Capitulo 3, numeral 5.4).

Tabla 6.1 Condiciones de pretratamientos M y OD para análisis de propiedades fisicoquímicas y organolépticas

Tratamiento	Concentración (°Brix)	Tiempo Osmótico (minutos)	Potencia (kW/kg)
Fruta fresca	x	x	x
OD1	60	90	x
OD2	40	30	x
M1	x	x	40
M2	x	x	8
MD1	60	150	20
MD2	60	90	40
MD3	40	30	8
MD4	60	90	8
MD5	40	30	40

Finalmente fueron liofilizadas las muestras de piña después de ser sometidas a los pretratamientos seleccionados. Se utilizó un equipo Labconco 79480, congelando a -40°C , y sublimando con temperatura de bandejas a 40°C , durante 48 h (tiempo en el cual las muestras llegaron a humedad final promedio del 3% BH) y 14.7 Pa. Igualmente se liofilizó fruta fresca como blanco.

Métodos analíticos

Las muestras de piña liofilizadas sometidas a los diferentes pretratamientos fueron evaluadas en términos de color, vitamina, textura y propiedades sensoriales.

Análisis de color

Las muestras fueron evaluadas de acuerdo con los parámetros de luminosidad L^* (negro/blanco), a^* (verde/rojo) y b^* (azul/amarillo) analizando el cambio de color ΔE con respecto a la fruta fresca, teniendo en cuenta la ecuación Ec.1. Estos parámetros fueron obtenidos a partir del análisis digital de imágenes usando el software Image J 1.44 (Rasband, 1997 - 2011), para obtener los parámetros RGB y posteriormente utilizando el programa Easy RGB (libre en la web) teniendo en cuenta una fuente de luz D65 y ángulo de observación de 10° (Fairchild 2005).

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

$$\Delta L^*: L^*_{\text{muestra}} - L^*_{\text{referencia}}$$

$$\Delta a^*: a^*_{\text{muestra}} - a^*_{\text{referencia}}$$

$$\Delta b^*: b^*_{\text{muestra}} - b^*_{\text{referencia}}$$

En general se evaluaron 3 muestras por tratamiento y de cada una se analizó 3 zonas representativas del tejido.

Análisis de textura

La firmeza fue evaluada como la fuerza máxima de penetración empleando un texturómetro TATX2® (Stable Micro Systems LTD. Surrey, Inglaterra) con una sonda cilíndrica de 5 mm de diámetro y base plana (P5). Los parámetros de operación fueron: velocidad pre-ensayo 5mm/s, velocidad de ensayo 3mm/s, velocidad post-ensayo 10mm/s, fuerza de 0.049 N y distancia de penetración 2 mm. Se realizó la medición a cinco muestras de piña liofilizada por replica de tratamiento.

Análisis de vitamina C

El contenido de vitamina C se cuantificó mediante cromatografía líquida de alta eficiencia HPLC (Norma UNE-EN 14130: 2003), por duplicado.

Análisis sensorial

Los aspectos sensoriales fueron evaluados por un panel de potenciales consumidores de la fruta deshidratada, con el fin de determinar la aceptación general del producto, en términos de textura, sabor y color. Para este fin participaron 30 consumidores, quienes hicieron la evaluación teniendo en cuenta una escala hedónica de 4 puntos. Estos puntos fueron definidos como: 4-Me gusta mucho, 3- me gusta, 2 no me gusta y 1- me disgusta mucho. Al finalizar la prueba, cada consumidor seleccionó la muestra que más les gustó.

Análisis estadístico

Los resultados obtenidos se analizaron mediante un análisis de la varianza – ANOVA con un nivel de confianza del 95%, y una prueba de diferencia de medias Tukey, empleando el software Statgraphics Centurion XV versión 15.2.14. Esta prueba se realizó teniendo en cuenta todos los tratamientos combinados, incluyendo el blanco (FD).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se compara los tratamientos OD y M en forma individual y combinada, previos a procesos FD analizando los cambios de color, firmeza, propiedades sensoriales y contenido de vitamina C, para las muestras de piña deshidratada.

- **Color**

El color en la piña es un factor importante en la aceptabilidad del producto. Un amarillo claro se asocia con la maduración y el desarrollo del sabor característico de la fruta (Bartolomé *et al.*, 1995). La figura 6.1 presenta los cambios de color ΔE en muestras de piña liofilizada sometidas a los pretratamientos de M, OD y la combinación entre éstas (MD). Como se observa en ésta figura los tratamientos están ordenados de mayor a menor cambio de color.

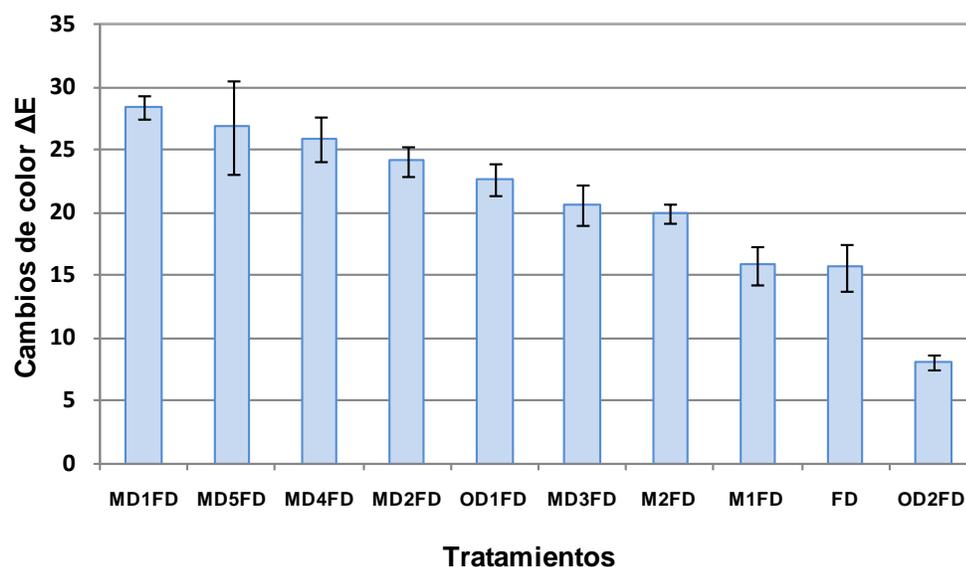


Figura 6.1. Cambios de color ΔE en muestras de piña liofilizada sometida a pretratamientos combinados de M y OD.

En la Figura 6.1 se observa valores de ΔE entre 8.1 y 28.4, obteniéndose menor impacto con pretratamientos OD2 (ΔE de 8.1), posiblemente debido a la aplicación de baja concentración (40 °Brix) y tiempo de inmersión (30 minutos) durante el proceso. Similares resultados fueron reportados por Wais *et al.*, (2004), quienes obtuvieron en manzana, bajos cambios de color (6.1) al aplicar OD (a 30°C y 47 °Brix durante 1h), encontrando también que al aumentar los tiempos de proceso a 24 h, aumentaba los niveles de ΔE (11). Igualmente Lombard *et al.*, (2008) obtuvieron en tejido de piña sometido a OD (con vacío, 50 °C, 180 minutos) mayor ΔE al aumentar la concentración de la solución con sacarosa a 65 °Brix (17.5), comparado con un proceso a 55°Brix (durante 60 minutos) que presentó niveles de ΔE mas bajos 12.5. Esta Misma tendencia se observó en OD1 presentando ΔE de 22.7, debido al aumento en la concentración de la solución osmótica. De acuerdo con Pereira *et al.*, (2006) los procesos OD obstaculizan las pérdidas de pigmentos, disminuyendo las pérdidas en el color.

Los pretratamientos con M (como M1FD Y M2FD) no presentaron cambios significativos con respecto a FD, al igual que el pretratamiento MD3 en el cual se aplicó baja potencia en M (8 kW/kg) y baja concentración en la solución (40 °Brix, 30 minutos). Para los tratamientos M1FD y M2FD se obtuvo niveles de 15.9 y 19.9 en ΔE , respectivamente. Lo cual indica que los tratamientos con M no tienen un efecto significativo sobre los cambios de color. Los ΔE en los tratamientos MFD se deben a un aumento en la intensidad del color amarillo (b^*) con respecto a la fruta fresca. Autores como Huang *et al.*, (2009b) obtuvieron en muestras de manzana sometida a FD seguido de M (7 W/g) niveles similares ΔE de 15.5. Una tendencia similar también fue obtenida por Wu *et al.*, 2010, quienes presentaron en tejido de manzana sometido a MFD ΔE entre 6.4-9.7 sin presentarse diferencias significativas al aumentar los niveles de potencia entre 1.2 y 1.8 W/g. De acuerdo con estos autores los cortos tiempos de procesamiento permiten menores cambios de color.

En la Figura 6.1 se observa también que el mayor impacto en el color de las muestras de piña deshidratadas se presenta al someter las muestras a los pretratamientos combinados MD1, MD4 y MD5 (con ΔE de 28.4, 26.9 y 25.9, respectivamente), cuyos cambios de color son estadísticamente iguales entre sí. Esta tendencia puede ser debida a la aplicación de condiciones extremas, es decir concentración de 60 °Brix en OD (para tratamientos MD1 y MD4) y potencia de 40 kW/kg (en MD5). Al comparar MD1 (20W/g, 60 °Brix, 150 minutos) y MD4 (8W/g, 60 °Brix, 90 minutos) se confirma que M tiene poco efecto comparado con OD. Hasta el momento no se han encontrado investigaciones donde se evalué el color en muestras de fruta sometida a combinaciones MOD, algunos autores solo han investigado en tratamientos ODM. Tal es el caso Botha *et al.*, (2011) quienes aplicaron en piña ODM obteniendo que la potencia de microondas es una de las variables que más influyen en el proceso de deshidratación. Estos resultados son contrarios a los obtenidos en esta investigación. Como se ha mencionado anteriormente los cambios de color se presentaron debido al efecto de los tratamientos OD. Esta diferencia puede ser debida a que Botha *et al.*, (2011) aplica M (0.2-0.8 W/g) asistido con aire caliente durante 3 h, en cambio en esta investigación solamente se aplica un pulso de M (40,20 y 8 W/g) en tiempos muy cortos (1,2 y 5 minutos), sin que la muestra presente índices de pardeamiento por sobrecalentamiento, tal como sucedió en los experimentos de Botha *et al.*, (2011). En nuestro caso los cambios de color no se deben a los cambios de L* como han encontrado varios autores que han aplicado ODM en frutas como mango (Andrés *et al.*, 2007), banano (Pereira *et al.*, 2007) y manzana (Prothon *et al.*, 2001), quienes también han aplicado M asistido con aire caliente. Los cambios de color obtenidos en esta investigación han sido por un incremento en el parámetro b*, lo cual indica que las muestras se vuelven más amarilla, posiblemente debido a la concentración de los pigmentos durante el secado (Ramallo & Mascheroni, 2011).

Finalmente autores como Li *et al.*, (2010b) sugieren que se debe controlar la potencia en la etapa final de deshidratación con el fin de evitar aumento en la temperatura y deterioro en la calidad del producto final (en términos de color).

- **Textura**

De acuerdo con Contreras *et al.*, (2008) las propiedades mecánicas son importantes al caracterizar la primera mordida de un producto. La figura 6.2 presenta la evaluación de textura en términos de firmeza (N) para los diferentes tratamientos combinados, incluyendo FD.

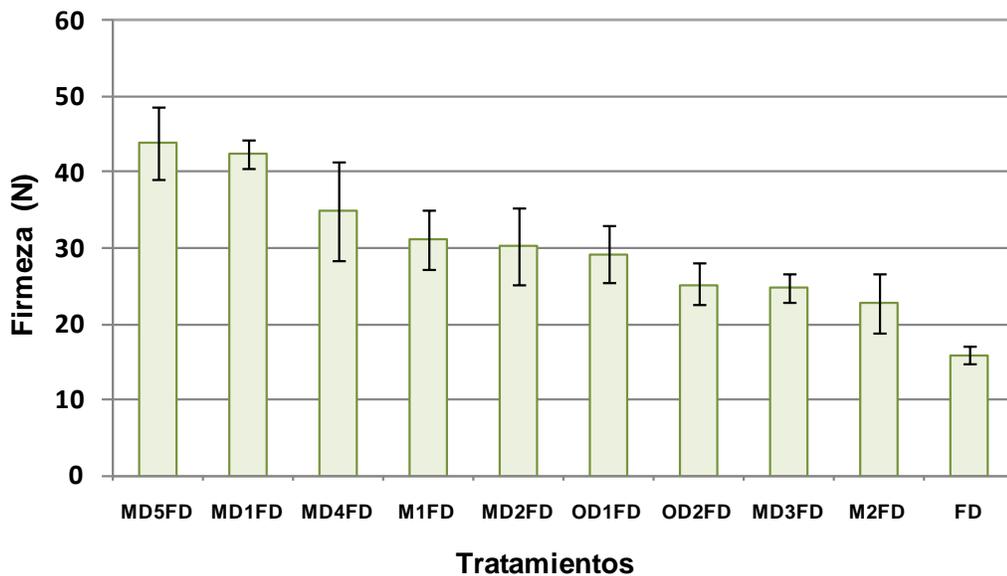


Figura 6.2. Evaluación de firmeza (N) en muestras de piña liofilizada sometida a pretratamientos combinados de M y OD.

En la figura 6.2 se observa un rango de firmeza entre 15,9 y 43,8 N, presentándose diferencias significativas de todos los tratamientos con respecto a FD, lo cual indica que la combinación de tecnologías afecta significativamente la textura del tejido. Esto concuerda con otros autores como (Agnieszka & Andrzej, 2010) quienes obtuvieron en fresa liofilizada menores niveles de fuerza en compresión (alrededor de 35 N), en comparación a los procesos combinados con OD (119 N). Ellos atribuyen el resultado al pretratamiento OD debido a que fortalece la estructura del tejido, aumentando el espesor de la pared celular.

En las muestras sometidas a M, se presenta una menor firmeza en tratamientos de 8 kW/kg (M1FD), comparado con los tratamientos de 40 kW/kg (M2FD), posiblemente debido a la formación de una corteza en la superficie del tejido, como resultado de la migración de sólidos solubles, a un colapso interno del tejido debido a la salida de agua, aire y algunos sólidos hidrosolubles (Cui *et al.*, 2008). Así mismo, (Wu *et al.*, 2010) deshidrataron manzana bajo diferentes niveles de potencia en procesos combinados M-FD, encontrando que al aumentar levemente la potencia (de 1.2 a 2 W/g) el contenido de pectina total (de 0.831 a 0.663 g de ácido galacturónico/100g fruta fresca) disminuye y se incrementan tanto la dureza como la pérdida de volumen.

Adicionalmente, en los resultados se observa mayor firmeza en tratamientos MD1 (60 °Brix, 150 minutos, 20 kW/kg) Y MD5 (40brix, 30 minutos, 40 kW/kg), sin presentarse diferencias significativas entre estos dos. MD1 (2,7 veces) y MD5 (2,8 veces) casi triplican la firmeza con respecto al blanco sin pretratamientos FD. Igualmente no se presentan diferencias significativas entre MD2-MD4, lo cual indica que el efecto del calentamiento por microondas es bajo comparado con el de la deshidratación osmótica, tal como se puede observar al comparar también los pretratamientos MD3 y MD4. Es así que la inclusión de sólidos tiene un alto efecto sobre la textura tal como se obtuvo. Una tendencia similar fue encontrada por (Contreras *et al.*, 2008) que al combinar OD al vacío seguido de M asistido con aire caliente en fresas aumentan la firmeza (33.9 N) del tejido en comparación con el proceso individual M (23,5 N). Los anteriores autores atribuyen éste comportamiento al aumento en el contenido de azúcar favoreciendo la generación de una matriz de células más compactas durante el secado.

- **Propiedades Organolépticas**

El color, el sabor y la textura son atributos importantes en la calidad de las frutas deshidratadas desde el punto de vista de la aceptación del consumidor (Han *et al.*, 2010). En la figura 6.3. Se presenta la evaluación realizada por consumidores potenciales en términos de aceptación del sabor, color y textura, de las muestras sometidas a las diferentes combinaciones de tecnologías. Los consumidores evaluaron teniendo en cuenta una escala hedónica de 1 a 4, (4- Me gusta mucho, 3- me gusta, 2 no me gusta y 1- me disgusta mucho). Los valores 3 y 4 se utilizaron como calificación de aceptación del producto deshidratado. Por tanto en la gráfica se presenta el porcentaje de consumidores potenciales que evaluaron el producto entre éstos dos valores.

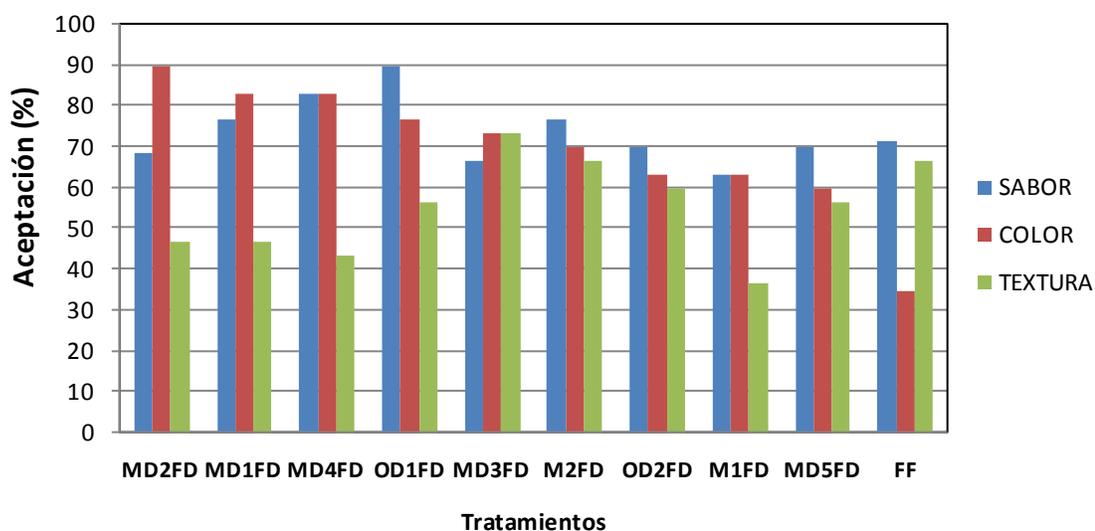


Figura 6.3. Evaluación sensorial en términos de color, sabor y textura en muestras de piña deshidratada.

En la figura 6.3, se observa que en cuanto a sabor hubo una mayor aceptación (de 77% a 90 %) en muestras OD1FD, MD4FD, M2FD y MD1FD, las cuales provienen de tratamientos M con baja potencia y OD con alta concentración de la solución osmótica. (Li *et al.*, 2010a) sometieron tejido de manzana a microondas obteniendo mejor apariencia y buen sabor a menor potencia (3W/g), adicionalmente encontraron que a potencias mayores de 4 W/g sin control de temperatura las muestras resultaban

inaceptables a nivel sensorial. (Han *et al.*, 2010) observaron también que al incrementar la potencia en M (mayor 13 W/g) se puede disminuir la calidad sensorial en términos de color, forma, sabor y flavour. (Changrue *et al.*, 2008) aplicaron microondas en tejido de fresa con y sin pretratamiento de deshidratación osmótica, obteniendo mayor aceptación con la combinación de procesos en términos de sabor 7,06 y apariencia 6,67 en una escala de 1-9. (Konopacka *et al.*, 2009) sometió cerezas y manzanas a OD y ODFD, analizando diferentes agentes osmóticos obteniendo que los pretratamientos con sacarosa aumentan la dulzura en las muestras, generando mayor aceptabilidad. Resultados similares observaron (Sanjinez *et al.*, 2010), quienes obtuvieron en kiwi sometido a OD (60 °Brix) muestras no solamente mas dulces, sino también menos ácidas al ingresar la sacarosa en el tejido. Es así que tanto los resultado obtenidos en este trabajo como los de los autores anteriormente referenciados, muestran una mayor aceptación en términos de sabor al aumentar el contenido de azúcar, el consumidor prefiere una fruta deshidratada dulce.

En cuanto a color se observa mayor aceptación (del 83 a 90%) al aplicar pretratamientos combinados MD2, MD1 Y MD4, así como OD1 (77%), es decir aquellos donde se aplicó inmersión a 60 °Brix. El tratamiento con menor aceptación fue FD con un 35% de aceptación. Aunque los pretratamientos combinados de M y OD no han sido muy estudiados, autores como (Barat *et al.*, 2002) encontraron mayor aceptación a nivel global (involucrando textura, sabor, dulzor, acidez, aroma color y traslucidez) en tejido de piña sometido a OD (a 55 y 65 °Brix). En otras frutas también se observó mayor aceptación al aplicar OD a altas concentraciones. Autores como (Sanjinez *et al.*, 2010), reportan mayor aceptación (especialmente en sabor, color y apariencia) en tejido de kiwi sometido a 60 °Brix y (Landaeta *et al.*, 2008) en tejido de durazno sometido a 68 % de sacarosa, especialmente en color y sabor. Aquí se repite la tendencia observada para el sabor, entre más azúcar se incorpore la fruta, mayor es la aceptación del color por parte del consumidor.

En términos de textura se observó una mayor aceptación (73%) en pretratamientos MD3 (a 8 kW/kg, 40 °Brix), seguido de FD (67%). Igualmente se presentó mayor aceptación

de los pretratamientos OD y M (a 8 kW/kg). Las combinaciones MD1, MD2 y MD4 las cuales se trabajaron a 60 °Brix, no tuvieron buena aceptación (de 43-47%), al igual que los pretratamientos con M a 40 kW/kg (37 %). Resultados similares obtuvieron algunos investigadores al aplicar bajos niveles de potencia. (Huang *et al.*, 2009b) obtuvieron mayor aceptación del consumidor en manzana liofilizada durante 8,28 h seguida microondas, con un puntaje de 8,9 para la evaluación de apariencia, textura y sabor. Igualmente estos autores aplicaron MFD obteniendo alta aceptabilidad (con un puntaje de 8) a 1W/g. (Jiang *et al.*, 2010) aplicaron microondas (2 W/g) y liofilización en banano obteniendo buena aceptación de las muestras deshidratadas en términos de color, apariencia, aroma y rehidratación, con una evaluación sensorial de 8,7 en una escala hedónica de 10 puntos. En la evaluación sensorial de textura se observa una tendencia contraria que en color y sabor. En general los pretratamientos tienden a endurecer las muestra como se discutió en párrafos anteriores y este cambio el consumidor lo percibe como no agradable. Es así que al aumentar sólidos o reducir el volumen de la muestra antes de liofilizarla, tiende a generar un producto menos apetecible en cuanto a textura.

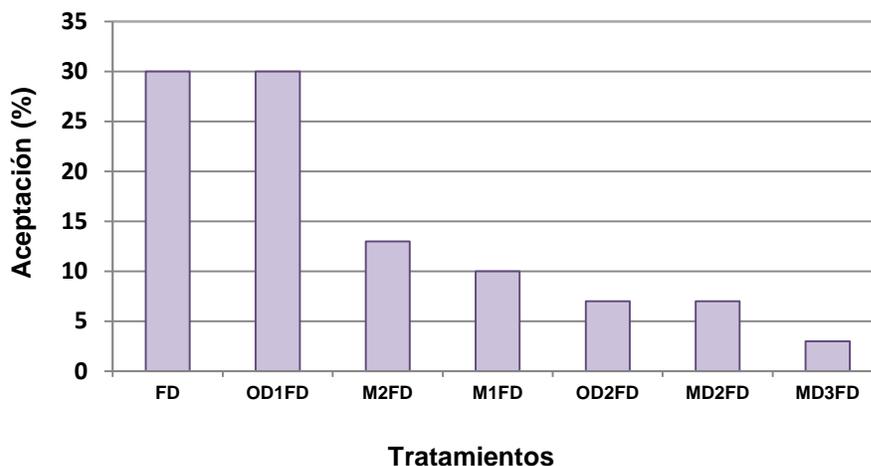


Figura 6.4. Muestras con mayor aceptación en términos sensoriales.

Por último, de acuerdo con la evaluación global que hicieron los consumidores, se observa que estos prefirieron las muestras procedentes de FD y OD1. En segundo lugar

las muestras sometidas a M especialmente a baja potencia (8 kW/kg). Las muestras menos aceptadas fueron las sometidas a MDFD (Figura 6.4). Esta tendencia refleja el efecto positivo de la concentración en la solución de los pretratamientos OD y el efecto negativo del aumento en la potencia de pretratamientos M. Lo anterior demuestra que el consumidor prefiere muestras que no presenten colapso estructural, que no sean duras y que sean dulces, tal como se ha obtenido en los resultados sensoriales de sabor y textura. De acuerdo con (Li *et al.*, 2010b) altos niveles de potencia en procesos de microondas deterioran el producto a nivel sensorial por sobrecalentamiento o cuando se somete el producto a largos tiempos de proceso con bajos niveles de potencia. En relación a los resultados obtenidos, (Xu *et al.*, 2006) encontraron en fresas sometidas a liofilización muy buena aceptabilidad en la evaluación sensorial obteniendo un puntaje de 9 en una escala hedónica de 1-9, lo cual indica de acuerdo a los parámetros de evaluación que las muestras mantienen la estructura, el color y el aroma presentando una textura crujiente. Estos mismos investigadores combinaron liofilización y secado por aire caliente obteniendo bajos niveles de aceptación en términos de color, brillo, estructura, sensación en la boca y flavour, con niveles de 4,1 a 5,5; éste valor fue mayor en comparación al obtenido con muestras deshidratadas con secado por aire caliente sin liofilización (2,2).

- **Vitamina**

La figura 6.5. Presenta el promedio del contenido de vitamina C de las muestras sometidas a procesos de calentamiento por microondas, deshidratación osmótica y liofilización, igualmente la combinación entre éstas tecnologías. Debido a los costos de los análisis y la variabilidad de los datos, se presenta en los puntos, el contenido mínimo y máximo de vitamina, así como en los números el porcentaje de retención con respecto a la fruta fresca (318.7 mg de Vitamina C/100 g de fruta seca) (Muñoz., 2010).

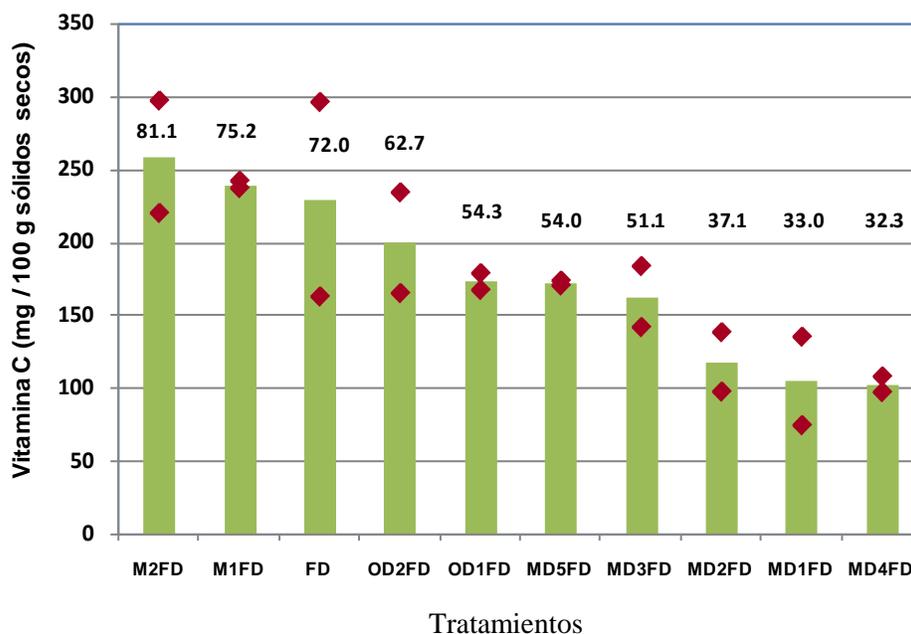


Figura 6.5. Contenido de Vitamina C en muestras sometidas a la combinación de tecnologías

Al dividir la Figura 6.5 en 4 partes teniendo en cuenta el porcentaje de retención de vitamina obtenemos: nivel alto de contenido de vitamina (75-100%), nivel medio-alto (50-75 %), nivel medio-bajo (25-50%) y nivel bajo (0-25%).

De acuerdo con lo anterior y como se observa en la Figura, al someter trozos de piña a procesos combinados MFD se presenta mayor retención de vitamina (de 75.2 -81.1 %), presentando un nivel alto, en comparación con los procesos ODFD Y MDFD. La combinación MFD presenta alrededor de 2-2,5 veces mayor retención de vitamina C en comparación con los procesos MD1FD, MD2FD y MD4FD. Se observa también que la aplicación con niveles bajos de potencia (8 kW/kg) permite menores pérdidas de vitamina C. Niveles mas altos de esta vitamina fueron encontrados por (Cui *et al.*, 2008) en tejido de manzana al aplicar 2 W/g en MFD, obteniendo una retención hasta del 91,8%. Aunque (Wu *et al.*, 2010) al aplicar MFD en tejido de manzana obtuvieron mayores pérdidas en el contenido de vitamina, presentaron una tendencia similar con el aumento en la potencia durante M, obteniendo una retención tan solo del 42,5% (a 2

W/g) comparado con 73% (a 1,2 W/g). Como se observa se presenta una diferencia significativa en el porcentaje de retención de la vitamina C entre (Cui *et al.*, 2008) y Wu *et al.*, 2010). Esta diferencia puede ser debido a que en (Cui *et al.*, 2008) aplican microondas al vacío seguido de procesos de liofilización, en cambio (Wu *et al.*, 2010) se someten las muestras de manzana a liofilización asistido con microondas. De acuerdo con (Khraisheh *et al.*, 2004) y (Santos & Silva, 2008), los cortos tiempos durante los procesos M a temperatura constante pueden mantener la calidad nutricional en el producto deshidratado o aumentar la retención de algunas vitaminas. Igualmente pueden aumentar las pérdidas de vitamina C al presentarse un aumento de la temperatura en el tejido (Bohm *et al.*, 2006).

En cuanto a los tratamientos FD se observa que podría estar clasificado en un nivel medio-alto (50-75 %) de acuerdo con el promedio de los resultados; sin embargo también es posible que se pueda clasificar en un nivel alto de retención de vitamina C (75-100%), teniendo en cuenta que en una de las muestras analizadas se obtuvo tan solo pérdidas de vitamina del 7.1% y en la segunda muestra 48.8% lo cual demuestra un posible error experimental durante el análisis. Algunos autores han obtenido resultados similares en diferentes tipos de fruta. (Marques *et al.*, 2006) liofilizaron pulpa de cereza, papaya, piña y mango obteniendo niveles en la retención de vitamina C del 96.3, 75.8, 73 y 62 % respectivamente. (Hawlder *et al.*, 2006) obtuvieron niveles de retención del 88% y 63 % en papaya y guayaba liofilizada. (Cui *et al.*, 2008) alcanzaron niveles del 97 % en tejido de manzana. De acuerdo con (Ratti, 2001) los procesos FD permiten mayor calidad en términos nutricionales comparados con otros procesos de secado, debido a que el proceso se desarrolla en ausencia de agua líquida y las bajas temperaturas permiten detener la mayoría de las reacciones de degradación.

Igualmente se observa en la Figura que los procesos combinados de ODFD tienden a conservar mayor contenido de vitamina a menor concentración (40°Brix) obteniéndose niveles del 67.2 %. Estos tratamientos de acuerdo al rango establecido pertenece a un nivel medio-alto (50-75%). Un mayor nivel presentaron Fahloul *et al.* (2009) aplicando

ODFD (a 30°Brix) en albaricoque, obteniendo pérdidas del contenido de vitamina C del 21 %, representados en 14 % por el proceso de deshidratación osmótica y 7 % por liofilización. Este mayor nivel en la retención pudo ser debido a que se aplicó en albaricoque un pretratamiento con menor concentración en la solución. De acuerdo con (Vial *et al.*, 1991) la degradación de vitamina C durante la combinación de ODFD, se podría relacionar con el fenómeno de difusión durante OD, el cual es mayor al aumentar la concentración de la solución (Correa *et al.*, 2010). Por tanto debido a que la vitamina C es hidrosoluble (Barrett *et al.*, 2010) es posible que se presente un mayor efecto en las pérdidas de esta vitamina al aplicar OD a mayores concentraciones.

Como se observa en la Figura 6.5 la aplicación de tratamientos combinados MDFD generan mayores pérdidas del contenido de vitamina C, especialmente en pretratamientos MD1 (67%), MD2 (62.9%) y MD4 (67.7%), los cuales fueron tratados en soluciones concentradas a 60 °Brix durante el proceso osmótico. Estos tratamientos estarían clasificados en un nivel medio –bajo de acuerdo a los rangos establecidos. Por el contrario los tratamientos combinados con MD3 y MD5, los cuales fueron desarrollados a 40 °Brix presentaron un mayor nivel de retención, quedando en el rango medio- alto (50-75%). Se esperaban estos resultados puesto que en esta combinación de tecnologías (MOD) se desarrollan dos fenómenos que afectan la retención de nutrientes. El primero de ellos es el deterioro químico debido al aumento de la temperatura en el tejido al aplicar M. El segundo fenómeno es la difusión de la vitamina C de la fruta a la solución (Vial *et al.*, 1991), teniendo en cuenta como se mencionó anteriormente que esta vitamina es hidrosoluble (Santos & Silva, 2008).

Aunque estas tres tecnologías no han sido muy estudiadas hasta el momento, autores como (Erle & Schubert, 2001) encontraron pérdidas de vitamina C del 40% en tejidos de manzanas y fresas sometidas a deshidratación osmótica (60 °Brix) y microondas (390W). Bórquez *et al.*, (2010) aplicaron en frambuesas deshidratación osmótica (60 °Brix) con y sin vacío, obteniendo pérdidas de vitamina C hasta del 80% y reutilizando la solución pérdidas de 60 %. Algunos autores como (Ramallo & Mascheroni, 2011) han obtenido pérdidas de ácido ascórbico del orden de 70% durante el proceso osmótico

aplicado en piña a 60 °Brix. Cao *et al.*, 2006 por el contrario han encontrado en kiwi pérdidas tan solo de 12-30.4% en condiciones óptimas de proceso osmótico (60 °Brix, 30-40 C, 150 minutos y 8 mm de espesor). Cui *et al.*, (2008) aplicaron microondas al vacío en muestras de manzanas obteniendo 89% de retención de vitamina C.

Finalmente al comparar los resultados de estas investigaciones se observa en general que las tecnologías combinadas aplicadas en los trozos de piña tuvieron un menor impacto en las pérdidas de vitamina C.

CONCLUSIONES

Los procesos OD tienen mayor influencia en los cambios de color en comparación con tratamientos M en procesos combinados MDFD. Estos procesos combinados presentan mayores cambios de color con respecto a la fruta fresca

Los pretratamientos OD fortalecen la estructura del tejido de piña aumentando la firmeza durante MDFD (hasta 43,8 N)

El consumidor percibe los cambios de textura como negativos (no los prefiere) y los cambios de color como positivos (los prefiere). En cuanto a sabor, el consumidor prefiere las frutas endulzadas, presentándose en general mayor aceptación del sabor y el color, que en textura con respecto a los procesos liofilizados sin pretratamientos.

Los tratamientos MFD permiten mayor retención de vitamina C (de 75.2 -81.1 %), estos a su vez presentan alrededor de 2-2,5 veces mayor retención de vitamina en comparación con los procesos MDFD (a 60 °Brix).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a La Universidad de La Sabana (Colombia) por la financiación del proyecto 643 de la convocatoria interna

REFERENCIAS

- Agnieszka C. and Andrzej L (2010). Structural Impact of Osmotically Pretreated Freeze-Dried Strawberries on Their Mechanical Properties. *International Journal of Food Properties* 13:1134 – 1149.
- Andrés A., Fito P., Heredia A. and Rosa E. M (2007). Combined drying technologies for development of high quality shelf stable mango products. *Drying Technologies* 25: 1857-1866.
- Antonio G.C., Azoubel P.M., Alves D.G., El-Aouar A.A. and Murr F.E.X (2004). Osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya* L.): Influence of process variables. In *Proceedings of the 14th International Drying Symposium São Paulo, Brazil. C. 1998–2004.*
- Barat J.M., Talens P., Barrera C., Chiralt A. and Fito P (2002). Pineapple candying at mild temperature by applying vacuum impregnation. *Journal of Food Science*. 67(8): 3046–3052.
- Barrett D., Beaulieu J., Shewfelt T R (2010). Color, Flavor, Texture, and Nutritional Quality of Fresh-Cut Fruits and vegetables: Desirable Levels, Instrumental and Sensory Measurement, and the Effects of Processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 50: 369–389.
- Bartolomé A. P., Rupérez P. & Fúster C (1995). Pineapple fruit: morphological characteristics, chemical composition and sensory analysis of Red Spanish and Smooth Cayenne cultivars. *Food Chemistry* 53: 75-79.
- Berteli, M. N., & Marsaioli, A (2005). Evaluation of short cut pasta air dehydration assisted by microwaves as compared to the conventional drying process. *Journal of Food Engineering*, 68(2): 175–183.
- Bohm V; Kuhnert H.R ; Scholze G.(2006). Improving the nutritional quality of microwave vacuum dried strawberries: A preliminary study. *Food Science and Technology International* 12 (1), 67–75.
- Bórquez R.M., Canales E.R. and Redon J.P (2010). Osmotic dehydration of raspberries with vacuum pretreatment followed by microwave-vacuum drying. *Journal of Food Engineering*, 99: 121-127.
- Botha, G.E., Oliveira, J.C., Ahrné, L., (2011). Quality optimisation of combined osmotic dehydration and microwave assisted air drying of pineapple using constant power emission, *Food and Bioproducts Processing*. doi:10.1016/j.fbp.2011.02.006
- Cao H., Zhang M., Mujumdar A., Du W., Sun J (2006). Optimization of Osmotic Dehydration of Kiwifruit. *Drying Technology*, 24, 1, 89-94(6)
- Contreras C., Martín-Esparza M. E., Chiralt A. and Martínez-Navarrete N (2008). Influence of microwave application on convective drying: Effects on drying kinetics and optical and mechanical properties of apple and strawberry. *Journal of Food Engineering* 88: 55-64.
- Correa J; Pereira L; Vieira G; Hubinger M. (2010). Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas. *Journal of Food Engineering* 96, 498–504
- Cui Z. W., Li CH. Y., Song Ch.F. and Song Y (2008). Combined microwave vacuum and freeze drying of carrot and apple chips. *Drying Technology* 26:1517-1523.
- Changrue V., Orsat V. and Raghavan G.S.V (2008). Osmotically dehydrated microwave-vacuum drying of strawberries. *Journal of Food Processing and Preservation* 32: 798-816.
- Erle U and Schubert H. (2001). Combined osmotic and microwave-vacuum dehydration of apples and strawberries. *Journal of Food Engineering* 49, 193–199.

- Fahloul D., Lahbari M., Benmoussa H. and Mezdour S (2009). Effect of osmotic dehydration on the freeze drying kinetics of apricots. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 7:117-121.
- Fairchild, M (2005). *Color Appearance Models*. Jhon Models Wiley & Sons, England.
- Han Q. H., Yin L.J., Li S.J., Yang B.N. and Ma J. W (2010). Optimization of Process Parameters for Microwave Vacuum Drying of Apple Slices Using Response Surface Method. *Drying Technology* 28: 523-532.
- Hawlader M.N.A. Perera C.O., Tian M., Yeo K.L (2006). Drying of guava and papaya: Impact of different drying methods. *Drying technology* 24:77-87
- Huang L., Zhang M., Mujumdar A. and Sun D (2009b). Studies on Decreasing Energy Consumption for a Freeze-Drying Process of Apple Slices. *Drying Technology* 27: 938–946.
- Jiang Hao., Zhang Min. and Mujumdar Arun S (2010). Microwave Freeze-Drying Characteristics of Banana Crisps. *Drying Technology*. 28: 1377–1384.
- Khraisheh, M. A. M, McMinn, W. A. M, and Magee, T.R.A. (2004). Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. *Food Research International*, 37: 497-503.
- Konopacka D; jesionkowsk A; klewicki R & Bonazzi C. (2009). The effect of different osmotic agents on the sensory perception of osmo-treated dried fruit *Journal of Horticultural Science & Biotechnology ISAFRUIT Special Issue* 80–84
- Kopjar M., Pilizota V., Hribar J., Simcic M., Zlatic E. and Nedic T. N (2008). Influence of trehalose addition and storage conditions on the quality of strawberry cream filling. *Journal of Food Engineering*. 87(3): 341–350.
- Landaeta G., Espinoza A. and Mendez J (2008). Fortificación de mitades de durazno con calcio por medio de la deshidratación osmótica a vacío. *Revista tecnológica Espol* 21: 39-46.
- Li Z., Raghavan G.S.V. and Orsat V (2010a). Optimal power control strategies in microwave drying. *Journal of Food Engineering* 99: 263–268.
- Li Z., Raghavan G.S.V. and Orsat V (2010b). Temperature and power control in microwave drying. *Journal of Food Engineering* 97: 478-483.
- Lombar G.E, Oliveira J.C, Fito P. and Andrés A (2008). Osmotic dehydration of pineapple as a pre-treatment for further drying. *Journal of Food Engineering* 85: 277-284.
- Lu L., Tang J. and Ran X (1999). Temperature and moisture changes during microwave drying of sliced food. *Drying Technology*. 17: 413–432.
- Marques L., Silveira A. and Freire J (2006). Freeze drying characteristics of tropical fruits. *Drying Technology* 24: 457-463.
- Maskan M (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, 44(2): 71–78.
- Moreno A., León L. and Rios E (2010). Estudio de la cinética fisicoquímica del mango (*Mangifera indica* L. Var. Tommy Atkins) tratado por métodos combinados de secado. *Dyna* 162: 75-84.
- Muñoz M. (2010). Valor nutritivo de los alimentos de mayor consumo. *Composición de alimentos Edición Internacional*. Mc Graw Hill Interamericana Editores, SA
- NTC4102 (1997). *Frutas Frescas: Piña Manzana - Especificaciones*. Instituto Colombino de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC. pp. 1 – 15.
- Pereira L M., Ferrari C.C , Mastrantonio S.D.S, Rodrigues A.C.C. and Hubinger M.D (2006). Kinetic aspects, texture and color evaluation of some tropical fruits during osmotic dehydration. *Drying Technology* 24: 475-484
- Pereira N, Marsaioli A. and Ahrné L (2007). Effect of microwave power, air velocity and temperature on the final drying of osmotically dehydrated bananas. *Journal od Food Engineering* 81: 79-87
- Prothon F., Ahrn´e L., Funebo T., Kidman S., Langton M. and Sjöholm (2001). *LWT-Food Sci Technology*. DOI 34:95–101.
- Ramallo L.A., Mascheroni R.H (2011). Quality evaluation of pineapple fruit during drying process. *Food and Bioproducts Processing*, 2011: doi:10.1016/j.fbp.2011.06.001.

- Rasband, W. S. (1997 - 2011). ImageJ 1.44p, National Institutes of Health. Maryland, USA: [http:// imagej.nih.gov/ij/](http://imagej.nih.gov/ij/).
- Ratti C (2001). Hot air and freeze-drying of high-values foods: A review. *Journal of Food Engineering*. 49: 311–319.
- Rodríguez R., Lombraña J.I. and Aguado R (2004). Thermal response of a food model dried under microwave. In *Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, São Paulo, Brazil. C: 1735–1742.
- Sagar V. R. and Suresh Kumar P (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal Food Science Technology* 47: 15-26.
- Sanjinez E.J., Branco I., Takito S. and Corbari J. (2010). Influencia de la deshidratación osmótica y de la adición de cloruro de calcio en la conservación de kivis minimamente procesados. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* 30: 205-209.
- Sanjinez E.J., Menegalli F.C., Cunha R.L. and Hubinger M.D (2005). Evaluation of total carotenoids and ascorbic acid in osmotic pretreated guavas during convective drying. *Italian Journal of Food Science*.17: 305–314.
- Santos PHS & Silva MA (2008): Retention of vitamin C in drying processes of fruits and vegetables a review. *Drying Technology*. 26: 1421-1437
- Tortoe C (2010). A review of osmodehydration for food industry. *African Journal of Food Science* 4: 303-324.
- UNE-EN 14130 (2003). Productos alimenticios. Determinación de vitamina C mediante HPLC. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).pp. 1 – 16.
- Vial C; Guilbert S; & Cuq J.L (1991). Osmotic dehydration of kiwi fruits: Influence of process variables on the color and ascorbic acid content. *Sciences des Aliments* 11, 63–84.
- Wais N.L., Santos, M.V., Marani, C.M., Agnelli, M.E. Mascheroni R.H. (2004) Osmotic dehydration and combined osmotic dehydration-hot air drying of banana and apple slices. mass transfer and quality issues. *Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)* São Paulo, Brazil. C:2201-2206
- Wu G., Zhang M., Mujumdar A.S and Wang R (2010). Effect of Calcium Ion and Microwave Power on Structural and Quality Changes in Drying of Apple Slices. *Drying Technology* 28: 517-522.
- Xu Y., Zhang M., Mujumdar A., Duan X. and Jin-cai S (2006). A Two-Stage Vacuum Freeze and Convective Air Drying Method for Strawberries. *Drying Technology: An International Journal* 24: 1019 – 1023.
- Zhang M., Tang J., Mujumdar A.S. and Wang S (2006). Trends in microwave related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology* 17: 524-534

7 CAPÍTULO 5. CONSUMO DE ENERGÍA

7.1 ARTÍCULO No.5.

CONSUMO DE ENERGÍA DE TECOLOGÍAS COMBINADAS DE DESHIDRATACIÓN APLICADAS EN TEJIDO DE PIÑA

RESUMEN

Trozos de piña fueron sometidos a procesos de liofilización usando como pretratamientos el calentamiento por microondas (M) y deshidratación osmótica (OD). El consumo de energía fue cuantificado por medio de balances de materia y energía, en cada etapa de los procesos combinados. En general se presentó mayor efecto al aplicar pretratamientos combinados MD1 (M- 20 kW/kg y OD- 60 °Brix, 150 minutos) obteniéndose ahorros hasta del 58% cuando se mide en kJ/kg de producto obtenido. Por el contrario pretratamientos como M2 (M- 8 kW/kg) no son convenientes en términos de consumo energético.

Palabras Clave: Liofilización, microondas, deshidratación osmótica, Consumo energético.

INTRODUCCIÓN

Además de la calidad de los productos deshidratados, el consumo de energía es un factor crítico en estos tiempos, para la selección de procesos de secado (Sagar & Suresh, 2010). Lo anterior es debido al aumento en los costos y el impacto negativo del uso de energía sobre el cambio climático. Es así que las nuevas tecnologías de secado se están desarrollando para reducir el consumo energético y el impacto ambiental generando productos de mejor calidad (Duan *et al.*, 2010).

El proceso de liofilización es uno de los mejores métodos de deshidratación de productos que permite mediante un proceso de sublimación, productos de alta calidad. Sin embargo, es un proceso largo y costoso (Ratti, 2009). Esto es debido a los diferentes cambios de fase generados por etapas de congelación y sublimación, consumiendo especialmente en esta última etapa casi el 50% de la energía total del proceso (Ratti, 2001; Xu *et al.*, 2004). De acuerdo con Duan *et al.*, (2010) los costos en productos liofilizados es aproximadamente 4 a 10 veces mayor que con secado por aire caliente. Por ende, la aplicación a nivel industrial de este tipo de tecnologías es limitada a la industria farmacéutica y a productos alimenticios de alto valor como el café (Erdogdu *et al.*, 2009).

Por tanto, la combinación de tecnologías de secado se presenta como una opción para reducir el consumo de energía, adicionalmente aumentar el rendimiento del procesamiento y mejorar de la calidad (Raghavan *et al.*, 2005).

La deshidratación osmótica es conocida como un proceso de deshidratación parcial, utilizada como pretratamiento para algunos procesos de secado (Agnieszka & Andrzej, 2010; Ruiz *et al.*, 2010). Este proceso aunque no elimina la humedad suficiente, permite mejorar la calidad en los productos y disminuir los consumos de energía (Botha, 2011; Grabowski *et al.*, 2002), puesto que se puede desarrollar a bajas temperaturas, sin presentar cambios de fase (Tortoe, 2010).

Igualmente, se ha demostrado que el uso de calentamiento por microondas presenta bajos consumos de energía y menores tiempos de secado en comparación con secado convectivo y liofilización (Zhang *et al.*, 2010; Bórquez *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2011; Orsat *et al.*, 2007). Esta tecnología utiliza ondas electromagnéticas que penetran el material, causando oscilación de las moléculas, generando calor en los tejidos y evaporación (Arballo *et al.*, 2010). De acuerdo con Cui *et al.* (2008) la combinación de tecnologías como calentamiento por microondas y liofilización disminuyen significativamente los

tiempos de secado y el consumo de energía en comparación con los convencionales métodos de secado por liofilización.

El objetivo de esta investigación fue evaluar la combinación de tratamientos como el calentamiento por microondas y la deshidratación osmótica previos al proceso de liofilización aplicados en tejidos de piña, en términos de consumo energético.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales y Métodos

Piña (*Ananas comosus*) variedad Golden obtenida en el mercado local procedente de la región del Valle del Cauca-Colombia, fueron seleccionadas con grado de maduración 3 (basada en la carta NTC 4102, 1997) teniendo en cuenta el color de la corteza, sin presencia de daños por insectos, golpes o fisuras.

Las piñas fueron manualmente peladas, tajadas en rodajas y posteriormente cortadas en trapecios de 10 x 30 mm en lados paralelos y 5 mm de espesor, con un peso promedio por muestra de 6 ± 0.5 g.

Tratamientos

Las muestras de piña fueron sometidas a procesos combinados de deshidratación seleccionados, aplicando básicamente calentamiento por microondas (M) y deshidratación osmótica (OD) previas a procesos de liofilización (FD).

El proceso OD se realizó utilizando solución de sacarosa a 40 y 60 °Brix, manteniendo una proporción producto solución de 1:5 p/p. El proceso fue llevado a cabo durante 30, 90 y 150 minutos, a 20°C. Al finalizar el tratamiento las muestras fueron retiradas de la

solución, eliminando el contenido superficial del jarabe de sacarosa con papel absorbente.

Las muestras de piña también fueron sometidas al proceso M aplicado en un equipo HACEB HM1.1. El proceso se realizó a 40, 20 y 8 kW/kg durante 1, 2 y 5 minutos respectivamente, garantizando un mismo nivel de energía entregada (27 kJ).

La tabla 7.1 resume las condiciones de los pretratamientos seleccionados de M y OD. Estos pretratamientos se seleccionaron previamente a partir de una serie de experimentos (Capítulo 3, numeral 5.3-5.4). Para OD, M y la combinación entre estas MD, se tomaron en cuenta los que presentaron mayor y menor pérdida de humedad, así como los que presentaron mayor y menor ganancia de sólidos.

Tabla 7.1 Pretratamientos seleccionados para evaluación de consumo energético

Tratamiento	Concentración (°Brix)	Tiempo Osmótico (minutos)	Potencia (kW/kg)
Fruta fresca	x	x	x
OD1	60	90	x
OD2	40	30	x
M1	x	x	40
M2	x	x	8
MD1	60	150	20
MD2	60	90	40
MD3	40	30	8
MD4	60	90	8
MD5	40	30	40

Finalmente fueron liofilizadas las muestras de piña sometidas a los pretratamientos seleccionados. Se utilizó un equipo Labconco 79480, congelando a -40°C , y sublimando con temperatura de placa de calentamiento a 40°C , durante 48 h y 14.7 Pa. Igualmente se liofilizó fruta fresca tomando estos productos como blancos para el análisis de los demás procesos combinados.

Los procesos combinados seleccionados fueron evaluados en términos de consumo energético mediante balances de materia y energía (Tabla 7.2).

Para calcular la energía consumida durante los tratamientos de secado se identificaron puntos de consumo en el proceso FD (es decir, durante el enfriamiento, congelación, subenfriamiento, sublimación, condensación, calentamiento, evaporación y energía de la bomba de vacío), como también durante el proceso M.

Para realizar los cálculos de la energía se tuvo en cuenta la definición de buena energía o energía válida (GE) (Huang *et al.*, 2009b), que define el consumo de energía sin la ineficiencia de los equipos. Aunque cabe aclarar que se tuvo en cuenta la eficiencia del microondas calculada a 20, 50 y 100 % de potencia obteniendo en promedio una eficiencia del 45%. Esta fue evaluada teniendo en cuenta la energía consumida por el producto, relacionada con la energía entregada por el equipo durante el proceso. Para el proceso osmótico se asignó un valor de cero en el consumo puesto que fue aplicado a temperatura ambiente bajo condiciones isotérmicas.

La Tabla 7.2 Resume las ecuaciones utilizadas para el cálculo del consumo de energía en los diferentes puntos del proceso de secado.

Tabla 7.2.Ecuaciones para el cálculo de consumo de energía

Puntos de consumo de energía	Ecuación	Variables	Constantes y descripción de variables
Calor sensible durante el enfriamiento(E1)	$m_1Cp\Delta T$	m_1 : masa total de la fruta (kg) Cp : calor específico de la fruta (kJ/kg°C) ΔT : T1-T2 $T1$:temperature ambiente (°C) $T2$: temperatura de congelación de la fruta (°C)	m_1 : masa de la fruta antes de FD Cp : Ibarz & Barbosa (2005); Choi & Okos (1986) $T1$:20 °C
Calor latente durante la congelación (E2)	$m_2\lambda_{cg}$	m_2 :masa de agua congelable de la fruta (kg) λ_{cg} :calor latente congelación del agua (kJ/kg)	m_2 : Ibarz & Barbosa (2005); λ_{cg} : 335 kJ/kg
Calor sensible durante el Sub-enfriamiento (E3)	$m_3Cp\Delta T$	m_3 :masa total de la fruta (kg) Cp : calor específico de la fruta (kJ/kg°C) ΔT : T2-T3 $T3$:temperature de subenfriamiento (°C)	$m_3 = m_1$ Cp : Ibarz & Barbosa (2005); Choi & Okos (1986) $T3$: -40 °C
Calor de sublimación (E4)	$m_4\lambda_s$	m_4 :masa de agua congelable de la fruta (kg) λ_s : calor latente de sublimación (kJ/kg)	$m_4 = m_2$ λ_s : 2830 kJ/kg
Calor latente de condensación (E5)	$m_5\lambda_{cd}$	m_5 :masa de agua congelable de la fruta (kg) λ_{cd} : calor latente de condensación (kJ/kg)	$m_5 = m_4$ $\lambda_{cd} = \lambda_s$
Calor sensible durante el calentamiento (E6)	$m_6Cp\Delta T$	m_6 : masa de la fruta semiseca (kg) Cp : calor específico de la fruta (kJ/kg°C) ΔT : T4-T3 $T4$:temperature de calentamiento (°C)	X_w : Fracción de agua antes de FD m_a : Fracción de agua sin congelar $m_6 = m_1(1 - X_w) + m_1 * m_a$ Cp : Ibarz & Barbosa (2005); Choi & Okos (1986) $T4$: 40 °C
Calor latente de vaporización del agua no congelada (E7)	$m_7\lambda_v$	m_7 :masa de vapor (kg) λ_v :calor latente de vaporización (kJ/kg)	$m_7 = m_1 * X_w - m_5$ λ_v : 2257 kJ/kg (a 100 °C)
Calor latente de condensación del agua evaporada (E8)	$m_8\lambda_{cd}$	m_8 :masa de vapor (kg) λ_{cd} :calor latente de condensación (kJ/kg)	$m_8 = m_7$
Consumo de la bomba de vacío (E9)**	$(P-Pfc)Vt^*$ $(tp + ts) / tfv$	P :presión atmosférica (Pa) Pfc : cambio de presión durante FD (Pa) Vt : Volumen total del aire en el liofilizador (m ³) tp :tiempo para la etapa primaria de secado (h) ts :tiempo para la etapa secundaria de secado (h) tfv :tiempo de trabajo de la bomba de vacío desde presión atmosférica hasta 100 Pa (h)	P :74660 Pa (Bogotá) Pfc : 14 Pa Vt : 0.064 m ³ tp y ts : (Pardo & Leiva, 2010) tfv : 0.12 h
Consumo del microondas (E10)	Pt	P :potencia del microondas (kJ/s) t :tiempo de secado(s)	27 kJ

** Huang et al 2009b

- **Calor específico (Cp) de la fruta**

Ibarz & Barbosa (2005) cita a Choi & Okos (1986) quienes definen las ecuaciones Ec.1 y Ec.2 para calcular el Cp (kJ/kg °C) en productos que contienen n componentes:

$$Cp = \sum_{i=1}^n X_i^W * C_{pi} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

X_i^W : Fracción másica del componente i

C_{pi} : Calor específico del componente i

Siendo:

$$C_{pi} = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 \quad (\text{Ec. 2})$$

Determinando las constantes a_1 , a_2 y a_3 para un rango de temperatura entre -40 °C a 150 °C, de acuerdo con la Tabla 7.3:

Tabla 7.3. Constante para la determinación del calor específico C_{pi}

a_1	a_2	a_3	Componente
4,18	$-9,086 * 10^{-5}$	$5,47 * 10^{-6}$	Agua
1,55	$1,96 * 10^{-3}$	$-5,94 * 10^{-6}$	Carbohidratos
2,062	$6,077 * 10^{-3}$		Hielo

- **Masa de agua congelable en la fruta**

El agua es el principal componente en las frutas, por tanto es importante en la determinación de las propiedades térmicas. En este sentido para calcular la fracción de agua congelable se tuvo en cuenta primero la fracción de agua no congelada en función de la temperatura, aplicando la Ley de Raoult y considerando que el alimento está

compuesto de una solución binaria ideal (mezcla simple de sólidos y agua) y hielo (Ibarz & Barbosa, 2005).

Mediante las ecuaciones Ec.3 a Ec. 8 se obtiene la masa de agua congelable:

Peso molecular de la fruta (W_B):

$$W_B = \frac{W_A m_B}{X_W \left\{ \frac{1}{K} - 1 \right\}} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$K = e^{\frac{\lambda}{R_g} \left[\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_2} \right]} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

W_A : Peso molecular del agua (g)

X_W : Fracción de agua antes de FD

m_B : Fracción de sólidos antes de FD

λ : calor latente de fusión del agua 6003 (kJ/kmol)

R_g : 8,314 (kJ/kmol*K)

T_o : 273 K

T_2 : Temperatura inicial de congelación (K)

Fracción molar de agua sin congelar (X_A):

$$\ln X_A = \frac{\lambda}{R_g} \left[\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_2} \right] \quad (\text{Ec. 5})$$

Estimación fracción de agua sin congelar en las muestras de piña (m_A):

$$m_A = \frac{W_A m_B}{W_B \left\{ \frac{1}{X_A} - 1 \right\}} \quad (\text{Ec. 6})$$

Fracción másica de agua congelada (X_H):

$$X_H = X_w - m_A \quad (\text{Ec. 7})$$

$$m_c = X_H * m_l \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

m_f : masa de la fruta antes de FD

m_c = masa de agua congelable

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 7.1 y Tabla 7.4 presentan los consumos de energía para cada etapa de los procesos combinados. El porcentaje de energía relaciona el consumo en cada etapa (medido en kJ/kg agua retirada) con respecto a la energía total del proceso.

Como se observa en estos resultados, más del 90 % del consumo de energía se deben a las etapas E2 (congelación), E4 (sublimación), E5 (condensación), E9 (vacío) y E10 (calentamiento por microondas), para todos los procesos combinados incluyendo también FD.

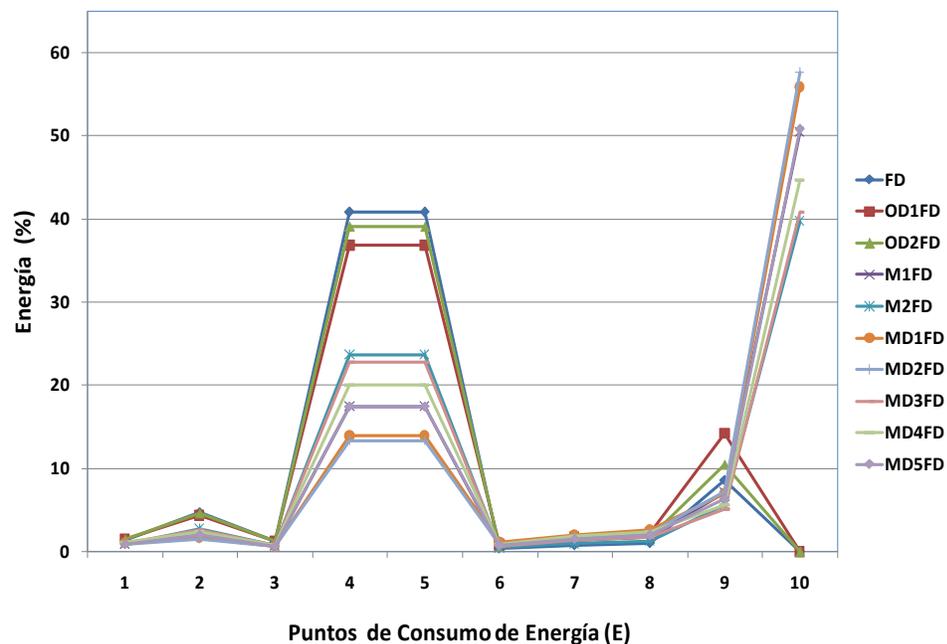


Figura 7.1. Consumos de energía (%) durante las diferentes etapas de los procesos de deshidratación (E): enfriamiento (E1), congelación (E2), Sub-enfriamiento (E3), sublimación (E4), condensación (E5), calentamiento (E6), vaporización del agua no congelada (E7), condensación del agua evaporada (E8), bomba de vacío (E9), Consumo del microondas (E10).

En la Figura 7.1 se observa un alto consumo de energía en el proceso de microondas. Éste consumo representa el nivel de energía establecido en el plan experimental para todas las aplicaciones del proceso de calentamiento por microondas. Se trata de un pulso de alta energía aplicado en corto tiempo cuyo efecto positivo se puede ver cuando se analizan los consumos totales por proceso (Tabla 7.4). Se espera que este pulso de alta energía tenga un efecto acelerador sobre la transferencia de masa puesto que debido a la evaporación rápida del agua puede romper células y facilitar la salida de los componentes celulares (Mandal *et al.*, 2007; Cendres *et al.*, 2011)

Tabla 7.4. Consumos de energía de los procesos combinados de secado.

<i>Puntos de Energía</i>	<i>FD</i>	<i>OD1FD</i>	<i>OD2FD</i>	<i>M1FD</i>	<i>M2FD</i>	<i>MD1FD</i>	<i>MD2FD</i>	<i>MD3FD</i>	<i>MD4FD</i>	<i>MD5FD</i>
	<i>(kJ/kg agua removida)</i>									
E1	97,8	70,0	92,6	52,0	71,4	56,3	48,7	75,6	73,4	54,9
E2	326,8	194,3	278,5	120,2	206,4	86,8	80,8	193,7	156,0	119,2
E3	83,2	55,5	75,7	38,6	57,5	36,7	32,4	58,2	53,0	39,9
E4	2760,9	1641,6	2353,0	1015,5	1743,6	733,7	682,6	1636,3	1318,3	1006,9
E5	2760,9	1641,6	2353,0	1015,5	1743,6	733,7	682,6	1636,3	1318,3	1006,9
E6	32,0	38,6	42,6	38,5	36,1	60,4	49,7	48,3	60,2	43,9
E7	55,1	81,2	86,0	81,5	74,9	109,5	93,6	102,8	125,0	91,7
E8	69,1	101,8	107,9	102,2	93,9	137,3	117,4	128,9	156,7	115,0
E9	584,3	633,4	633,9	415,5	415,3	369,9	369,2	368,9	369,7	368,7
E10	0,0	0,0	0,0	2926,8	2925,8	2939,2	2933,4	2931,4	2937,5	2929,5
Energía Total	6770,1	4457,9	6023,1	5806,4	7368,5	5263,4	5090,3	7180,3	6568,0	5776,7
	<i>(kJ/kg Producto obtenido)</i>									
Energía Total	35328,3	20841,0	25068,0	27240,1	36513,2	14800,1	17639,9	26993,2	19566,0	23629,1

Igualmente se observa que todos los pretratamientos, tienen un efecto positivo sobre la reducción del consumo de energía, excepto M2. Esto indica que la aplicación de microondas (8 kW/kg) previo al proceso de liofilización no es conveniente en términos de ahorro energético. Este resultado está relacionado con los niveles de deshidratación en los pretratamientos. Se observa en general que a mayores pérdidas de humedad en los

procesos previos a FD, menor consumo de energía en el proceso combinado. En M2 tan solo se obtienen pérdidas de agua del 29% en comparación con otros tratamientos que presentan mayor deshidratación como por ejemplo M1 (62%) o MD2 (58%). Por tanto estos niveles en M2 afectan el consumo de energía presentando mayores valores (7368 kJ/kg de agua removida), tal como se observa en la Tabla 7.4.

Adicionalmente los pretratamientos M1 (40 kW/kg) permiten un ahorro del 23% que es bajo comparado con otros encontrados en este estudio. Lo anterior era esperado, pues los tratamientos que no incluyen deshidratación osmótica retiran la mayor cantidad de agua por evaporación y no tienen inclusión de sólidos. Sin embargo es importante resaltar que M1 presenta una disminución en el consumo global de energía que no es despreciable y que podría ser mayor si se suministra la energía del microondas de forma continua e intermitente aumentando así la eficiencia del proceso (Orsat *et al.*, 2007; Changrue *et al.*, 2008).

Por otro lado, de acuerdo con los resultados (Tabla 7.4) los pretratamientos que incluyen OD consumen entre un 59-71% (medido en kJ/kg producto obtenido) de la energía consumida por FD, presentándose un menor nivel al aplicar OD1 (60 °Brix, 90 minutos). Estos resultados concuerdan con Lenart (1996) quien describe que una de las principales ventajas de utilizar la deshidratación osmótica es que el proceso reduce el consumo de energía del 20-30%, permitiendo menores tiempos de proceso. Lo anterior es debido a que la deshidratación osmótica no solo retira agua sino que agrega sólidos al producto (Ortega, 2007) y por lo tanto se obtiene una mayor cantidad de producto sin aumentar el consumo de energía.

En procesos combinados M y OD se presentó reducción de consumo energético en el rango comprendido entre 42 y 76 % del consumo FD. Se destacan los menores consumos en los procesos que involucraron pretratamientos MD1 (M-20 kW/kg y OD-60 °Brix, 150 minutos) y MD2 (M-40 kW/kg y OD-60 °Brix, 90 minutos) presentando valores de 42 y 50% de la energía consumida por FD, respectivamente. En esta combinación de pretratamientos se esperaba un efecto sinérgico ya que la ruptura celular

durante M debe facilitar la transferencia de masa durante OD (Pardo & Leiva, 2010). Lo anterior se evidencia, si se comparan por ejemplo los tratamientos OD1 y MD2, que tienen las mismas condiciones de deshidratación osmótica (60 °Brix, 90 minutos), presentando niveles de 20.840 y 17.639 kJ/ kg de producto, es decir un 9% menos en el consumo de energía al combinar M y OD. Al comparar con MD4 se observa la misma tendencia presentando tan solo una diferencias del 4% con respecto al pretratamiento OD1, debido a un menor nivel de potencia aplicado en M (8kW/kg).

De acuerdo con los resultados de Huang *et al.*, (2009b) la combinación de tecnologías como M y FD permite reducir el consumo de energía independientemente del orden en el cual se apliquen los tratamientos. Ellos aplicaron en tejido de manzana diferentes combinaciones de FDM y MFD obteniendo consumos del 43-56% con respecto a FD. Similares resultados se encontraron en la presente investigación obteniéndose niveles del 42 y 55 %, especialmente al aplicar MD1 y MD4, previo a FD.

Igualmente en investigaciones previas (Pardo & Leiva, 2010) se combinó M (1000 W) y OD (60 Brix) en tejido de piña liofilizado, obteniendo un efecto significativo en el consumo de energía con una disminución hasta del 61,3% (medido en kJ/kg de producto obtenido) en comparación con FD, presentando un efecto similar al pretratamiento MD4 (M-8 kW/kg y OD- 60 °Brix, 90 minutos). También en otro trabajo de Pardo & Leiva (2009) se combinó M y OD en trozos de piña obteniendo menores consumos de energía (3565 kJ/kg de agua removida) al aplicar mayores niveles de potencia (1000 W, durante 1 minuto) .

Consumos de energía en diferentes frutas y tecnologías de deshidratación

En las Tablas 7.5 y 7.6 se presentan los consumos de energía en procesos FD, M y secado por aire caliente (AD), así como algunas combinaciones de tecnologías analizadas por otros investigadores, aplicadas en diferentes tejidos de frutas. Con el fin de poder comparar entre tratamientos se analizó el consumo de energía por kJ/ kg de agua retirada.

Aunque hay pocas investigaciones relacionadas con la evaluación del consumo de energía en procesos de deshidratación, se observa que los tratamientos FD tienen mayor consumo en comparación con AD y M.

Los rangos encontrados en consumos de energía (Tabla 7.5) están para FD entre 6464-778.589 kJ/kg agua retirada (Pardo & Leiva, 2010; Huang *et al.*, 2009b^{*}), para AD entre 15.574-564.500 kJ/kg agua retirada (Motevali *et al.*, 2011^{*}; Kassem *et al.*, 2011) y para M entre 43-52.703 kJ/kg agua retirada (Changrue *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2010c^{*}).

En la Tabla 7.6 podemos observar que al combinar M con procesos FD y AD, se disminuye el consumo de energía en comparación con los tratamientos individuales.

Por otro lado al comparar los resultados de las Tablas 7.5 y 7.6 con los obtenidos en la presente investigación, se observa que se está gastando menos energía con los tratamientos propuestos especialmente en comparación con investigaciones desarrolladas por Huang *et al.*, 2009b^{*} (que combina también FD y M), Xu *et al.*, 2006^{*} (FD y AD), Kassem *et al.*, 2011 y Motevali *et al.*, 2011^{*} (que combinan M y AD).

Finalmente nos damos cuenta que la combinación de tecnologías MDFD es una buena opción para reducir el consumo energético en procesos de deshidratación de piña.

Tabla 7.5. Consumos de energía de frutas sometida a tecnologías individuales de deshidratación (TD)

TD	PRODUCTO	CONDICIONES DE OPERACIÓN	CONSUMO DE ENERGÍA (kJ/kg agua retirada)	AUTOR
FD	Fresa	95 °C, 26 h , hasta 8.8 % HBH	230.315	Xu <i>et al.</i> , 2006*
	manzana	hasta 6 % HBH, 100 Pa, -40°C (congelación), 15 h	778.589	Huang <i>et al.</i> , 2009b*
	piña	24h,0.15mbar, 40°C	6467	Pardo & Leiva, 2010
AD	fresa	60°C, durante 13,5 h. hasta 13,23% HBH	223.464	Xu <i>et al.</i> , 2006*
	uvas	70 °C. 300 g	564.500	Kassem <i>et al.</i> , 2011
	Pomegranate (granada)	70 °C and 0.5 m/s	15.574	Motevali <i>et al.</i> , 2011*
		45°C and 1.5 m/s	62.296	
M	piña	20 kW/kg (100 % potencia, 1 min)	7920	Pardo & Leiva, 2010
	fresas	1 W/g, continuo 8kPa. Hasta 7% HBH	56	Changrue <i>et al.</i> , 2008
		1 W/g, intermitente 30s-30s, 8kPa. Hasta 7% HBH	43	
		1.5 W/g, continuo 8kPa. Hasta 7% HBH	53	
		1.5 W/g, intermitente, 8kPa. Hasta 7% HBH	51	
	jujube	45W, 2455 MHz.	17.330	Wang <i>et al.</i> , 2009*
		90 W, 2455 MHz.	12.056	
		135 W, 2455 MHz.	11.302	

TD	PRODUCTO	CONDICIONES DE OPERACIÓN	CONSUMO DE ENERGÍA (kJ/kg agua retirada)	AUTOR
M	manzana	5 W/g, 60 °C	52.703	Li <i>et al.</i> , 2010c*
		4W/g, 70 °C	35.135	
		3 W/g, 80 °C	41.892	
	manzana	Hasta 10 % HBH. Control de potencia y temperatura. 70 °C, 3 W/g	36.000	Raghavan <i>et al.</i> , 2010*
		Hasta 10 % HBH. Control de potencia y temperatura. 60°C, 2 W/g	52.000	
	manzana	300W, 30°C	27.558	Li <i>et al.</i> , 2011*
		300W, 60°C	21.351	
	Pomegranate (granada)	100W	1.997	Motevali <i>et al.</i> , 2011*
		200W	1.027	
		300W	1.141	
	manzana	75°C, 400W	14.387	Li <i>et al.</i> , 2010a*
		65°C, 320W	17.504	
55°C, 240W		18.873		

HBH: Humedad en base húmeda

*Valores estimados

Tabla 7.6. Consumos de energía de frutas sometida a tecnologías combinadas de deshidratación (TD)

TD	PRODUCTO	CONDICIONES DE OPERACIÓN	CONSUMO DE ENERGÍA (kJ/kg agua retirada)	AUTOR
FD+M	manzana	FD: 6 h, 100 Pa, -40°C M: 7 W/g hasta 6 % HBH, 5 kPa	337.111	Huang <i>et al.</i> , 2009b*
		FD: 8.28h , 100 Pa, -40°C. M: 7 W/g hasta 6 % HBH, 5 kPa	444.467	
M+ FD	manzana	M: 1 W/g 20 min, 5 kPa. FD: hasta 6 % HBH, 100 Pa, -40°C	440.734	Huang <i>et al.</i> , 2009b*
M+FD	piña	M: 20 kW/kg. FD:24 h, 0.15mbar, 40°C	6575,9	Pardo & Leiva, 2010
M+OD +FD	piña	M: 20 kW/kg. OD: 60 °Brix, 20°C, r/1:5, 75 min. FD:24 h,0.15mbar, 40°C	5261	Pardo & Leiva, 2010
M+OD	piña	M 1 min a 1000W/OD 74 min	3565	Pardo & Leiva, 2009
		M 2 min a 500 W/OD 73 min	3975	
		M 30 min a 100W/OD 45 min	13482	
OD+M	fresas	OD: 60 °Brix, 24 h .r/1:9. M: 1 W/g, continuo, 8 kPa. Hasta 7% HBH	49	Changrue <i>et al.</i> , 2008
		OD: 60 °Brix, 24 h .r/1:9. M: 1 W/g, intermitente 30s-30s, 8 kPa. Hasta 7% HBH	46	
		OD: 60 °Brix, 24 h .r/1:9. M: 1.5 W/g, continuo, 8 kPa. Hasta 7% HBH	51	
		OD: 60 °Brix, 24 h .r/1:9. M: 1.5 W/g, intermitente 30s-30s, 8 kPa. Hasta 7% HBH	48	

TD	PRODUCTO	CONDICIONES DE OPERACIÓN	CONSUMO DE ENERGÍA (kJ/kg agua retirada)	AUTOR
M+OD	piña	M: 20 kW/kg. (100 % potencia, 1 min) OD: 60 °Brix, 20°C, 75 min	3600	Pardo & Leiva, 2010
OD+FD	piña	OD: 60 °Brix, 20°C, r/1:5, 75 min. FD: 24 h, 0.15 mbar, 40°C.	5.101	Pardo & Leiva, 2010
M+AD	uvas	M: 1 min. 900, 700, 500, 400, 300, 250, 150 y 75 W. AD: 70 °C. 30,60, 120 min	259.000-480.100	Kassem <i>et al.</i> , 2011
AD+M	uvas	AD: 70 °C. 30, 60, 120 min. M: 1 min. 900, 700, 500, 400, 300, 250, 150 y 75 W	238.500-535.600	Kassem <i>et al.</i> , 2011
MAD	Pomegranate (granada)	100 W, 70 °C, 0.5 m/s	12.166	Motevali <i>et al.</i> , 2011*
		200 W, 70 °C, 0.5 m/s	9.954	
		100 W, 45 °C, 1.5 m/s	38.710	
		200 W, 45°C, 1.5 m/s	23.226	
FD+AD	fresa	FD: 95°C, 13.75 h AD: 60°C, 5 h. hasta 8 % HBH	213.662	Xu <i>et al.</i> , 2006*

HBH: Humedad en base húmeda

*Valores estimados

CONCLUSIONES

Todos los pretratamientos utilizados redujeron el consumo de energía excepto la aplicación de microondas a baja potencia (8 kW/kg).

Los pretratamientos de deshidratación osmótica con mayor concentración en la solución (60 °Brix) son más eficientes en términos de consumo energético.

La aplicación de pretratamientos con microondas y deshidratación osmótica permiten reducir el consumo de energía hasta un 58% medido en kJ / kg de producto obtenido (especialmente en M-20 kW/kg y OD-60 °Brix durante 150 minutos), comparado con FD.

El uso de MDFD se presenta como una alternativa para reducir costos en el proceso de liofilización a nivel industrial para el procesamiento de frutas.

REFERENCIAS

- Agnieszka C. and Andrzej L (2010). Structural Impact of Osmotically Pretreated Freeze-Dried Strawberries on Their Mechanical Properties. *International Journal of Food Properties* 13:1134 – 1149.
- Arballo J., Campañone L. and Mascheroni R. (2010). Modeling of Microwave Drying of Fruits. *Drying Technology: An International Journal* 28:: 1178 – 1184
- Bórquez R.M., Canales E.R. and Redon J.P (2010). Osmotic dehydration of raspberries with vacuum pretreatment followed by microwave-vacuum drying. *Journal of Food Engineering*, 99: 121-127.
- Botha, G.E., Oliveira, J.C., Ahrn é, L. (2011). Quality optimisation of combined osmotic dehydration and microwave assisted air drying of pineapple using constant power emission, *Food and Bioproducts Processing*. doi:10.1016/j.fbp.2011.02.006
- Cendres A., Chemat F., Maingonnat J., Renard C. (2011). An innovative process for extraction of fruit juice using microwave heating. *LWT - Food Science and Technology* 44: 1035 -1041
- Cui Z. W., Li CH. Y., Song Ch.F. and Song Y (2008). Combined microwave vacuum and freeze drying of carrot and apple chips. *Drying Technology* 26:1517-1523.
- Changrue V., Orsat V. and Raghavan G.S.V (2008). Osmotically dehydrated microwave-vacuum drying of strawberries. *Journal and Food Processing and Preservation* 32: 798-816.
- Choi Y. and Okos M.R. (1986). "Effects of Temperature and composition on the thermal properties of foods". *Food engineering and process applications. Transport phenomenon*. Edited by Maguer L. Jelen P. Elsevier, New Your, (1): 93 – 101.
- Duan X., Zhang M., Mujumdar A. S. and Wang R (2010). Trends in Microwave-Assisted Freeze Drying of Foods. *Drying Technology* 28: 444–453.
- Erdogdu Ferrh (2009). *Optimization in food Engineering*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Grabowski S., Marcotte M., Poirier M., Kudra, T. (2002). Drying characteristics of osmotically pretreated cranberries-energy and quality aspects. *Drying Technologie*. 20: 1989–2004.

- Huang L., Zhang M., Mujumdar A. and Sun D (2009b). Studies on Decreasing Energy Consumption for a Freeze-Drying Process of Apple Slices. *Drying Technology* 27: 938–946.
- Ibarz A. & Barbosa G. (2005). Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. E. Aedos S.A. Madrid España.
- Kassem A.S., Shokr A.Z., El-Mahdy A.R., Aboukarima A.M., Hamed E.Y (2011). Comparison of drying characteristics of Thompson seedless grapes using combined microwave oven and hot air drying. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 10: 33–40
- Mandal V., Mohan Y., Hemalatha S. Microwave Assisted Extraction – An Innovative and Promising Extraction Tool for Medicinal Plant Research Review (2007). *Pharmacognosy Reviews* 1 (1): 7-18
- Motevali A., Minaei S., Khoshtagaza M (2011). Evaluation of energy consumption in different drying methods. *Energy Conversion and Management* 52: 1192–1199
- Lenart A (1996): Osmo-convective drying of fruits and vegetables: Technology and application. *Drying Technology*.14: 391–413.
- Li Z., Raghavan G.S.V. and Orsat V (2010a). Optimal power control strategies in microwave drying. *Journal of Food Engineering* 99: 263–268.
- Li Z., Raghavan G.S., Wang N (2010c). Apple volatiles monitoring and control in microwave drying. *LWT - Food Science and Technology* 43:684–689
- Li Z., Raghavan G.S.V. , Wang N., Vigneault C. (2011). Drying rate control in the middle stage of microwave drying. *Journal of Food Engineering* 104: 234–238
- NTC4102 (1997). Frutas Frescas: Piña Manzana - Especificaciones. Instituto Colombino de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC. pp. 1 – 15.
- Orsat V., Yang W., Changrue V. and Raghavan G.S. V (2007). Microwave assisted drying of materials. *Food and Bioproducts Processing* 85: 255-263.
- Ortega R., (2007). Processing effects for safety and quality in some non-predominant food technologies. *Critical Review in Food Science and Nutrition* 47: 161-173
- Pardo M. and Leiva D (2009). Combination of technologies for the dehydration of pineapple. *Ingeniería y Competitividad* 11: 57-65.
- Pardo M. & Leiva A. (2010). Effect of different pre-treatments on energy consumption during freeze drying of pineapple pieces. *Revista de Ciencia y tecnología de América –Inter ciencia* 35: 934-938.
- Ratti C (2001). Hot air and freeze-drying of high-values foods: A review. *Journal of Food Engineering*. 49: 311–319.
- Ratti C (2009). *Advances in food dehydration*. Boca Raton, FL: CRC P Taylor & Francis
- Sagar V. R. and Suresh Kumar P (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal Food Science Technology* 47: 15-26.
- Raghavan G. S. V., Li Z., Wang N.,Gariépy Y. (2010). Control of Microwave Drying Process Through Aroma Monitoring. *Drying Technology*, 28: 591–599.
- Raghavan, G.S.V.; Orsat, V.; Meda, V. (2005). Microwave processing of foods. *Stewart Postharvest Review* 3 (2): 1–7
- Ruiz I., Huerta I., Vivar M., Martínez C., Lara E (2010). Effect of Osmotic Dehydration on Air-Drying Characteristics of Chayote. *Drying Technology*, 28: 1201–1212.
- Tortoe C (2010). A review of osmodehydration for food industry. *African Journal of Food Science* 4: 303-324.
- Wang Z., Fang S. and Hu X (2009). Effective Diffusivities and Energy Consumption of Whole Fruit Chinese Jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) in Microwave Drying. *Drying Technology: An International Journal* 27: 1097 – 1104.
- Xu Y., Min Z., Mujumdar A.S (2004). Studies on hot air and microwave vacuum drying of wild cabbage. *Drying Technology*, 22 (9): 2201–2209.
- Xu Y., Zhang M., Mujumdar A., Duan X. and Jin-cai S (2006). A Two-Stage Vacuum Freeze and Convective Air Drying Method for Strawberries. *Drying Technology: An International Journal* 24: 1019 – 1023.
- Zhang M., Jiang H. y Rui-Xin L. (2010). Recent Developments in Microwave-Assisted Drying of Vegetables, Fruits and Aquatic Products- Drying kinetics and Quality Considerations. *Drying Technology*. 28: 1307-1316.

8 CAPITULO 6. DISCUSIÓN GENERAL

Un producto exitoso en el mercado es aquel que es apetecible para el consumidor potencial, que tenga un contenido nutricional y que adicionalmente sea económico. Al analizar algunas tecnologías investigadas hasta el momento teniendo en cuenta estos tres aspectos, nos damos cuenta en general que ninguna cubre las expectativas del mercado, cada vez más exigente.

Por tanto es un reto encontrar un proceso de deshidratación que permita producir alimentos con propiedades fisicoquímicas, nutricionales y organolépticas aceptables para el consumidor y altos rendimientos para el productor. Bajo este enfoque fue planteado el presente proyecto. Los consumidores potenciales cada vez más se enfocan en productos de buena calidad (en términos nutricionales y sensoriales) y de bajo costo.

Para esto se sometieron trozos de piña a diferentes tratamientos previos a procesos de liofilización utilizando calentamiento por microondas y deshidratación osmótica. Estos pretratamientos fueron seleccionados a partir de experimentos preliminares donde se tuvo en cuenta mayores y menores niveles de pérdidas de humedad y ganancia de sólidos. El color, la textura, el contenido de vitamina C y las propiedades organolépticas de los productos deshidratados fueron analizados, así como el consumo de energía de los procesos combinados.

En términos generales se observó un impacto positivo al aplicar calentamiento con microondas sobre la transferencia de masa durante el tratamiento osmótico, obteniéndose mayores pérdidas de humedad especialmente a 40 kW/kg (alrededor del 60%); igualmente mayor ganancia de sólidos con 8 kW/kg (14%) sin presentarse diferencias con el proceso osmótico a nivel individual.

En términos de calidad se presentaron mayores niveles de cambios de color (28.4) y mayor firmeza (hasta 43,8 N) en procesos combinados microondas –deshidratación

osmótica-liofilización, debido especialmente al efecto del proceso osmótico. Igualmente este tratamiento combinado tuvo un efecto en las pérdidas de vitamina C, presentándose tan solo en pretratamientos individuales de microondas (a 8 kW/ kg) mayor retención (81%) lo cual representa de 2-2,5 veces con relación al tratamiento combinado.

La aplicación de pretratamientos con microondas y deshidratación osmótica también permitieron reducir el consumo de energía hasta en un 58% (medido en kJ / kg de producto obtenido) comparado con el proceso individual de liofilización.

A nivel organoléptico los consumidores potenciales aceptaron los efectos producidos por los procesos combinados en la fruta en términos de sabor y color, contrario a lo ocurrido con textura presentándose en general bajos niveles de aceptabilidad. Esto indica que los consumidores prefieren trozos de piña deshidratada endulzada, con un nivel en el color amarillo más intenso que el de la fruta fresca y no tan firmes (o duras) a nivel estructural. Cuando los consumidores hicieron la selección a nivel global del mejor tratamiento seleccionaron los procesos de liofilización sin pretratamientos y en segundo lugar la combinación de este pretratamientos con deshidratación osmótica, es decir hay un gran efecto en la aceptación del producto deshidratado por la firmeza en el tejido.

Finalmente se observa que los resultados finales en cuanto a color, textura y consumo energético, obtenidos en los capítulos 4 y 5 (teniendo en cuenta los tratamientos FD, OD1FD, M2FD, MD4FD) presentan una tendencia similar con los resultados encontrados en los experimentos preliminares (Capítulo 3). Sin embargo se aclara que la comparación entre los resultados preliminares y los finales no puede ser directa debido a que en los experimentos preliminares no se tuvo en cuenta la ineficiencia del microondas, contrario a los experimentos finales.

DESARROLLO DE MODELOS EMPIRICOS

Con base en los resultados obtenidos, a partir de los 10 procesos seleccionados se obtuvieron los siguientes modelos los cuales correlacionan las variables de pérdida de humedad, ganancia de sólidos, aceptación sensorial en términos de sabor, retención de vitamina C y consumo de energía.

En procesos combinados con deshidratación osmótica se observa que la aceptación sensorial en cuanto a sabor (%) está relacionada con la ganancia de sólidos (ΔMs) que se presenta durante el pretratamiento, de acuerdo con el siguiente modelo polinomial de segundo orden:

$$\text{Sensorial sabor} = 72,3529 - 1,84233 * Ms + 0,228877 * Ms^2$$

Donde:

Sensorial sabor: % de aceptación sensorial en términos de sabor

Ms: % de ganancia de sólidos

Para determinar las bondades del modelo se presentan el análisis de varianza del modelo en la Tabla 8.1:

Tabla 8.1. Análisis de varianza modelo sensorial-Ms

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	427,573	2	213,787	55,95	0,0012
Residual	15,2837	4	3,82094		
Total (Corr.)	442,857	6			

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre Sensorial sabor y Ms con un nivel de confianza del 95%, y $R^2:96\%$. Lo anterior permite afirmar que las frutas endulzadas son las más apetecidas por los consumidores.

Como se esperaba también se presentó una correlación entre las pérdidas de humedad (ΔMw) después de los pretratamientos de microondas y deshidratación osmótica, con los consumos de energía (E) de los procesos combinados con liofilización, tal como se presenta en el siguiente modelo de regresión lineal múltiple:

$$E = 35145,2 - 314,965 * Mw$$

Donde:

E: Consumo de energía (kJ/kg de producto obtenido)

Mw: % pérdidas de humedad

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA (Tabla 8.2) es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables de pérdidas de humedad y consumo de energía con un nivel de confianza del 95,0% y $R^2:85\%$.

Tabla 8.2. Análisis de varianza modelo Energía- Mw

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	2,3492E8	1	2,3492E8	22,82	0,0088
Residuo	4,11696E7	4	1,02924E7		
Total (Corr.)	2,76089E8	5			

Esto indica que la combinación de los pretratamientos de microondas y deshidratación osmótica tienen un efecto positivo en el ahorro de energía durante el proceso de liofilización.

Finalmente también se presentó una correlación (Tabla 8.3) entre contenido de vitamina C y pérdidas de humedad (ΔMw), para los procesos de deshidratación osmótica a nivel individual y los procesos combinados con microondas, especialmente los sometidos a 60 °Brix. Este comportamiento se da posiblemente debido a que la vitamina es hidrosoluble, como ya se ha mencionado anteriormente. La siguiente ecuación representa el modelo de regresión lineal múltiple:

$$V = 67,4718 - 0,637667 * Mw$$

Donde:

V: % de retención de vitamina

Mw: % pérdidas de humedad

Tabla 8.3. Análisis de varianza modelo Vitamina- Mw

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	1220,81	1	1220,81	24,50	0,0078
Residuo	199,302	4	49,8255		
Total (Corr.)	1420,11	5			

Esta correlación también es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95,0% y R^2 :86%.

ALTERNATIVAS DE PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN

Las tendencias de consumo están cada vez más ligadas hacia alimentos saludables, convenientes e innovadores. Es decir que sean naturales, inocuos, si son orgánicos mejor, de larga vida útil, con optima relación precio-calidad, en porciones individuales y listos para consumir (Sloan, 2007; Proexport, 2010).

El incremento de la demanda de los productos frutícolas con un mayor valor agregado y el desarrollo de tecnologías de procesamiento de alimentos han contribuido a expandir y diversificar el mercado de las frutas permitiendo introducir nuevos productos al mercado.

En la Tabla 8.4 se presenta las condiciones de los procesos, así como los resultados obtenidos en cuanto a aceptación sensorial, retención de vitamina C y consumo de energía.

Tabla 8.4 Evaluación de calidad y consumo de energía para los pretratamientos seleccionados

Tratamiento	Concentración (°Brix)	Tiempo Osmótico (minutos)	Potencia (kW/Kg)	% Aceptación sensorial			% retención Vitamina C*	% Consumo de Energía**
				color	sabor	textura		
Fruta fresca (FD)	x	x	x	35	72	67	72	
OD1	60	90	x	77	90	57	54	59
OD2	40	30	x	63	70	60	63	71
M1	x	x	40	63	63	37	75	77
M2	x	x	8	70	77	67	81	103
MD1	60	150	20	83	77	47	33	42
MD2	60	90	40	90	69	47	37	50
MD3	40	30	8	73	67	73	51	76
MD4	60	90	8	83	83	43	32	55
MD5	40	30	40	60	70	57	54	67

*Con respecto a fruta fresca . ** Con respecto a FD

Como se observa en la Tabla 8.4 es difícil plantear una sola alternativa de procesamiento para obtener fruta deshidratada puesto que no hay un proceso combinado que me permita mayor retención de vitamina C, al mismo tiempo con mayor aceptación a nivel sensorial y a la vez menores consumos de energía durante el proceso. Por tanto a partir de esta tabla se plantean diferentes opciones para el procesamiento de fruta deshidratada. Esto con el fin de suplir los requerimientos tanto de consumidores como de productores.

Alternativas enfocadas hacia el consumidor

Consumidores con un nivel económico, cultural y de vida relativamente elevado que adquiere un producto por sus valores organolépticos, nutricionales y de salubridad son en definitiva el mercado objetivo para los productos deshidratados (Prochile, 2010).

Pensando en el desarrollo de un producto para consumo directo como por ejemplo un snacks de fruta deshidratada que sea apetecible para el consumidor, se plantea como opción deshidratar, en nuestro caso piña, con tratamientos de deshidratación osmótica OD1 (a 60 °Brix, durante 90 minutos), previos al proceso de liofilización. Con éste proceso combinado se obtiene un producto con buen nivel de sabor y color. También con niveles aceptables de retención en vitamina (54 %) y percepción en textura (57%). Estos niveles no son tan bajos teniendo en cuenta que los porcentajes máximos son del orden del 81% y 73%, respectivamente. Además aunque no es importante para el consumidor se obtiene un ahorro del 41% en el consumo de energía.

No se sugiere el proceso MD2, pues aunque permite un nivel alto de aceptación en cuanto a color (90%), presenta niveles aceptables en sabor (69%), bajos niveles de aceptación en textura, con retención de vitamina tan solo del 37%.

Con el fin de tener un producto con mejor textura (73%) se sugiere someter trozos de piña a pretratamientos MD3 con microondas (8 kW/kg) seguido de deshidratación osmótica (40 °Brix, 30 min). Este proceso permitirá un nivel alto en la percepción del

color, un nivel aceptable que no es tan bajo en el sabor (67%) y un nivel aceptable en la retención de vitamina (51%). Teniendo en cuenta que durante el proceso se consume el 76,4% de la energía de FD.

El pretratamiento de microondas M2 (8 kW/kg) se sugiere puesto que retiene hasta un 81% de la vitamina C, potencializa el color y el sabor en la fruta (con respecto a FD), y permite un buen nivel de aceptación en la textura. Sin embargo se aclara que no tiene impacto en la disminución del consumo de energía, aún así se recomienda el proceso M2FD puesto que es una alternativa enfocada hacia el consumidor. También se debe tener en cuenta que al aumentar la potencia en M (a 40 kW/kg) se disminuye la calidad en la fruta especialmente en términos de sabor, color y textura.

En la Figura 8.1 se presenta un diagrama que resume las alternativas para el procesamiento de piña deshidratada con el fin de suplir las exigencias del consumidor.

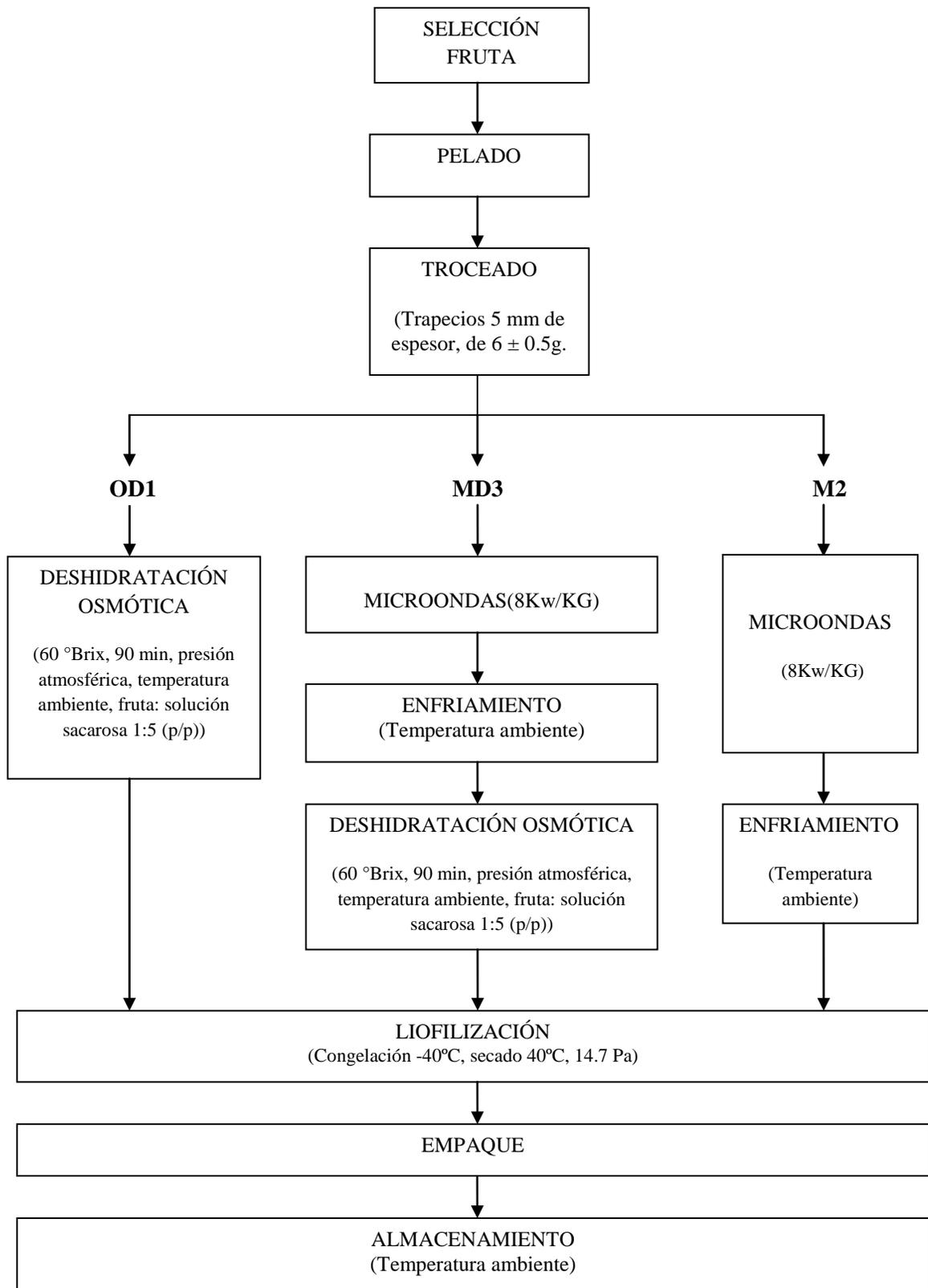


Figura 8.1. Diagrama de las alternativas de procesos enfocadas hacia el consumidor

Alternativas para el sector industrial

Un sistema óptimo de secado para la conservación de frutas, es aquel que permite mayor rentabilidad mediante un bajo consumo de energía y menores tiempos de proceso, así como mejor calidad de producto terminado (Sagar & Kumar, 2010).

A nivel industrial los alimentos deshidratados sirven de base para el desarrollo y formulación de nuevos productos, debido a su fácil incorporación en productos lácteos (leches, postres, yogurt, helados), galletas, pasteles y en platos preparados. Esto hace que la calidad en términos sensoriales y nutricionales, si bien es importante, no es una prioridad para productores, como si la disminución en el consumo de energía durante el proceso. Bajo esta perspectiva se plantean las siguientes alternativas:

Al combinar pretratamientos de microondas (20 kW/kg) y deshidratación osmótica (a 60 °Brix, durante 150 minutos) MD1, se obtiene un ahorro en el consumo de energía hasta del 58% con respecto a FD, obteniendo a la vez buenos niveles de aceptación en términos de sabor (77%) y color (83%), aunque bajos niveles en textura y retención de vitamina.

Igualmente la combinación MD2FD (M: 40 kW/kg; OD: 60 °Brix, 90 minutos) es otra opción a nivel industrial para obtener fruta deshidratada como materia prima. Este proceso combinado permite consumos de energía del 50%, así mismo productos con buenos niveles en la aceptación del color, pero bajos niveles en textura y retención de vitamina.

Una última alternativa es aplicar el proceso MD4FD (M: 8 kW/kg; OD: 60 °Brix, 90 minutos), con el cual se obtiene un ahorro en el consumo de energía del 44,6%, presentando buenos niveles en la calidad relacionados con sabor y color (83%), aunque bajos niveles en textura y retención de vitamina. En la Figura 8.2 se presenta un diagrama que resume las alternativas para el procesamiento de piña deshidratada con el fin de suplir las exigencias del productor.

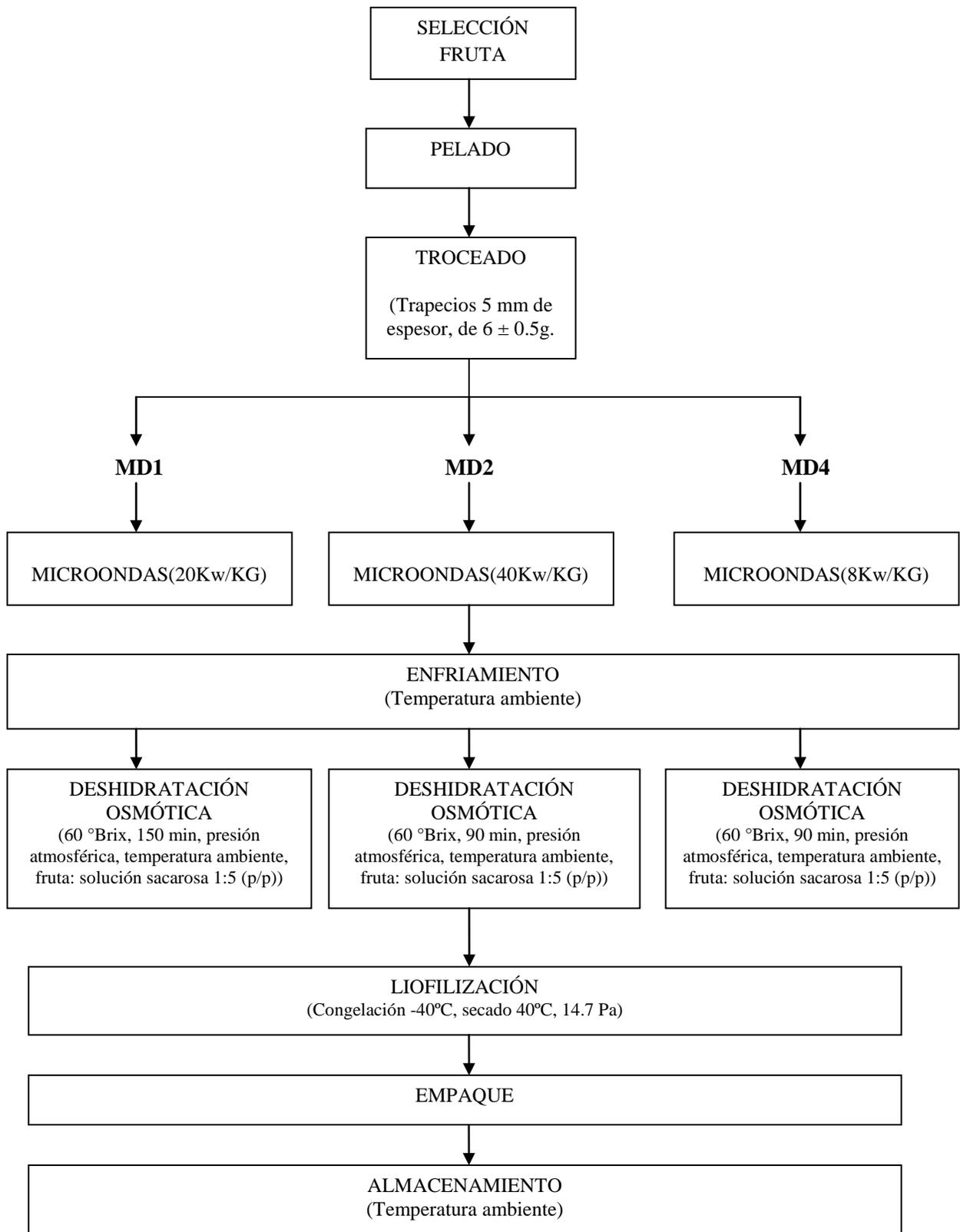


Figura 8.2. Diagrama de las alternativas de procesos enfocadas hacia el productor

En conclusión la combinación de tecnologías con tratamientos de microondas y deshidratación osmótica a nivel individual o combinados, aplicados previamente a procesos de liofilización pueden ser una alternativa para el procesamiento de frutas deshidratadas.

REFERENCIAS

- Prochile (2010). Dirección de promoción de Exportaciones. Estudios de mercado –fruta deshidratada. <http://rc.prochile.gob.cl/>. (último acceso: 20 de febrero de 2012)
- Proexport (2010). Oportunidades en Tiempos de Diversificación e Innovación. AGROINDUSTRIA. http://www.proexport.com.co/seminarios/descargas/agro_europa.pdf. (último acceso: 20 de febrero de 2012)
- Sagar V. R. and Suresh Kumar P (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *Journal Food Science Technology* 47: 15-26.
- Sloan E(2007). Top 10 Food Trends. *Food Technology Magazine*. Volume 61, No.4 . <http://www.ift.org/food-technology/past-issues/2007/april.aspx>. (último acceso: 20 de febrero de 2012)

9 CONCLUSIONES

En procesos combinados de calentamiento por microondas y deshidratación osmótica se presenta mayor efecto en el aumento de los cambios de color y la firmeza de trozos de piña liofilizada.

Los procesos combinados de microondas y liofilización permiten mayor retención de vitamina C en comparación con los tratamientos sometidos a deshidratación osmótica.

El consumidor tiene mayor aceptación en términos de sabor y color de la fruta sometida a los procesos combinados, contrario a lo percibido con los cambios de textura en donde el consumidor prefiere productos menos duros.

La combinación de microondas y deshidratación osmótica permiten disminuir el consumo de energía (especialmente los tratamientos sometidos a 20 kW/kg, 60 °Brix-150 minutos) hasta en un 58% (en términos de kJ/kg de producto) con respecto a los procesos de liofilización, a excepción de los pretratamientos con microondas a nivel individual sometidos a 8 kW/kg.

El sabor se relaciona con la ganancia de sólidos que se presenta durante el proceso osmótico mediante una regresión polinomial (R^2 del 96 %), lo cual indica que el consumidor prefiere las frutas endulzadas convirtiendo a la deshidratación osmótica en una alternativa viable de pretratamiento durante el proceso de liofilización.

El consumo de energía se relaciona con las pérdidas de humedad durante los pretratamientos combinados de microondas y deshidratación osmótica, mediante una regresión lineal, lo cual indica que la combinación de estos dos pretratamientos son una alternativa viable para desarrollar procesos de liofilización más rentables en términos de consumo energético a nivel industrial.

Los resultados de este proyecto muestran que utilizando pretratamientos como deshidratación osmótica y microondas se puede obtener a una amplia gama de productos que permiten atender los requerimientos de mercados muy diferentes.

10 RECOMENDACIONES

A continuación se describen algunas sugerencias para futuras investigaciones:

Los procesos combinados de deshidratación, son una opción para el procesamiento de fruta a nivel industrial, puesto que permiten menor consumo energético y mejor calidad en los productos finales, en términos fisicoquímicos, nutricionales y organolépticos. Por tanto sería interesante realizar más investigaciones donde se combine las tecnologías de calentamiento por microondas, deshidratación osmótica y liofilización en frutas de interés mundial, cultivadas en Colombia tales como, mango, banano, kiwi y fresa entre otras, con el fin de también dar valor agregado a este tipo de tejidos. Igualmente analizando en estas frutas propiedades nutricionales, organolépticas, fisicoquímicas, así como consumos energéticos durante el proceso.

Aplicar pretratamientos de microondas combinados con deshidratación osmótica a 50 °Brix con el fin de mejorar la calidad en términos de textura. Con base en los resultados obtenidos en el presente proyecto este pretratamiento podría posiblemente además retener contenido de vitamina C por encima del 55% y un ahorro en el consumo de energía alrededor del 40 %, convirtiéndose en otra opción para la producción de fruta deshidratada.

Analizar modelos fenomenológicos que describan la transferencia de masa en procesos osmóticos especialmente después de someter el tejido a procesos de calentamiento con microondas. Uno de estos modelos podría ser el modelo de Crank para representar el mecanismo difusional, el cual consiste en una solución de la Ley de Fick en estado estacionario.

Analizar modelos que permitan describir el transporte intercelular con el fin de investigar permeabilidad en membranas, difusividad de la pared celular en relación

con la porosidad y comportamiento de encogimiento del tejido a nivel microestructural.

Analizar el fenómeno de transición vítrea y la capacidad de rehidratación en muestras liofilizadas sometidas a pretratamientos de microondas y deshidratación osmótica.

Finalmente es importante analizar la viabilidad de escalamiento industrial de las tecnologías evaluadas y hacer un estudio de mercado en Colombia de fruta deshidratada con el fin de evaluar las oportunidades de desarrollar nuevos productos a nivel nacional y suplir las demandas a nivel internacional.

11 ANEXOS

ANEXO 1. Certificado de presentación Poster en CIBIA VIII 2011



Confieren el presente CERTIFICADO a:

José Mauricio Pardo, Dolly Andrea Leiva, Edwin Miguel Roa

Por haber participado con la Presentación como poster del
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

***EFECTOS DE PRETRATAMIENTOS DE DESHIDRATACIÓN SOBRE EL
CONSUMO DE ENERGÍA Y TRANSFERENCIA DE MASA EN TEJIDO DE
PIÑA LIOFILIZADO***

en el VIII CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS
realizado en la Ciudad de Lima, del 23 al 26 de octubre del 2011.

Lima, octubre del 2011

Carmen Velezmore Sánchez
CIBIA 8
Presidente

Fernando Vargas Delgado
Comisión Científica CIBIA 8
Presidente



ANEXO 2. Artículo presentado en el libro de artículos y memorias CIBIA VIII 2011

EFFECTOS DE PRETRATAMIENTOS DE DESHIDRATACIÓN SOBRE EL CONSUMO DE ENERGÍA Y TRANSFERENCIA DE MASA EN TEJIDO DE PIÑA LIOFILIZADO.

Dolly Andrea Leiva ^a, José Mauricio Pardo ^{a*} Edwin Miguel Roa ^c

^a Grupo de investigación Procesos Agroindustriales. Facultad de Ingeniería. Universidad de la Sabana. Campus Universitario Puente del Común, Km. 7 Autopista Norte, Chía, Colombia.

^c Estudiante Ingeniería de producción Agroindustrial. Facultad de Ingeniería. Universidad de La Sabana.

RESUMEN

Procesos de deshidratación osmótica, microondas y liofilización fueron aplicados para obtener piña deshidratada. Se evaluó la cinética de deshidratación del tejido, sometido a procesos combinados de deshidratación osmótica (con sacarosa, 60°Brix, durante 30, 90 y 150 minutos) y microondas (a 8, 20 y 40 KW/Kg), en términos de pérdida de humedad y ganancia de sólidos. Igualmente se evaluó el consumo energético de los procesos combinados (a 20 kW/Kg y 60°Brix). En general se observó mayor transferencia de agua en pretratamientos combinados con microondas y deshidratación osmótica aplicando 40 kW/Kg, y mayor ganancia de sólidos con 8 kW/Kg ambos con inmersión a 60°Brix durante 90 minutos. Finalmente se obtuvo al combinar las tres tecnologías una reducción del consumo de energía hasta del 61,3% (medido en términos de kJ / kg de producto obtenido).

SUMMARY

Osmotic dehydration, microwave and freeze drying processes were applied to obtain dried pineapple. The kinetics of dehydration of the tissue subjected to combined processes of osmotic dehydration (sucrose, 60 ° Brix, for 30, 90 and 150 minutes) and microwave (8, 20 and 40 KW / Kg) were evaluated in terms of loss moisture and solid gain. In addition, the energy consumption of the combined processes (20 kW / kg and 60 ° Brix) was evaluated. In general, it was observed a higher transfer of water in combined with microwave pretreatment and osmotic dehydration using 40 kW / kg and higher solid gain with 8 kW / kg both dipping 60 ° Brix for 90 minutes. Finally, a reduction in energy consumption up from 61.3% (measured in terms of kJ / kg product produced) was obtained by combining the three technologies.

Palabras claves: Deshidratación Osmótica, microondas, liofilización.

INTRODUCCIÓN

La piña (*Ananas comosus L.*) es una fruta tropical, nativa de América del Sur, reconocida por su sabor, propiedades nutricionales y variedades encontradas en el mercado (Saxena *et al.*, 2009). La deshidratación es uno de los métodos de conservación de alimentos (Zhang *et al.*, 2010) que alarga la vida útil de las frutas (Bórquez *et al.*, 2010).

La liofilización (FD) es un proceso por sublimación, que permite obtener alimentos deshidratados de calidad, aunque con largos tiempos de proceso y alto consumo de energía. (Wang *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2009). Por tanto se han combinado otras tecnologías de secado con FD que han demostrado un efecto

favorable sobre la transferencia de masa y las propiedades fisicoquímicas de los productos (Andrés *et al.*, 2007; Pardo M. & Leiva A., 2009); además de los beneficios de las tecnologías individuales, como el uso de microondas (MW), que permite mediante la aplicación de ondas electromagnéticas menores tiempos de secado y eficiencia energética, aunque desarrollando en algunos casos, sabores desagradables, pérdida de nutrientes y cambios en la estructura por sobrecalentamiento en el tejido (Zhang *et al.*, 2006).

La deshidratación osmótica (OD) es otra alternativa como pretratamiento. Es un proceso no térmico que consiste en la inmersión de un producto en solución hipertónica (Azarpazhooh *et al.*, 2010), que ocasiona

en el tejido difusión simultánea de agua y solutos (Ruiz *et al.*, 2011), permitiendo retener propiedades fisicoquímicas, nutrientes, propiedades sensoriales y compuestos volátiles (Fahloul *et al.*, 2009), sin embargo es un proceso de deshidratación parcial, lo cual hace que deba ser combinado con otras tecnologías para mejorar la estabilidad del producto (Marques *et al.*, 2006).

Por tanto este proyecto se centra en disminuir el consumo de energía durante FD en piña, mediante la aplicación de tratamientos previos como OD, MW y la combinación MWOD, analizando a la vez la cinética de deshidratación de estos pretratamientos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Piña (*Ananás comosus*) V. Golden con grado de maduración 3, fue pelada y cortada en trapecios (10 x 30 mm, de lados paralelos y 5 mm de espesor).

Cinética de deshidratación

Las muestras de piña fueron sometidas a OD con sacarosa a 40 y 60 °Brix, durante 30, 90 y 150 minutos, a 20°C, manteniendo una proporción producto/solución de 1:5 p/p. Igualmente el proceso MW fue aplicado a 40, 20 y 8 KW/Kg durante 1, 2 y 5 minutos respectivamente, garantizando un mismo nivel de energía entregada (27 KJ).

Finalmente se combinaron los dos procesos, MW seguido de OD bajo las mismas condiciones descritas anteriormente.

Las muestras deshidratadas mediante OD y MWOD, fueron analizadas en términos de pérdidas de humedad (ΔM_w) y ganancia de sólidos (ΔM_s), teniendo en cuenta las ecuaciones 1 y 2, respectivamente; éstas variables respuesta fueron analizadas mediante ANOVA ($p < 0,05$). El contenido de humedad y los sólidos solubles se determinaron por triplicado en muestras frescas y procesadas (AOAC, 2000).

$$\Delta M_w = \frac{M_0 X_{w0} - M_t X_{wt}}{M_0} \quad (1)$$

$$\Delta M_s = \frac{M_t X_{st} - M_0 X_{so}}{M_0} \quad (2)$$

Donde cada variable representa:

M_0 peso inicial (g)

M_t peso en el tiempo t (g)

X_{w0} fracción de masa inicial de agua (g/g)

X_{so} fracción de masa inicial de solutos solubles (g/g)

X_{wt} fracción de masa de agua en el tiempo t (g/g)

X_{st} fracción de masa de solutos solubles en el tiempo t (g/g).

Consumo de Energía

El consumo de energía fue evaluado para piña sometida a FD y procesos combinados ODFD, MWFD y MWODFD, teniendo en cuenta las condiciones de la tabla 1.

Tabla 1. Condiciones de proceso para la evaluación de consumo de energía.

Proceso	Condiciones
OD	Sacarosa r/1:5 p/p (producto/solución), 20°C, 60°Brix.
MW	Equipo HACEB HM1.1. 20 KW/Kg.
FD	Liofilizador Labconco a 0,15 mbar y 40 °C. Temperatura de congelación -40°C.

En la tabla 2 se resumen los tiempos aplicados para los procesos combinados.

Tabla 2. Tiempos procesos combinados

Procesos	Condiciones
ODFD	OD 75 min y FD 24 h
MWFD	MW 1 min y FD 24 h
MWODFD	MW 1min, OD 74 min y FD 24h

Para calcular la energía consumida se identificaron etapas de consumo especialmente en FD (enfriamiento, congelación, subenfriamiento, sublimación, condensación, calentamiento, evaporación y bomba de vacío), como también el consumo de MW, evaluando la buena energía (GE) (Huang *et al.*, 2009) que define el consumo sin la ineficiencia de los equipos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las muestras de piña fueron evaluadas en cuanto a humedad y sólidos solubles, previamente a los tratamientos OD, MW y MWOD, obteniendo valores de $86.14\% \pm 1.73$ (b.h) y 13.4 ± 0.17 respectivamente.

Cinética de deshidratación

La figura 1 presenta ΔM_w y ΔM_s de los tratamientos OD. Como se observa altas concentraciones en la solución (60°Brix) presenta mayores niveles de deshidratación, aumentando el valor al incrementar el tiempo de proceso. Los valores ΔM_w para 40°Brix y 60°Brix alcanzan niveles hasta del 12% y 19%, respectivamente, sin presentarse diferencias significativas entre 90 y 150 minutos. En ΔM_s se observa la misma tendencia obteniéndose valores hasta del 15% en procesos a 60°Brix durante 150 minutos.

Rastogi *et al.*, (2004) y Saputra (2001) analizaron la transferencia de masa en piña durante OD, encontrando un efecto significativo en la cinética de deshidratación debido al aumento en la concentración de la solución. Azarpazhooh *et al.*, (2010) encontró en manzanas que la transferencia de masa se hace más difícil durante las últimas etapas, debido a la acumulación de sacarosa en la superficie de la fruta, presentando menor diferencia de potencial osmótico. Tortoe C. (2010) relaciona que bajas concentraciones presentan menor presión osmótica ejercida sobre el tejido.

La combinación de tecnologías se presenta como una posibilidad de optimizar los procesos de deshidratación (Azarpazhooh *et al.*, 2010). Solamente aplicando MW se incrementa ΔM_w con los niveles de potencia presentando valores de 30, 49 y 62% a 8, 20 y 40 KW/Kg respectivamente.

La figura 2 muestra ΔM_w y ΔM_s del proceso combinado MWOD, en un rango del 30 al 58% y niveles de ΔM_s de 2 a 14%. Para cada nivel de energía se observa mayor ΔM_w a 60°Brix, especialmente a 40 kW/Kg, sin presentarse diferencias significativas con respecto a los tiempos entre 90 y 150 minutos durante OD. Contrario a lo ocurrido en 8 y 20 kW/Kg.

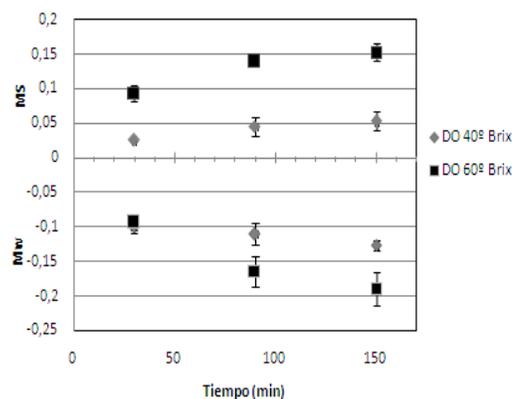


Figura 1. Pérdidas de humedad y ganancia de sólidos en muestras de piña sometidas a OD

En la figura 2 también se presenta mayor ΔM_s en muestras sometidas a 60°Brix, especialmente a 8 kW/Kg; a 40 kW/Kg las muestras pudieron presentar colapso estructural (Contreras *et al.*, 2008), disminuyendo así la transferencia de masa durante OD.

Los resultados muestran un incremento al aumentar el tiempo de inmersión en OD, presentado diferencias significativas a 20 y 8 kW/Kg en procesos a 40 °Brix

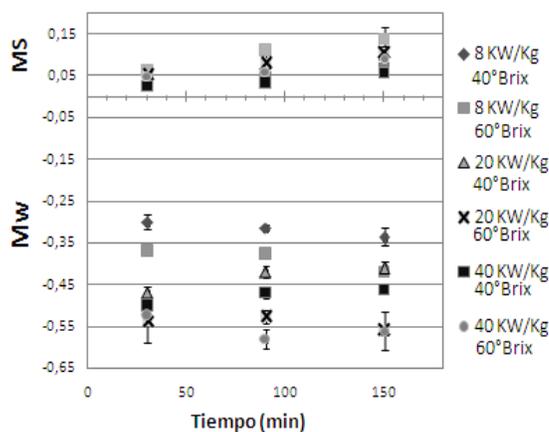


Figura 2. Pérdidas de humedad y Ganancia de Sólidos en muestras de piña sometidas a MWOD

Mitra *et al.*, (2009) aplicaron MW para deshidratar bayas obteniendo que la potencia de microondas y el tiempo de secado afectan significativamente el contenido de humedad. Igualmente Bórquez *et al.*, (2010) encontró en frambuesas que el secado es deficiente a nivel de baja potencia. Andrés *et al.*, (2007) combinaron OD con MW en mango obteniendo que al aumentar la potencia se afecta

significativamente la cinética de deshidratación. Pereira *et al.*, (2007), encontraron en banano que al aumentar la potencia de microondas incrementa la tasa de secado y consecuentemente disminuye el tiempo de proceso.

Consumo de Energía

En la figura 3 se observa que más del 90% de GE se consume en las etapas que involucran cambio de fase durante FD, especialmente en E2 (congelación), E4 (sublimación), E5 (condensación), y durante el proceso de microondas E10.

Igualmente se encontró que al involucrar OD, el ahorro de energía tiende a ser alrededor del 20% (21,1% para ODFD y 18,6% para MWODFD), debido a que OD no requiere de un cambio de fase y además es un proceso donde se presenta transferencia de masa entre el tejido y la solución incrementando el contenido de sólidos en la estructura aumentando el rendimiento del proceso (Dhingra *et al.*, 2008). También se observa en la tabla 3 que la combinación MWFD no es recomendable para el procesamiento de fruta deshidratada, puesto que no es amigable con el medio ambiente.

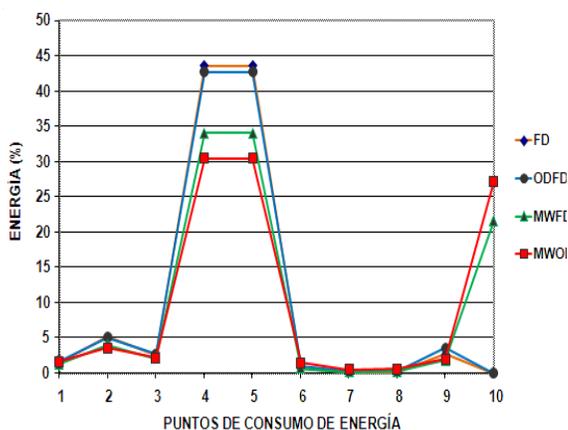


Figura 3. Consumo de energía (%) en tecnologías combinadas de deshidratación.

Finalmente se observa que los tratamientos ODFD y MWODFD utilizan el 56,2 y 38,7% de la GE consumida por FD.

Lenart (1996) describe que una de las ventajas de OD es la reducción del consumo de energía del 20-30%, permitiendo menores tiempos de proceso. Padua (1993) observó que la solución osmótica altamente concentrada de sacarosa absorbe más eficientemente

la energía de MW mostrando un calentamiento en la superficie sin presentarse un incremento significativo de la temperatura en el interior del producto, en comparación con los procesos sin sacarosa los cuales absorben menos energía.

Tabla 3. Consumos de energía en cada etapa para procesos combinados de deshidratación

Puntos Consumo de Energía	FD	ODFD	MWFD	MWODFD
	(kJ/kg agua removida)			
Calor sensible durante el enfriamiento (E1)	98,9	86,4	84,7	84,2
calor latente de congelación (E2)	333,6	257,5	264,4	188,8
Calor sensible durante el subenfriamiento (E3)	165,9	138,0	134,7	116,0
Calor de sublimación (E4)	2818,5	2175,4	2233,6	1594,6
Calor latente de condensación (E5)	2818,5	2175,4	2233,6	1594,6
Calor sensible durante el calentamiento (E6)	37,8	52,9	43,6	80,4
Calor latente de vaporización del agua no congelada (E7)	9,2	12,3	11,8	23,5
Calor latente de condensación del agua evaporada (E8)	11,5	15,5	14,9	29,6
Consumo de la bomba de vacío (E9)	173,2	188,1	123,2	109,8
consumo de microondas (E10)	0,0	0,0	1431,4	1439,4
Energía Total	6467,1	5101,4	6575,9	5261,0
	(kJ/kg Producto obtenido)			
Energía Total	33721,0	18961,5	34258,8	13047,6

Adicionalmente algunos investigadores han encontrado que tecnologías como MW son eficientes en términos de energía y tiempo (Huang *et al* 2009). Gunasekaran (1999) reporta que la aplicación de pulsos en microondas a 100% de potencia con cortos tiempos, puede ser más eficiente en términos de consumo de energía que en forma continua, mejorando la calidad del producto. Wang Z. *et al* (2009) deshidrataron jujuba (fruta de origen chino) encontrando que el consumo de energía disminuye cuando la potencia de microondas incrementa. Finalmente Li Z. *et al* (2010) aplicaron MW en manzana y obtuvieron que al controlar la potencia se presentan menos fluctuaciones en la temperatura interna del tejido y menor consumo de energía.

CONCLUSIONES

La aplicación de microondas previo a procesos osmóticos permite pérdidas de humedad hasta del 58%, por efectos de altos niveles en la concentración de la solución y la potencia aplicada. Por el contrario bajos niveles de potencia permiten mayor ganancia de sólidos.

Los pretratamientos combinados de microondas y deshidratación osmótica pueden ser una opción para reducir los costos a nivel industrial en procesos de liofilización, ya que permiten una reducción del consumo de energía hasta del 61,3% (medido en kJ / kg de producto obtenido).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrés A, Fito P, Heredia A & Rosa EM (2007). Combined drying technologies for development of high-quality shelf-stable mango products. *Drying Technology*, 25: 1857-1866.
- AOAC official methods of analysis of AOAC International. (2000) Copyright _ (17th ed.). AOAC International. Numbers. 934.06; 932.12.
- Azarpazhooh E. and Ramaswamy H. S. (2010). Microwave-Osmotic dehydration of apples under continuous flow medium spray conditions: comparison with other methods. *Drying Technology*, 28: 49-56.
- Bórquez, R.M., Canales E.R. y Redon. J.P. (2010). Osmotic dehydration of raspberries with vacuum pretreatment followed by microwave-vacuum drying. *Journal of food Engineering*, 99: 121-127
- Contreras C., Martín-Esparza M. E., Chiralt A. and Martínez- Navarrete N. (2008). Influence of microwave application on convective drying: Effects on drying kinetics and optical and mechanical properties of apple and strawberry. *Journal of Food Engineering*, 88: 55-64.
- Dhingra D, Singh J, Patil RT y Uppal DS (2008). Osmotic dehydration of fruits and vegetables: A review. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 45: 209-217.
- Fahloul D., Lahbari M., Benmoussa H. and Mezdour S (2009). Effect of osmotic dehydration on the freeze drying kinetics of apricots. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7: 117-121.
- Gunasekaran, S. (1999). Pulsed microwave-vacuum drying of food materials. *Drying Technol*, 17, 395-412
- Huang L., Zhang M., Mujumdar A. and Sun D. (2009). Studies on Decreasing Energy Consumption for a Freeze-Drying Process of Apple Slices. *Drying Technology*, 27: 938-946.
- Lenart A (1996): Osmo-convective drying of fruits and vegetables: Technology and application. *Drying Technology*, 14: 391-413.
- Li Z., Raghavan G.S.V, Orsat Valérie (2010). Optimal power control strategies in microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 99: 263-268
- Marques L., Silveira A., y Freire J. (2006). Freeze drying characteristics of tropical fruits. *Drying Technology*, 24: 457-463.
- Mitra P. and Meda V (2009). Optimization of Microwave-Vacuum Drying Parameters of Saskatoon Berries Using Response Surface Methodology. *Drying Technology: An International Journal*, 27: 1089 - 1096.
- Padua, G. W.. Microwave heating of agar gels containing sucrose (1993). *Journal of Food Science*, 58:1426-1428.
- Pardo M & Leiva A (2009) Combination of technologies for the dehydration of pineapple. *Ingeniería y Competitividad*, 11: 57 -65.
- Pereira N, Marsaioli A. y Ahrné L. (2007). Effect of microwave power, air velocity and temperature on the final drying of osmotically dehydrated bananas. *Journal of Food Engineering*, 81: 79-87
- Rastogi N.K, Raghavarao K.S.M.S. (2004). Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration. *Lebensm.-Wiss. U.-Technology*, 37: 43-4
- Ruiz I.I., Ruiz H., Herman E., Zárate G. (2011). Modeling of kinetics, equilibrium and distribution data of osmotically dehydrated carambola (*Averrhoa carambola* L.) in sugar solutions. *Journal of Food Engineering*, 104: 218-226.
- Saputra., D. (2001). Osmotic dehydration of pineapple. *Drying Technology*, 19: 415-425.
- Saxena, S.; B. Mishra; R. Chander y A. Sharma. (2009). Shelf Stable Intermediate Moisture Pineapple (*Ananas comosus*) Slices Using Hurdle Technology. *Food Science and Technology*. 42: 1681-1687.
- Tortoe, C. (2010). A review of osmodehydration for food industry. *African Journal of Food Science*, 4: 303 - 324.
- Wang Z., Fang S. and Hu X. (2009). Effective Diffusivities and Energy Consumption of Whole Fruit Chinese Jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) in Microwave Drying. *Drying Technology: An International Journal*, 27: 1097 - 1104.
- Zhang, M.; J. Tang.; A.S. Mujumdar y S. Wang. (2006). Trends in microwave related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science and Technology*, 17: 524-534.
- Zhang M., Jiang H. y Rui-Xin L. (2010). Recent Developments in Microwave-Assisted Drying of Vegetables, Fruits and Aquatic Products- Drying kinetics and Quality Considerations. *Drying Technology*. 28: 1307-1316.

ANEXO 3. Artículo publicado en memorias VII Seminario Internacional de Frutas Tropicales. Agroindustria e Innovación.

EFFECTOS DE DIFERENTES PRETRATAMIENTOS EN EL CONSUMO DE ENERGÍA DURANTE LA LIOFILIZACIÓN DE PIÑA

Andrea Leiva-D *, Mauricio Pardo- J*

** Procesos Agroindustriales Grupo de Investigación. Facultad de Ingeniería. Universidad de La Sabana, Colombia.*

Resumen

Procesos de deshidratación osmótica, microondas y liofilización fueron combinados para obtener piña deshidratada. Se analizó el consumo de energía de los procesos de deshidratación osmótica-liofilización, microondas-liofilización, combinación de microondas - deshidratación osmótica-liofilización y liofilización sin pretratamiento. Se observó en general que los procesos osmóticos reducen el consumo de energía durante todo el proceso de deshidratación hasta en un 61,3%, expresado en kJ / kg de producto obtenido.

Palabras claves: Deshidratación Osmótica, microondas, liofilización.

Introducción

Los procesos de secado son utilizados en la industria de alimentos para proveer al mercado productos de mayor vida útil y reducir pérdidas en postcosecha. Diversos estudios se han desarrollado en el mundo para reducir los costos en el proceso de alimentos deshidratados. La liofilización (FD) es un proceso de secado por sublimación, que permite obtener alimentos deshidratados de gran calidad y buena capacidad de rehidratación, sin embargo una de las desventajas son los tiempos de proceso y alto consumo de energía, reflejados en los costos de operación. (Huang et al. 2009).

Por tanto se han realizado diversas investigaciones combinando procesos de liofilización con otras tecnologías de secado. Algunos se han enfocado en analizar varios tratamientos para reducir el consumo de energía durante FD (Huang et al. 2009, Xu et al. 2006, Reyes et al. 2008), otros han intentado reducir el tiempo de proceso y mejorar la transferencia de calor; y por último se ha investigado tecnologías de deshidratación combinadas como deshidratación osmótica y microondas, secado al vacío y microondas, aire caliente y microondas, aire caliente y deshidratación osmótica, etc., que han demostrado un efecto favorable sobre la transferencia de masa durante el proceso y las propiedades fisicoquímicas de los productos (Andrés et al. 2007, Zhang et al. 2006, Pardo M. & Leiva A. 2009, Orsat et al, 2007), además de los beneficios al aplicar las tecnologías individualmente, como por ejemplo el uso de microondas (MW), que permite mediante la aplicación de ondas electromagnéticas menores tiempos de secado, eficiencia energética y mejor calidad de los productos, aunque entre las limitaciones están altos costos de puesta en marcha (Schubert y M. 2006), la no uniformidad del campo electromagnético que puede producir un sobrecalentamiento en el alimento desarrollando sabores desagradables y cambios de estructura, adicionalmente, la rápida evaporación causada que podría producir daños en las células de la pared induciendo la contracción de la muestra y la pérdida de nutrientes (Zhang et al. , 2006).

Otra tecnología muy reconocida es la deshidratación osmótica (OD), que básicamente consiste en la inmersión de muestras de producto en una solución altamente concentrada, El potencial químico que existe entre la solución y la muestra de alimentos conduce a la transferencia de flujos en el que el agua fluye fuera de la muestra y solutos entrar en el tejido. Procesos como ultrasonido, alta presión, pulsos eléctricos, microondas, escaldado y congelación han sido investigados previamente a fin de mejorar los coeficientes de difusión durante OD (Deng y Zhao 2008, Taiwo et al. 2003, Rastogi et al. 2002, Dhingra et al. 2008, Pardo y Leiva 2009). El proceso OD ha sido utilizado como tratamiento previo de secado, ya que puede reducir el contenido inicial de humedad hasta en un 30% (Rastogi et al. 2002, Beaudry et al. 2004b), además de reducir los costos de energía y mejorar la calidad de los productos finales (Andrés et al. 2007, Ortega-Rivas 2007, Lombard et al. 2008).

La selección de la tecnología o la combinación de tecnologías influye en los tiempos de proceso y por ende en los costos de operación, por lo tanto este proyecto se centra en disminuir el consumo de energía durante el proceso de liofilización de muestras de piña, mediante la aplicación de tratamientos previos como deshidratación osmótica, microondas y la combinación de estas dos tecnologías.

Materiales y Métodos

Piña variedad Golden fue pelada y cortada en trozos en forma de trapecios (10 mm x 30 mm, de lados paralelos y 5 mm de espesor) y sometida a diferentes tratamientos como liofilización (FD), deshidratación osmótica-liofilización (ODFD), microondas-liofilización (MWFD) y la combinación de microondas - deshidratación osmótica-liofilización (MWODFD).

El proceso de deshidratación osmótica se desarrollo en soluciones concentradas de sacarosa (60 ° Brix, relación de 1:5 solución de producto w / w, 20 ° C), sin agitación a presión atmosférica durante 75 minutos. Al terminar los procesos, el exceso de la solución fue retirada con paños absorbentes.

El proceso de microondas se llevó a cabo con muestras de 50 g de piña utilizando un horno microondas (HACEB HM1.1), suministrando una potencia de 20 kW / kg, durante 1 minuto.

Para los procesos previos combinados de deshidratación osmótica y microondas (MWOD), se tuvo en cuenta las condiciones anteriores con un tiempo de proceso de 74 minutos y 1 minuto, respectivamente.

La liofilización se llevó a cabo en un liofilizador Labconco a una presión de 0,15 mbar, durante 24 horas de tratamiento a una temperatura de 40 ° C.

Todos los tratamientos se realizaron por triplicado. Para calcular la energía consumida durante los tratamientos de secado se identificaron puntos de consumo en el proceso FD (es decir, durante el enfriamiento, congelación, subenfriamiento, sublimación, condensación, calentamiento, evaporación y energía de la bomba de vacío), como también durante el proceso MW, como se describe en la tabla I. Es importante mencionar que el consumo de energía fue calculado con base en el concepto de buena energía (GE) (Wang et al. 2009), que define el consumo de energía sin tener en cuenta la ineficiencia de los equipos.

Resultados y Discusión

Los procesos MWOD presentaron un efecto importante en el consumo de energía. MWOD utiliza el 45,5% de la energía requerida por MW para extraer 1 Kg de agua, equivalente a la utilizada por un secador de aire (Alves y Roos 2006).

Los resultados obtenidos indican además que las muestras procesadas mediante microondas tienden a secar en menos tiempo, MWODFD utiliza 26% menos de tiempo para secar que FD, lo cual favorece la reducción en el consumo de energía, debido a que la cantidad de agua extraída en MWODFD fue más del doble que en los procesos combinados MWFD en la fase de pretratamiento (antes de la liofilización), presentándose por lo tanto un menor consumo de GE en el cambio de fase (es decir durante congelación, sublimación y condensación).

Por otro lado, de acuerdo con la Figura 1 se pudo observar que más del 90% de GE se consume en los cambios de fase durante el proceso de liofilización, como también durante el proceso de microondas.

Igualmente se encontró que al involucrar un tratamiento osmótico, el ahorro de energía tienden a ser alrededor del 20% (21,1% para ODFD, el 18,6% para MWODFD), debido a que la deshidratación osmótica no requiere de un cambio de fase (Dhingra et al. 2008).

Finalmente de acuerdo con la tabla II que resume los consumos de energía en cada punto del proceso combinado, se observa que los tratamientos ODFD utilizan 56,2% de la GE consumida por FD y los tratamientos combinados MWODFD utilizan el 38,7%.

Conclusiones

Los procesos de microondas, deshidratación osmótica y liofilización permiten un ahorro de energía (GE) del 18,6% (medido en kJ / kg de agua retirada).

Los consumos de energía se reducen en procesos combinados con deshidratación osmótica hasta en un 61,3% (medido en kJ / kg de producto obtenido)

Referencias

- Alves O & Roos YH (2006) Advances in multi-purpose drying operations with phase and state transitions. *Drying Technology*, 24, 383-396.
- Andres A, Fito P, Heredia A & Rosa EM (2007) Combined drying technologies for development of high-quality shelf-stable mango products. *Drying Technology*, 25, 1857-1866.
- Beaudry C, Raghavan GSV, Ratti C & Rennie TJ (2004a) Effect of four drying methods on the quality of osmotically dehydrated cranberries. *Drying Technology*, 22, 521-539.
- Deng Y & Zhao YY (2008) Effect of pulsed vacuum and ultrasound osmopretreatments on glass transition temperature, texture, microstructure and calcium penetration of dried apples (Fuji). *Lwt-Food Science and Technology*, 41, 1575-1585.
- Dhingra D, Singh J, Patil RT & Uppal DS (2008) Osmotic dehydration of fruits and vegetables: A review. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 45, 209-217.
- Huang LL, Zhang M, Mujumdar AS, Sun DF, Tan GW & Tang S (2009) Studies on Decreasing Energy Consumption for a Freeze-Drying Process of Apple Slices. *Drying Technology*, 27, 938-946.
- Lombard GE, Oliveira JC, Fito P & Andres A (2008) Osmotic dehydration of pineapple as a pre-treatment for further drying. *Journal of Food Engineering*, 85, 277-284.
- Orsat V, Yang W, Changrue V & Raghavan GSV (2007) Microwave-assisted drying of biomaterials. *Food and Bioproducts Processing*, 85, 255-263.
- Ortega-Rivas E (2007) Processing effects for safety and quality in some non-predominant food technologies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 47, 161-173.

- Pardo M & Leiva A (2009) Combination of technologies for the dehydration of pineapple. *Ingeniería y Competitividad*, 11, 57.
- Rastogi NK, Raghavarao K, Niranjana K & Knorr D (2002) Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. *Trends in Food Science & Technology*, 13, 48-59.
- Reyes A, Vega R, Bustos R & Araneda C (2008) Effect of processing conditions on drying kinetics and particle microstructure of carrot. *Drying Technology*, 26, 1272-1285.
- Schubert H & MR (2006). Novel and Traditional Microwave Applications in the Food Industry. In *Advances in Microwave and Radio Frequency Processing*, ed. W.-P. M., 259-270. Berlin: Springer.
- Taiwo KA, Eshtiaghi MN, Ade-Omowaye BIO & Knorr D (2003) Osmotic dehydration of strawberry halves: influence of osmotic agents and pretreatment methods on mass transfer and product characteristics. *International Journal of Food Science and Technology*, 38, 693-707.
- Wang R, Zhang M, Mujumdar AS & Sun JC (2009) Microwave Freeze-Drying Characteristics and Sensory Quality of Instant Vegetable Soup. *Drying Technology*, 27, 962-968.
- Xu YY, Zhang M, Mujumdar AS, Duan X & Jin-Cai S (2006) A two-stage vacuum freeze and convective air drying method for strawberries. *Drying Technology*, 24, 1019-1023.
- Zhang M, Tang J, Mujumdar AS & Wang S (2006) Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 17, 524-534.

TABLA I. ECUACIONES PARA CALCULAR EL CONSUMO DE ENERGÍA EN DIFERENTES PUNTOS DEL PROCESO DE SECADO

Puntos de consumo de energía	Ecuación	Variables
Calor sensible durante el enfriamiento (E1)	$mCp\Delta T$	m : masa total de la fruta (kg) Cp : calor específico de la fruta (kJ/kg°C) ΔT : T1-T2 $T1$: temperatura ambiente (°C) $T2$: temperatura de congelación de la fruta (°C)
Calor latente durante la congelación (E2)	$m\lambda$	m : masa de agua congelable de la fruta (kg) λ : calor latente congelación del agua (kJ/kg)
Calor sensible durante el Sub-enfriamiento (E3)	$mCp\Delta T$	m : masa total de la fruta (kg) Cp : calor específico de la fruta (kJ/kg°C) ΔT : T2-T3 $T3$: temperatura de subenfriamiento (°C)
Calor de sublimación (E4)	$m\lambda$	m : masa de agua congelable de la fruta (kg) λ : calor latente de sublimación (kJ/kg)
Calor latente de condensación (E5)	$m\lambda$	m : masa de agua congelable de la fruta (kg) λ : calor latente de condensación (kJ/kg)
Calor sensible durante el calentamiento (E6)	$mCp\Delta T$	m : masa de la fruta semiseca (kg) Cp : calor específico de la fruta (kJ/kg°C) ΔT : T4-T3 $T4$: temperatura de calentamiento (°C)
Calor latente de vaporización del agua no congelada (E7)	$m\lambda$	m : masa de vapor (kg) λ : calor latente de vaporización (kJ/kg)
Calor latente de condensación del agua evaporada (E8)	$m\lambda$	m : masa de vapor (kg) λ : calor latente de condensación (kJ/kg)
Consumo de la bomba de vacío (E9)	$(P-Pfc)Vt^* / (tp + ts) / tfv$	P : presión atmosférica (Pa) Pfc : cambio de presión durante FD (Pa) Vt : Volumen total del aire en el liofilizador (m ³) tp : tiempo para la etapa primaria de secado (h) ts : tiempo para la etapa secundaria de secado (h) tfv : tiempo de trabajo de la bomba de vacío desde presión atmosférica hasta 100 Pa (h)
Consumo del microondas (E10)	Pt	P : potencia del microondas (kJ/s) t : tiempo de secado(s)

TABLE II. CONSUMO DE ENERGÍA DE LOS PROCESOS COMBINADOS

<i>Puntos Consumo de Energía</i>	<i>FD</i>	<i>ODFD</i>	<i>MWFD</i>	<i>MWODFD</i>
	(kJ/kg agua removida)			
Calor sensible durante el enfriamiento (E1)	98,9	86,4	84,7	84,2
calor latente de congelación (E2)	333,6	257,5	264,4	188,8
Calor sensible durante el subenfriamiento (E3)	165,9	138,0	134,7	116,0
Calor de sublimación (E4)	2818,5	2175,4	2233,6	1594,6
Calor latente de condensación (E5)	2818,5	2175,4	2233,6	1594,6
Calor sensible durante el calentamiento (E6)	37,8	52,9	43,6	80,4
Calor latente de vaporización del agua no congelada (E7)	9,2	12,3	11,8	23,5
Calor latente de condensación del agua evaporada (E8)	11,5	15,5	14,9	29,6
Consumo de la bomba de vacío (E9)	173,2	188,1	123,2	109,8
consumo de microondas (E10)	0,0	0,0	1431,4	1439,4
Energía Total	6467,1	5101,4	6575,9	5261,0
	(kJ/kg Producto obtenido)			
Energía Total	33721,0	18961,5	34258,8	13047,6

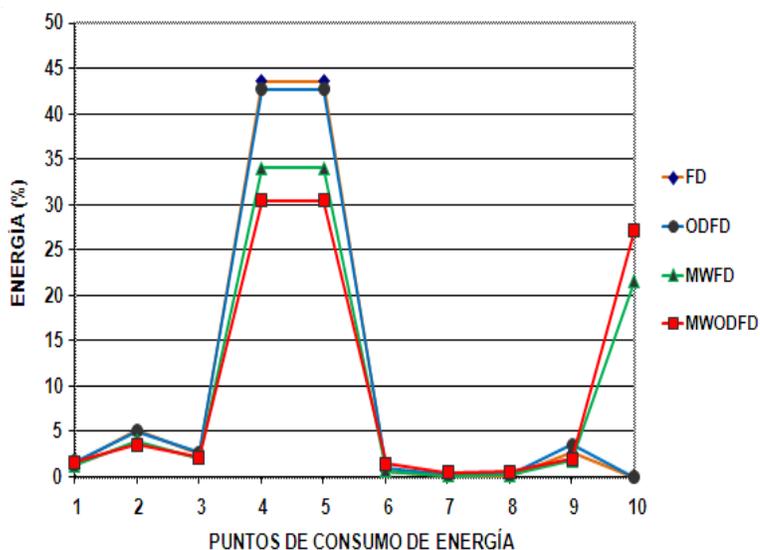


Figura 1. Consumo de energía (%) durante diferentes tratamientos de secado

**ANEXO 4. Artículo Publicado en Revista de Ciencia y Tecnología de América
Interciencia.**

**EFFECTS OF DIFFERENT PRE-TREATMENTS ON ENERGY
CONSUMPTION DURING FREEZE DRYING OF PINEAPPLE PIECES**

Ver archivo anexo

ANEXO 5. Certificado de participación en ponencia. V Jornada de socialización de resultados de investigación

**Universidad de
La Sabana**
Dirección de Investigación

certifica que
Dolly Andrea Leiva Ramírez

Participó en la **V Jornada de Socialización de Resultados de Investigación** con la ponencia
"Aplicación de tecnologías eficientes para el procesamiento de frutas de alta calidad".
Coautor: José Mauricio Fardo Benito.

Campus Universitaria Puente del Común,
Chía, Cundinamarca - Colombia
Octubre 26, 27 y 28 de 2011


Osvaldo Velásquez Fosada
Rector


Leonor Botero Arboleda
Directora de investigación

ANEXO 6. Análisis estadístico- cinética pretratamientos

DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA-OD

- **Pérdidas de humedad**

Análisis de Varianza para Pérdidas Humedad (Mw) - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Concentración (Brix) OD	0,006272	1	0,006272	23,78	0,0004
B:Tiempo (h) OD	0,0117534	2	0,00587672	22,28	0,0001
INTERACCIONES					
AB	0,00415233	2	0,00207617	7,87	0,0066
RESIDUOS	0,00316533	12	0,000263778		
TOTAL (CORREGIDO)	0,0253431	17			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de Pérdidas Humedad (Mw) en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores. Puesto que 3 valores-P son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Pérdidas Humedad (Mw) con un 95,0% de nivel de confianza.

Resumen Estadístico

	<i>Recuento</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación Estándar</i>	<i>Coefficiente de Variación</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Rango</i>
B40T30	3	-0,0993333	0,0085049	-8,56198%	-0,109	-0,093	0,016
B40T90	3	-0,110333	0,0155671	-14,1091%	-0,125	-0,094	0,031
B40T150	3	-0,126667	0,00702377	-5,54508%	-0,134	-0,12	0,014
B60T30	3	-0,094	0,0115326	-12,2687%	-0,103	-0,081	0,022
B60T90	3	-0,164667	0,0220303	-13,3787%	-0,19	-0,15	0,04
B60T150	3	-0,189667	0,0245017	-12,9183%	-0,214	-0,165	0,049
Total	18	-0,130778	0,0386105	-29,5238%	-0,214	-0,081	0,133

* B (Concentración solución deshidratación osmótica-°Brix) y T (tiempo osmótico)

Pruebas de Múltiple Rangos

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 7 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes..

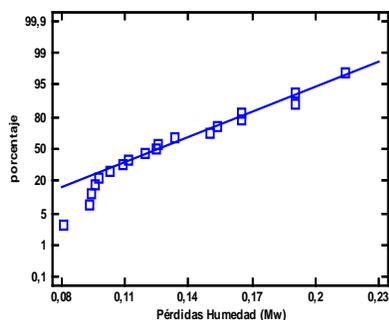
Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
B60T150	3	-0,189667	X
B60T90	3	-0,164667	XX
B40T150	3	-0,126667	XX
B40T90	3	-0,110333	X
B40T30	3	-0,0993333	X
B60T30	3	-0,094	X

* indica una diferencia significativa.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
B40T30 - B40T90		0,011	0,0445484
B40T30 - B40T150		0,0273333	0,0445484
B40T30 - B60T30		-	0,0445484
B40T30 - B60T90	*	0,0653333	0,0445484
B40T30 - B60T150	*	0,0903333	0,0445484
B40T90 - B40T150		0,0163333	0,0445484
B40T90 - B60T30		-	0,0445484
B40T90 - B60T90	*	0,0543333	0,0445484
B40T90 - B60T150	*	0,0793333	0,0445484
B40T150 - B60T30		-	0,0445484
B40T150 - B60T90		0,038	0,0445484
B40T150 - B60T150	*	0,063	0,0445484
B60T30 - B60T90	*	0,0706667	0,0445484
B60T30 - B60T150	*	0,0956667	0,0445484
B60T90 - B60T150		0,025	0,0445484

Gráfico de Probabilidad Normal



Se valida la prueba estadística con referencia a la desviación estándar, puesto que la muestra proviene de una distribución normal.

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 95 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 7 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes.

- **Ganancia de sólidos**

Análisis de Varianza para Ganancia de sólidos (Ms) - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Tiempo (h) OD	0,00561478	2	0,00280739	24,04	0,0001
B:Concentración (Brix) OD	0,0333681	1	0,0333681	285,74	0,0000
INTERACCIONES					
AB	0,00113011	2	0,000565056	4,84	0,0288
RESIDUOS	0,00140133	12	0,000116778		
TOTAL (CORREGIDO)	0,0415143	17			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Resumen Estadístico

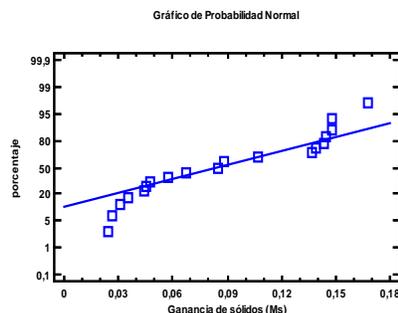
	Recuento	Promedio	Desviación	Coefficiente de	Mínimo	Máximo	Rango
B40T30*	3	0,0293333	0,00585947	19,9754%	0,025	0,036	0,011
B40T90	3	0,0456667	0,0136504	29,8914%	0,031	0,058	0,027
B40T150	3	0,0526667	0,0133167	25,2848%	0,044	0,068	0,024
B60T30	3	0,0933333	0,0119304	12,7825%	0,085	0,107	0,022
B60T90	3	0,139667	0,00305505	2,18739%	0,137	0,143	0,006
B60T150	3	0,153	0,0122882	8,03151%	0,144	0,167	0,023
Total	18	0,0856111	0,0494168	57,7224%	0,025	0,167	0,142

* B (Concentración solución deshidratación osmótica-°Brix) y T (tiempo osmótico)

Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

	Casos	Media	Grupos
B40T30	3	0,0293333	X
B40T90	3	0,0456667	X
B40T150	3	0,0526667	X
B60T30	3	0,0933333	X
B60T90	3	0,139667	X
B60T150	3	0,153	X



Se valida la prueba estadística con referencia a la desviación estándar, puesto que la muestra proviene de una distribución normal.

MICROONDAS-M

- Pérdidas de humedad

Tabla ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,158042	2	0,0790212	80,28	0,0000
Intra grupos	0,00590596	6	0,000984327		
Total (Corr.)	0,163948	8			

Pruebas de Múltiple Rangos

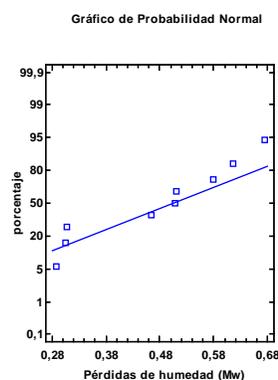
Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

	Casos	Media	Grupos
8 (kW/kg)	3	0,299785	X
20 kW/kg	3	0,493871	X
40 (kW/kg)	3	0,622148	X

Contraste	Sig.	Diferenci	+/- Límites
20 kW/kg - 8 (kW/kg)	*	0,194085	0,0785998
20 kW/kg - 40 (kW/kg)	*	-0,128278	0,0785998
8 (kW/kg) - 40 (kW/kg)	*	-0,322363	0,0785998

* indica una diferencia significativa.

Se valida la prueba estadística con referencia a la desviación estándar, puesto que la muestra proviene de una distribución normal.



MICROONDAS Y DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA-MOD

- Pérdidas de humedad

Análisis de Varianza para Pérdidas de humedad Mw - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Potencia (kW/kg) M	0,27377	2	0,136885	265,97	0,0000
B:Concentración (°Brix) OD	0,0996741	1	0,0996741	193,67	0,0000
C:Tiempo (h) OD	0,00117478	2	0,000587389	1,14	0,3296
INTERACCIONES					
AB	0,00296937	2	0,00148469	2,88	0,0676
AC	0,00835322	4	0,00208831	4,06	0,0075
BC	0,00778893	2	0,00389446	7,57	0,0016
RESIDUOS	0,0205866	40	0,000514666		
TOTAL (CORREGIDO)	0,414317	53			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Resumen Estadístico

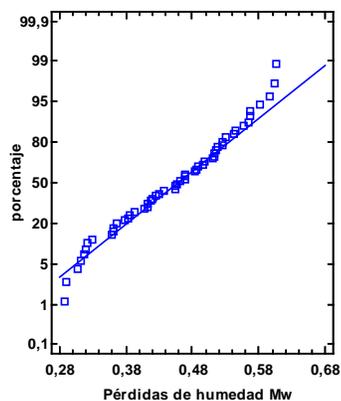
	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coficiente de Variación	Mínimo	Máximo
40P40B30T*	3	0,499	0,0120554	2,4143%	0,488	0,512
40P40B90T	3	0,469	0,0145258	3,09719%	0,454	0,483
40P40B150T	3	0,462	0,00750555	1,62341%	0,455	0,47
40P60B30T	3	0,525	0,00650641	1,2401%	0,518	0,531
40P60B90T	3	0,580	0,0240069	4,13675%	0,556	0,604
40P60B150T	3	0,562	0,0456107	8,11097%	0,515	0,606
20P40B30T	3	0,47	0,0150997	3,2127%	0,456	0,486
20P40B90T	3	0,42	0,0149332	3,55552%	0,409	0,437
20P40B150T	3	0,411	0,018037	4,38146%	0,393	0,429
20P60B30T	3	0,536	0,053507	9,98265%	0,497	0,597
20P60B90T	3	0,526	0,0160104	3,03995%	0,511	0,543
20P60B150T	3	0,558	0,0119304	2,1355%	0,545	0,567
8P40B30T	3	0,3	0,0182483	6,08276%	0,288	0,321
8P40B90T	3	0,314	0,00680686	2,16549%	0,309	0,322
8P40B150T	3	0,335	0,0210792	6,27981%	0,318	0,359
8P60B30T	3	0,369	0,013	3,52304%	0,361	0,384
8P60B90T	3	0,377	0,00916515	2,43107%	0,367	0,385
8P60B150T	3	0,421	0,00458258	1,0885%	0,417	0,426
Total	54	0,452	0,0884155	19,5562%	0,288	0,606

*P (potencia de microondas), B (Concentración solución deshidratación osmótica-°Brix) y T (tiempo osmótico)

Pruebas de Múltiple Rangos : Método: 95,0
porcentaje Tukey HSD

	Casos	Media	Grupos
8P40B30T	3	0,3	X
8P40B90T	3	0,314333	XX
8P40B150T	3	0,335667	XX
8P60B30T	3	0,369	XX
8P60B90T	3	0,377	XX
20P40B150T	3	0,411667	XX
20P40B90T	3	0,42	XX
8P60B150T	3	0,421	XX
40P40B150T	3	0,462333	XX
40P40B90T	3	0,469	XX
20P40B30T	3	0,47	XX
40P40B30T	3	0,499333	XX
40P60B30T	3	0,524667	XXX
20P60B90T	3	0,526667	XXX
20P60B30T	3	0,536	XX
20P60B150T	3	0,558667	XX
40P60B150T	3	0,562333	XX
40P60B90T	3	0,580333	X

Gráfico de Probabilidad Normal



Se valida la prueba estadística con referencia a la desviación estándar, puesto que la muestra proviene de una distribución normal.

- **Ganancia de sólidos**

Análisis de Varianza para Ganancia de sólidos Ms - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Potencia (kW/kg) M	0,00837381	2	0,00418691	29,98	0,0000
B:Concentración (brix) OD	0,0135692	1	0,0135692	97,17	0,0000
C:Tiempo (h) OD	0,0227005	2	0,0113502	81,28	0,0000
INTERACCIONES					
AB	0,000730259	2	0,00036513	2,61	0,0857
AC	0,00150341	4	0,000375852	2,69	0,0446
BC	0,00046137	2	0,000230685	1,65	0,2045
RESIDUOS					
TOTAL (CORREGIDO)	0,0529244	53			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Resumen Estadístico

	<i>Recuento</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación Estándar</i>	<i>Coefficiente de Variación</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
40P40B30T*	3	0,024	0,006	25,0%	0,018	0,03
40P40B90T	3	0,0326667	0,00550757	16,8599%	0,027	0,038
40P40B150T	3	0,0566667	0,00404145	7,13197%	0,052	0,059
40P60B30T	3	0,0493333	0,00702377	14,2374%	0,042	0,056
40P60B90T	3	0,0603333	0,0126623	20,9872%	0,049	0,074
40P60B150T	3	0,0926667	0,0110151	11,8868%	0,082	0,104
20P40B30T	3	0,0316667	0,0120554	38,0698%	0,019	0,043
20P40B90T	3	0,0563333	0,00929157	16,4939%	0,05	0,067
20P40B150T	3	0,0786667	0,00416333	5,29237%	0,074	0,082
20P60B30T	3	0,0523333	0,0145717	27,8439%	0,037	0,066
20P60B90T	3	0,0806667	0,0190088	23,5646%	0,062	0,1
20P60B150T	3	0,105333	0,0140475	13,3363%	0,092	0,12
8P40B30T	3	0,036	0,0122882	34,1339%	0,027	0,05
8P40B90T	3	0,0653333	0,0051316	7,85449%	0,061	0,071
8P40B150T	3	0,0856667	0,00862168	10,0642%	0,078	0,095
8P60B30T	3	0,0623333	0,0090185	14,4682%	0,053	0,071
8P60B90T	3	0,111333	0,00665833	5,98053%	0,107	0,119
8P60B150T	3	0,138	0,0295973	21,4473%	0,104	0,158
Total	54	0,0677407	0,0316002	46,6487%	0,018	0,158

*P (potencia de microondas), B (Concentración solución deshidratación osmótica-°Brix) y T (tiempo osmótico)

Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
40P40B30T	3	0,024	X
20P40B30T	3	0,0316667	XX
40P40B90T	3	0,0326667	XX
8P40B30T	3	0,036	XX
40P60B30T	3	0,0493333	XXX
20P60B30T	3	0,0523333	XXX
20P40B90T	3	0,0563333	XXXX
40P40B150T	3	0,0566667	XXXX
40P60B90T	3	0,0603333	XXXX
8P60B30T	3	0,0623333	XXX
8P40B90T	3	0,0653333	XXX
20P40B150T	3	0,0786667	XXX
20P60B90T	3	0,0806667	XXX
8P40B150T	3	0,0856667	XXX
40P60B150T	3	0,0926667	XX
20P60B150T	3	0,105333	XX
8P60B90T	3	0,111333	XX
8P60B150T	3	0,138	X

ANEXO 7. Análisis estadístico-Color

Pruebas de Múltiple Rangos

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 26 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 5 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes.

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos</i>
OD2FD	3	8,07133	X
FD	3	15,6453	X
M1FD	3	15,8327	X
M2FD	3	19,946	XX
MD3FD	3	20,597	XX
OD1FD	3	22,7257	XX
MD2FD	3	24,169	XXX
MD4FD	3	25,9067	XX
MD5FD	3	26,916	XX
MD1FD	3	28,435	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
FD - OD1FD	*	-7,08033	4,99677
FD - OD2FD	*	7,574	4,99677
FD - M1FD		-0,187333	4,99677
FD - M2FD		-4,30067	4,99677
FD - MD1FD	*	-12,7897	4,99677
FD - MD2FD	*	-8,52367	4,99677
FD - MD3FD		-4,95167	4,99677
FD - MD4FD	*	-10,2613	4,99677
FD - MD5FD	*	-11,2707	4,99677
OD1FD - OD2FD	*	14,6543	4,99677
OD1FD - M1FD	*	6,893	4,99677
OD1FD - M2FD		2,77967	4,99677
OD1FD - MD1FD	*	-5,70933	4,99677
OD1FD - MD2FD		-1,44333	4,99677
OD1FD - MD3FD		2,12867	4,99677
OD1FD - MD4FD		-3,181	4,99677
OD1FD - MD5FD		-4,19033	4,99677
OD2FD - M1FD	*	-7,76133	4,99677
OD2FD - M2FD	*	-11,8747	4,99677
OD2FD - MD1FD	*	-20,3637	4,99677
OD2FD - MD2FD	*	-16,0977	4,99677
OD2FD - MD3FD	*	-12,5257	4,99677
OD2FD - MD4FD	*	-17,8353	4,99677
OD2FD - MD5FD	*	-18,8447	4,99677
M1FD - M2FD		-4,11333	4,99677
M1FD - MD1FD	*	-12,6023	4,99677
M1FD - MD2FD	*	-8,33633	4,99677
M1FD - MD3FD		-4,76433	4,99677
M1FD - MD4FD	*	-10,074	4,99677
M1FD - MD5FD	*	-11,0833	4,99677
M2FD - MD1FD	*	-8,489	4,99677
M2FD - MD2FD		-4,223	4,99677
M2FD - MD3FD		-0,651	4,99677
M2FD - MD4FD	*	-5,96067	4,99677
M2FD - MD5FD	*	-6,97	4,99677
MD1FD - MD2FD		4,266	4,99677
MD1FD - MD3FD	*	7,838	4,99677
MD1FD - MD4FD		2,52833	4,99677
MD1FD - MD5FD		1,519	4,99677
MD2FD - MD3FD		3,572	4,99677
MD2FD - MD4FD		-1,73767	4,99677
MD2FD - MD5FD		-2,747	4,99677
MD3FD - MD4FD	*	-5,30967	4,99677
MD3FD - MD5FD	*	-6,319	4,99677
MD4FD - MD5FD		-1,00933	4,99677

* indica una diferencia significativa.

ANEXO 8. A análisis estadístico-textura

Pruebas de Múltiple Rangos

Esta tabla aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 29 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 5 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes.

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
FD	15,9043	X
M2FD	22,7135	X
MD3FD	24,8816	XX
OD2FD	25,2078	XX
OD1FD	29,2201	XX
MD2FD	30,2631	XX
M1FD	31,0255	XX
MD4FD	34,8188	X
MD1FD	42,4231	X
MD5FD	43,8017	X

* indica una diferencia significativa.

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
FD - OD1FD	*	-13,3159	6,36272
FD - OD2FD	*	-9,3035	6,36272
FD - M1FD	*	-15,1213	6,36272
FD - M2FD	*	-6,80925	6,36272
FD - MD1FD	*	-26,5189	6,36272
FD - MD2FD	*	-14,3589	6,36272
FD - MD3FD	*	-8,97737	6,36272
FD - MD4FD	*	-18,9145	6,36272
FD - MD5FD	*	-27,8975	6,36272
OD1FD - OD2FD		4,01237	6,36272
OD1FD - M1FD		-1,80538	6,36272
OD1FD - M2FD	*	6,50662	6,36272
OD1FD - MD1FD	*	-13,203	6,36272
OD1FD - MD2FD		-1,043	6,36272
OD1FD - MD3FD		4,3385	6,36272
OD1FD - MD4FD		-5,59863	6,36272
OD1FD - MD5FD	*	-14,5816	6,36272
OD2FD - M1FD		-5,81775	6,36272
OD2FD - M2FD		2,49425	6,36272
OD2FD - MD1FD	*	-17,2154	6,36272
OD2FD - MD2FD		-5,05538	6,36272
OD2FD - MD3FD		0,326125	6,36272
OD2FD - MD4FD	*	-9,611	6,36272
OD2FD - MD5FD	*	-18,594	6,36272
M1FD - M2FD	*	8,312	6,36272
M1FD - MD1FD	*	-11,3976	6,36272
M1FD - MD2FD		0,762375	6,36272
M1FD - MD3FD		6,14388	6,36272
M1FD - MD4FD		-3,79325	6,36272
M1FD - MD5FD	*	-12,7762	6,36272
M2FD - MD1FD	*	-19,7096	6,36272
M2FD - MD2FD	*	-7,54962	6,36272
M2FD - MD3FD		-2,16812	6,36272
M2FD - MD4FD	*	-12,1052	6,36272
M2FD - MD5FD	*	-21,0882	6,36272
MD1FD - MD2FD	*	12,16	6,36272
MD1FD - MD3FD	*	17,5415	6,36272
MD1FD - MD4FD	*	7,60437	6,36272
MD1FD - MD5FD		-1,37862	6,36272
MD2FD - MD3FD		5,3815	6,36272
MD2FD - MD4FD		-4,55562	6,36272
MD2FD - MD5FD	*	-13,5386	6,36272
MD3FD - MD4FD	*	-9,93713	6,36272
MD3FD - MD5FD	*	-18,9201	6,36272
MD4FD - MD5FD	*	-8,983	6,36272

ANEXO 9. Procedimiento cuantificación de vitamina C por HPLC

METODO PARA DETERMINAR CONTENIDO DE VITAMINA C

LABORATORIO NUTRIANÁLISIS

TÉCNICA: Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia HPLC.

Principio del método

Extracción de la vitamina en buffer de fosfato; limpieza de impurezas por centrifugación y filtración; separación de analitos en columna en fase reversa; inyección en el equipo de Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia (HPLC) y detección por UV-VIS.

PROCEDIMIENTO

Condiciones cromatográficas

Fase móvil	BUFFER FOSFATO (solución de extracción y fase móvil)
Fase estacionaria	C 18
Longitud de onda	245 nm
Volumen de inyección	10 µl
Tiempo de corrida	5 min
Tiempo de retención aproximado	Ácido ascórbico (Vit C): 2,5 min

Preparación del estándar y la muestra

- En dos balones aforados de 50 ml de color ámbar se pesan aproximadamente 0,01 g de estándar y la cantidad de muestra adecuada (aprox 5g en alimentos).
- Se lleva a volumen con buffer fosfato y se agita manualmente por 1 minuto,
- luego se aplica ultrasonido durante 20 minutos
- Se prepara el estándar y la muestra para inyección (en este punto puede ser necesario filtrar o centrifugar dependiendo del tipo de muestra).
- Se inyecta por duplicado
- Se comparan los cromatogramas del estándar y la muestra
- se hace la dilución respectiva para que el área del estándar quede muy cercano al área de la muestra.

CALCULOS Y EXPRESION DE RESULTADOS

Se deben tener mínimo dos inyecciones de estándar y dos inyecciones de muestra, calculando el promedio. Para obtener la concentración en mg/L de vitamina en la muestra se puede utilizar cualquiera de los siguientes procedimientos:

- Se puede utilizar una curva de calibración y se maneja la siguiente ecuación:

$$VC = \frac{(y-b)V_f}{mw} F \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

y : área de la muestra
b : intercepto de la recta
m: pendiente de la recta
w : peso de la muestra
V_f: Volumen final (L)
F: Factor de conversión a unidades

- Si se trabaja con un solo punto de la curva de calibración, se aplica la siguiente ecuación:

$$VC = \frac{A_{muestra} PPM V_f}{A_{estandar} W} F \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

A_{muestra}: área de la muestra
A_{estandar} : área del estándar
PPM: concentración del estándar en ppm
W: peso de la muestra
V_f : Volumen final (L)
F: Factor de conversión a unidades

Documentos asociados:

- Instructivo para el manejo del cromatógrafo líquido ELITE- LACHROM
- Norma UNE-EN 14130:2003

EFFECTS OF DIFFERENT PRE-TREATMENTS ON ENERGY CONSUMPTION DURING FREEZE DRYING OF PINEAPPLE PIECES

José Mauricio Pardo and Dolly Andrea Leiva

SUMMARY

Osmotic dehydration and microwave heating were combined with freeze-drying to obtain dehydrated pineapple. The effects of combined technologies on energy consumption, drying time and kinetics were analyzed. It was generally observed that the processes that include osmotic dehydration reduced the sublimation kinetics, but showed low consumption of energy during

the whole dehydration process. A positive synergistic effect on mass transfer is observed when microwaves are additionally applied before osmotic dehydration and freeze-drying, due to solid gain after osmotic pretreatments; energy utilization throughout the complete dehydration processes can be reduced up to 61.3% when measured as kJ/kg of obtained product.

Introduction

The main reason to dehydrate fruits is to extend their shelf life beyond that of the fresh material without the need for refrigeration. Known as the oldest method of food preservation, dehydration preserves fruits because it reduces the water content to levels at which growth and development of microorganisms is inhibited. Additionally, enzyme activity and chemical changes are decreased. On the other hand, changes that affect the quality of food such as shrinkage, color and flavor variations, and reduction of nutritional value may also occur during drying. Thus, the study of dehydration and its effects on fruit quality is a relevant topic.

There are many ways of taking the water away from biological materials: air drying, direct contact, vacuum, etc. However, products obtained from freeze drying, which is based on dehydration

by sublimation of frozen water, are recognized for their quality and rehydration capacity. Therefore, it is common to find references where freeze drying (FD) is the benchmark method for water removal (Beaudry *et al.*, 2004; Marques *et al.*, 2009; Michalczyk *et al.*, 2009). However, FD is also known for its slow drying rates, high operation cost and low energy efficiency in comparison with other ordinary drying technologies (Huang *et al.*, 2009). Because of these drawbacks, FD has been mainly applied to dehydrate high value products such as pharmaceuticals, microorganisms and some aromatic beverages like coffee (Pardo, 2002; Chen and Wang, 2007; Meng *et al.*, 2008).

Studies to reduce FD cost have been carried out during the past three decades. Some of these studies have focused on abolishing the cost of generating high vacuum and therefore concentrated efforts

on developing equipment for atmospheric FD (Wolf, 1990; Claussen *et al.*, 2007; Rahman and Mujumdar, 2008). Others have tried several combinations of treatments to reduce energy use during FD (Xu *et al.*, 2006; Reyes *et al.*, 2008; Huang *et al.*, 2009), and others have tried to reduce FD time by enhancing heat transfer (Zhang *et al.*, 2006; Duan *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2009). Finally, there are plenty of studies to replace FD by reproducing its effects on the product. The latter is the case of combined treatments such as osmo-convective drying and microwave assisted air drying, which have been shown to have good effects on color, rehydration ratio and nutrient retention of fruits, comparable to those of FD fruits (Prothon *et al.*, 2001; Beaudry *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2006; Andres *et al.*, 2007).

The use of microwaves (MW) to assist the drying processes has been widely

studied (Zhang *et al.* 2006; Orsat *et al.*, 2007) and several advantages have been reported: shorter drying times, improved product quality and heat transfer rates. However, existing applications are limited due to high start-up costs and relatively complex technology when compared to conventional drying methods (Schubert, 2006). As microwaves can penetrate tissue samples, their center can easily reach temperatures near water's boiling point; therefore, during MW drying mass transfer is influenced by a pressure gradient, which is the main driving force. A too rapid mass transport may cause quality damage or undesirable changes in the food texture by 'puffing' (Nijhuis *et al.*, 1998). However, this may or may not be a limitation, depending on the desired quality attributes of the final product. For example, the rapid evaporation caused by MW could yield cell wall damage that could increase mass

Keywords / Freeze-Drying / Microwave Heating / Osmotic Dehydration / Pineapple /

Received: 12/18/2009. Modified: 11/19/2010. Accepted: 11/22/2010.

José Mauricio Pardo. Agroindustrial Production Engineer, Universidad de La Sabana, Colombia. Ph.D. in Food Engineering, University of Reading, UK. Professor, Universidad de La Sabana, Colombia.

Address: Campus Universitario Puente del Común, Km. 7 Autopista Norte, Chia, Cundinamarca, Colombia. e-mail: Mauricio.Pardo1@unisabana.edu.co.

Dolly Andrea Leiva. Agroindustrial Production Engineer and M.Sc. student in Agroindustrial Process Design and Management, University de La Sabana, Colombia.

EFFECTOS DE DIFERENTES PRETRATAMIENTOS SOBRE EL CONSUMO DE ENERGÍA DURANTE LA LIOFILIZACIÓN DE TROZOS DE PIÑA

José Mauricio Pardo y Dolly Andrea Leiva

RESUMEN

A fin de obtener piña deshidratada fueron combinados tratamientos de deshidratación osmótica y calentamiento por microondas con liofilización. Se analizaron los efectos de las tecnologías combinadas sobre el consumo de energía, tiempo de secado y parámetros cinéticos. En general, se observó que los procesos que incluyen deshidratación osmótica redujeron la cinética de sublimación, y mostraron un bajo consumo de energía

durante todo el proceso. Un efecto sinérgico positivo sobre la transferencia de masa se observó cuando las microondas fueron adicionalmente aplicadas antes de la deshidratación osmótica y la liofilización, debido a la ganancia de sólidos tras los pretratamientos osmóticos; la utilización de energía a lo largo de todo el proceso de deshidratación puede ser reducida hasta en 61,3% cuando se mide en kJ/kg de producto obtenido.

EFEITOS DE DIFERENTES PRETRATAMENTOS SOBRE O CONSUMO DE ENERGIA DURANTE A LIOFILIZAÇÃO DE PEDAÇOS DE ABACAXI

José Mauricio Pardo e Dolly Andrea Leiva

RESUMO

Com o fim de obter abacaxi desidratado foram combinados tratamentos de desidratação osmótica e aquecimento por microondas com liofilização. Analisaram-se os efeitos das tecnologias combinadas sobre o consumo de energia, tempo de secado e parâmetros cinéticos. Em geral, se observou que os processos que incluem desidratação osmótica reduziram a cinética de sublimação, e mostraram um baixo consumo de energia durante todo o

processo. Um efeito sinérgico positivo sobre a transferência de massa se observou quando as microondas foram adicionalmente aplicadas antes da desidratação osmótica e a liofilização, devido o ganho de sólidos depois dos pretratamentos osmóticos; a utilização de energia ao longo de todo o processo de desidratação pode ser reduzida até em 61,3% quando se mede em kJ/kg de produto obtido.

transfer when combined with other drying methods, such as air drying or osmotic dehydration but, on the other hand, it can induce sample shrinkage and nutrient loss (Zhang *et al.*, 2006).

Osmotic dehydration (OD) is well known as a drying pretreatment for food materials because it can reduce energy costs and also improve quality of the final products (Andres *et al.*, 2007; Ortega-Rivas, 2007; Lombard *et al.*, 2008). OD is usually carried out by immersion of the samples in a highly concentrated solution of sugar or salt. It has been applied successfully to a variety of fruits by reducing up to 30% of their initial moisture content (Rastogi *et al.*, 2002; Beaudry *et al.*, 2004). The chemical potential that exists between solution and food sample leads to mass transfer fluxes, in which water flows out of the sample and solutes enter into the tissue. However, since osmotic pressure is the unique driving force for mass trans-

fer, OD is a slow process. Other processes, such as vacuum infusion, ultrasound, high pressure, high-intensity electric field pulses, microwaves, blanching and freezing have been investigated earlier in order to improve diffusion coefficients during OD (Rastogi *et al.*, 2002; Taiwo *et al.*, 2003; Deng and Zhao, 2008; Dhingra *et al.*, 2008; Pardo and Leiva, 2009).

The selection of the proper drying technology or combination of technologies can affect final product quality and drying cost. Therefore, this study focuses on the reduction of energy use during freeze drying of pineapple slices. Pretreatments such as OD, MW and their combinations are studied to see their effect on water content, sublimation time and overall energy consumption during pineapple freeze drying.

Materials and Methods

Pineapples (Var. Golden) were peeled and cut into triangular

pieces (10mm base × 30mm sides × 5mm width).

Osmotic dehydration was carried out in concentrated sucrose solutions (60°Brix). Recipients were filled with the osmotic solution at 20°C and 50g of pineapple pieces, maintaining a product solution ratio of 1:5 w/w. Osmotic solution was not agitated during the experimental procedures. After withdrawing the pineapple pieces from the osmotic solution they were placed on an absorbent cloth to remove excess of solution on the surface.

Microwave heating was carried out using a microwave oven (HACEB HM1.1). Samples of 50g of pineapple pieces were heated using a power of 20 kW/kg.

Freeze drying was carried out using a Labconco tray freeze dryer (4.5l benchtop) under an absolute pressure of 0.15mbar. Samples were heated unidirectionally using radiation heat transfer from the upper tray; the heating tray temperature was maintained at 40°C from the first processing hour up to 8h. The weight of the samples was followed by placing an electronic Mettler balance (±0.01g) inside the drying chamber. Weight recordings were made every 30min during the first 8h.

All combined treatments used in this work were carried out three times and the procedures used are summarized in Table I. Additionally, Figure 1 summarizes the en-

TABLE I
SUMMARY OF TREATMENT COMBINATIONS
USED IN THIS WORK

Code	Treatment description
ODFD	OD during 75min and FD during 24h
MWFD	MW during 1min and FD during 24h
MWODFD	MW during 1min, OD during 74min and FD during 24h

ergy consumption points during different drying treatments, and Table II explains the calculation method for energy used in every consumption point. Energy calculations have been done using the definition of good energy or valid energy (GE; Huang *et al.*, 2009), which excludes all energy that is not used in the operation (heat losses, equipment inefficiencies etc).

Results and Discussion

In Table III it can be appreciated that the combined treatment MWOD is the one that favors most mass transfer in both directions (solid gain and water loss), a result that is consistent with earlier findings (Pardo and Leiva, 2009). Differences between MWOD and OD are explained on the basis of the puffing phenomena that occurs during the MW treatment, which fractures cell walls and therefore opens new paths for mass to be transferred faster during osmotic dehydration (Zhang *et al.*, 2006). Additionally, it is seen from Table III that MWOD uses 45.5% of the energy needed by MW to extract 1kg of water. These results show the positive influence of osmotic treatments on the reduction of energy use at least on the first drying step. Finally, the amount of energy used in MWOD to extract 1kg of water is equivalent to that used by an efficient convec-

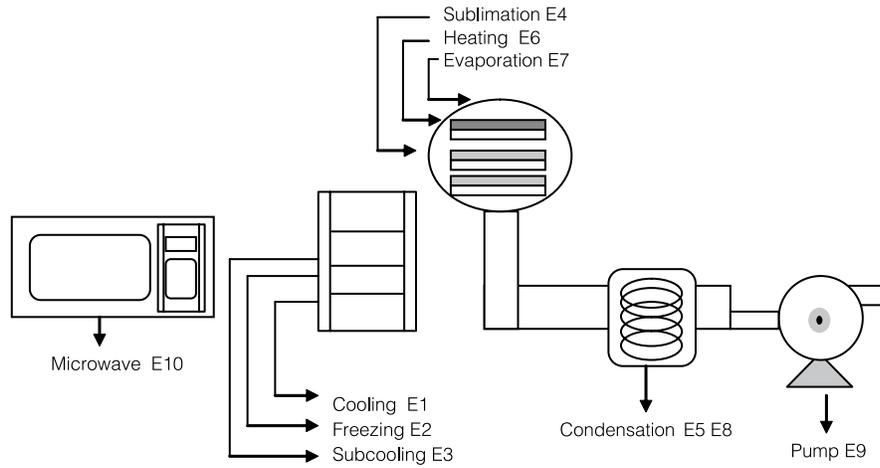


Figure 1. Different points in which there is significant energy consumption during the drying procedure.

tion dryer (Alves and Roos, 2006). Although this is a good level, it was expected to observe a lower value due to efficient energy transmission attributed to microwave heat-

ing processes (Bradshaw, 2006; Zhang *et al.*, 2006).

A linear trend was observed in freeze drying curves (water loss through time between 1 and 7h),

which is typical under the experimental conditions used in this work (Sagara, 2001; Pardo, 2002); in fact, all correlation coefficients obtained from these regressions were >0.90. Thus, a simple model, based on initial moisture contents and experimental drying kinetics slopes, can be built in order to estimate drying times under different conditions. Predicted times for the different settings used in

this work are summarized in Figure 2. Note that even though freeze drying is composed of two drying stages, sublimation of frozen water and desorption of unfrozen water (Ratti, 2001), the authors consider that the time spent during the desorption stage can be neglected without affecting the main objectives of this work. Therefore, the estimated sublimation time, assumed to represent the total drying time, is given by

$$t_s = \frac{H_{bf} - H_{bi}}{m_s}$$

where, t_s : total sublimation time, H_{bf} and H_{bi} : final and initial moisture content, and m_s : slope obtained from empirical drying curves. Two statistically different groups were identified (95% confidence) from the drying kinetics perspective (x-axis in Figure 2). Group A is conformed by samples processed under FD and MWFD, and group B is con-

TABLE II
SUMMARY OF EQUATIONS USED TO CALCULATE ENERGY CONSUMPTION AT DIFFERENT POINTS OF THE DRYING PROCESS

Name And Description	Equation	Symbols
E1 Sensible heat during cooling sample (above freezing)	$mC_p\Delta T$	m: total fruit mass (kg) C _p : specific heat of fruit (kJ/kg°C) ΔT: T ₁ -T ₂ T ₁ : ambient temperature (°C) T ₂ : freezing temperature of fruit (°C)
E2 Latent heat during freezing	$m\lambda$	m: freezable water mass of the fruit (kg) λ: latent heat of freezing water (kJ/kg)
E3 Sensible heat during cooling sample (below freezing)	$mC_p\Delta T$	m: total fruit mass (kg) C _p : specific heat of fruit (kJ/kg°C) ΔT: T ₂ -T ₃ T ₃ : subcooling temperature (°C)
E4 Sublimation heat	$m\lambda$	m: freezable water mass of the fruit (kg) λ: latent heat of sublimation (kJ/kg)
E5 Latent heat of Condensation (vapour-solid)	$m\lambda$	m: freezable water mass of the fruit (kg) λ: latent heat of condensation (kJ/kg)
E6 Sensible heat during heating of dried sample	$mC_p\Delta T$	m: semi-dry fruit mass (kg) C _p : specific heat of fruit (kJ/kg°C) ΔT: T ₄ -T ₃ T ₄ : heating temperature (°C)
E7 Latent heat of vaporisation of non frozen water	$m\lambda$	m: steam mass (kg) λ: latent heat of vaporization (kJ/kg)
E8 Latent heat of condensation of evaporated water (vapor-solid)	$m\lambda$	m: vapour mass (kg) λ: latent heat of condensation (kJ/kg)
E9 Consumption of vacuum pump	$(P-Pfc)Vt(tp+ts)/tfv$	P: atmospheric pressure (Pa) Pfc: chamber pressure during FD (Pa) Vt: total volume of air in freeze dryer (m ³) tp: time for primary drying stage (h) ts: time for secondary drying stage (h) tfv: working time for vacuum pump from atmospheric pressure to 100Pa (h)
E10 Consumption microwave	Pt	P: microwave Power (kJ/s) t: time (s)

formed by MWODFD and ODFD related samples. From these results, it is remarkable that those samples processed using osmotic dehydration showed the smallest slope values, indicating that freeze drying rates tend to be slower after these kinds of treatments. This is in accordance with previous studies on combined drying procedures (Prothon *et al.*, 2001; Andres *et al.*, 2007), which attributed the results to the fact that sucrose molecules in the pretreated tissue increase the internal resistance to mass transfer, and to a crust formed by the osmotic agent on the surface of the sample. Additionally, it is interesting to see that there is no effect of MW on sublimation kinetics (MWFD) when compared with blank procedure (FD). The opposite trend was observed during MWOD pretreatment (Table III), after which an increased mass transfer was observed due to cell rupture. It seems that the MW puffing effect is covered up by the crystal formation that occurs during freezing of the sample prior to the sublimation stage, which can cause cell rupture as well (Marques *et al.*, 2009).

TABLE III
MASS TRANSFERRED AND ENERGY USED DURING DIFFERENT PRETREATMENTS

Pretreatment	ΔM_w	ΔM_s	Energy	Water content after pretreatment
	%	%	kWh/kg water	%w.b.
OD	16.3 ±0.7	3.6 ±0.7	0.0	75 ±0.8
MW	15.0 ±2.3	0	2.2	79 ±2.8
MWOD	33.5 ±0.8	14.6 ±0.3	1.0	60 ±1.6

TABLE IV
ENERGY CONSUMPTION OVER ALL DRYING PROCEDURE*

Energy Consumption Point	FD	ODFD	MWFD	MWODFD
	(kJ/kg of removed water)			
Sensible heat during cooling (E1)	98.9	86.4	84.7	84.2
Latent heat during freezing (E2)	333.6	257.5	264.4	188.8
Sensible heat of cooling (E3)	165.9	138.0	134.7	116.0
Sublimation heat (E4)	2818.5	2175.4	2233.6	1594.6
Latent heat of Condensation (E5)	2818.5	2175.4	2233.6	1594.6
Sensible heat during heating (E6)	37.8	52.9	43.6	80.4
Latent heat of vaporisation of non frozen water (E7)	9.2	12.3	11.8	23.5
Latent heat of condensation of evaporated water (E8)	11.5	15.5	14.9	29.6
Consumption of vacuum pump (E9)	173.2	188.1	123.2	109.8
Consumption of microwave (E10)	0.0	0.0	1431.4	1439.4
Total energy	6467.1	5101.4	6575.9	5261.0
	(kJ/kg obtained product)			
*Total energy	33721.0	18961.5	34258.8	13047.6

* It is important to note that in this line measurement units change.

From the drying time perspective (y-axis Figure 2), two statistically different groups were identified: group 1, composed by samples processed under FD and ODFD and group 2, made up by samples

dried under MWODFD and MWFD. These results show that samples processed using microwaves tend to dry in a shorter time. Furthermore, samples processed using MW and OM are freeze-dried us-

ing 38.7% less time than fresh fruits (FD); even if the pretreatment time (75min) is added, MWODFD uses 26% less time to dry than FD. Thus, experiments show that MWODFD drying conditions are favorable to reduce energy consumption because they extract more than twice the amount of water removed by MWFD at the pretreatment stage, before FD. Therefore, the GE involved in phase change (freezing, sublimation, condensation) is reduced.

Table IV and Figure 3 summarize calculations made on GE consumption using the equations in Table II. From these results it is seen that more than 90% of GE is consumed at the phase-changing points: E2 (freezing), E4 (sublimation), E5 (condensation), and, where applicable, E10 (microwaves). On the other hand, a comparison between different drying procedures showed that all combined treatments tend to reduce energy consumption per kg of extracted water, except for MWFD. This shows that under the experimental conditions employed, MW as pretreatment to FD is not attractive from the environmental and

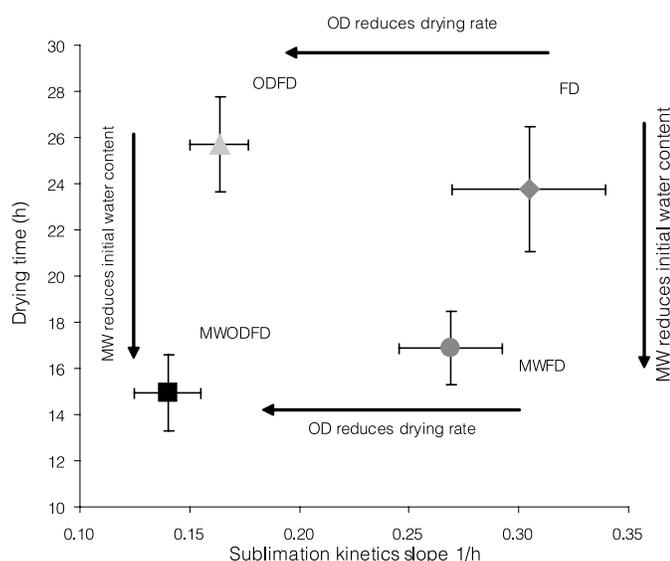


Figure 2. Drying time and sublimation kinetics of the different treatments. OD: osmotic dehydration, FD: free drying, MW: microwave.

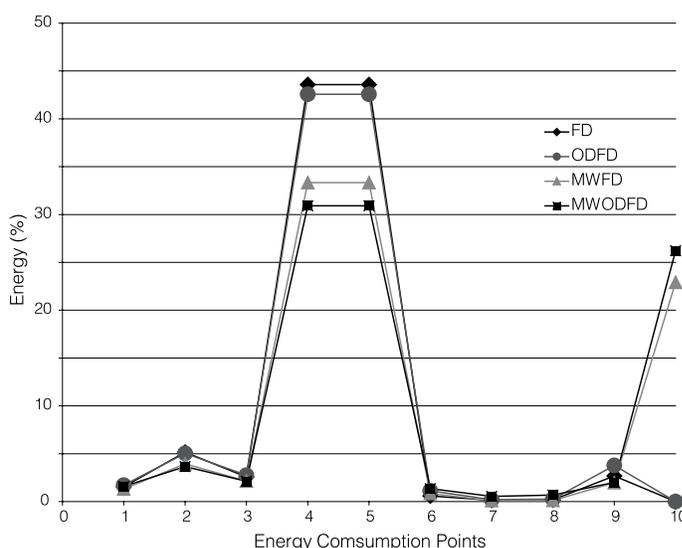


Figure 3. Energy consumption (%) during the different drying treatments.

monetary point of view. Additionally, it can be seen that when an osmotic treatment is involved, energy savings tend to be ~20% (21.1% for ODFD, 18.6% for MWODFD). These results are explained by the fact that osmotic dehydration does not need a water phase change in order to separate water from the sample, which is the main advantage of this process (Dhingra *et al.*, 2008).

Finally, it should be highlighted that osmotic dehydration implies not only movement of water out of the sample, but also movement of solids in the opposite direction; therefore, the yield of processes that include OD as pretreatment is higher than those that don't. These solid gains imply that GE consumed per kg of product is expected to be decreased when osmotic pretreatments are used, as has been observed in this work. The final line of Table IV shows how dried pineapple pieces obtained using osmotic pretreatments (OD, MWOD) tend to consume less GE. The ODFD treatment uses 56.2% of the GE consumed by FD, and MWODFD uses 38.7% of the GE used by FD. These results reveal a synergistic effect when MW is applied before OD, which can generate substantial energy savings in freeze drying plants without investing in new freeze drying equipment, which tends to be more expensive than MW drying equipment. Finally, it is important to note that even though ODFD reduces GE consumption, it is one of the lengthiest treatments, which seems to be unreasonable. However, as equipment inefficiencies (bad energy) are not included in the analysis, the effect of time on energy use tends to be diminished, showing that, before scaling up these results, further studies on the effect of equipment inefficiencies on the cost of the product should be carried out.

Conclusions

A positive synergistic effect on mass transfer is observed

when microwaves are applied before osmotic dehydration and freeze drying. Good energy used during the whole dehydration process (measured in kJ/kg of extracted water) could be reduced up to 18.6% using this combination (MWODFD). Furthermore, due to solid gain after OD pretreatment, GE use throughout all the dehydration process is reduced up to 61.3% when measured as kJ/kg of obtained product.

The use of MW and MWOD as pretreatments for freeze drying opens a good opportunity to increase plant capacity without investing in new freeze drying equipment, which tends to be more expensive than microwave drying equipment or the apparatus needed to carry out osmotic dehydration.

Even though GE savings were observed after ODFD, this treatment tends to increase total drying time. Therefore, further cost analysis should include the effect of this treatment on equipment occupation and the effect of equipment inefficiencies ("bad" energy use) on total cost before deciding its implementation on an industrial scale.

REFERENCES

- Alves O, Roos YH (2006) Advances in multi-purpose drying operations with phase and state transitions. *Drying Technol.* 24: 383-396.
- Andres A, Fito P, Heredia A, Rosa EM (2007) Combined drying technologies for development of high-quality shelf-stable mango products. *Drying Technol.* 25: 1857-1866.
- Beaudry C, Raghavan GSV, Ratti C, Rennie TJ (2004) Effect of four drying methods on the quality of osmotically dehydrated cranberries. *Drying Technol.* 22: 521-539.
- Bradshaw SM (2006) Microwave drying: process engineering aspects. In Willert-Porada M (Ed.) *Advances in Microwave and Radio Frequency Processing*. Springer, Berlin, Germany. pp. 271-280.
- Chen GH, Wang W (2007) Role of freeze drying in nanotechnology. *Drying Technol.* 25: 29-35.
- Claussen IC, Ustad TS, Strommen I, Waide PM (2007) Atmospheric freeze drying - A review. *Drying Technol.* 25: 947-957.
- Deng Y, Zhao YY (2008) Effect of pulsed vacuum and ultrasound osmopretreatments on glass transition temperature, texture, microstructure and calcium penetration of dried apples (Fuji). *Lwt-Food Sci. Technol.* 41: 1575-1585.
- Dhingra D, Singh J, Patil RT, Upal DS (2008) Osmotic dehydration of fruits and vegetables: A review. *J. Food Sci. Technol. Mysore* 45: 209-217.
- Duan X, Zhang M, Mujumdar AS (2007) Studies on the microwave freeze drying technique and sterilization characteristics of cabbage. *Drying Technol.* 25: 1725-1731.
- Huang LL, Zhang M, Mujumdar AS, Sun DF, Tan GW, Tang S (2009) Studies on decreasing energy consumption for a freeze-drying process of apple slices. *Drying Technol.* 27: 938-946.
- Lombard GE, Oliveira JC, Fito P, Andres A (2008) Osmotic dehydration of pineapple as a pre-treatment for further drying. *J. Food Eng.* 85: 277-284.
- Marques LG, Prado MM, Freire JT (2009) Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits. *Lwt-Food Sci. Technol.* 42: 1232-1237.
- Meng XC, Stanton C, Fitzgerald GF, Daly C, Ross RP (2008) Anhydrobiotics: The challenges of drying probiotic cultures. *Food Chem.* 106: 1406-1416.
- Michalczyk M, Macura R, Matuszak I (2009) The effect of air-drying, freeze-drying and storage on the quality and antioxidant activity of some selected berries. *J. Food Proces. Preserv.* 33: 11-21.
- Nijhuis HH, Torringa HM, Murensan S, Yuksel D, Leguijt C, Kloek W (1998) Approaches to improving the quality of dried fruit and vegetables. *Trends Food Sci. Technol.* 9: 13-20.
- Orsat V, Yang W, Changrue V, Raghavan GSV (2007) Microwave-assisted drying of biomaterials. *Food Bioprod. Proces.* 85: 255-263.
- Ortega-Rivas E (2007) Processing effects for safety and quality in some non-predominant food technologies. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 47: 161-173.
- Pardo M (2002) *Modelling Studies on Freeze-drying of Coffee Extracts*. Reading. Thesis. The University of Reading. Reading, UK.
- Pardo M, Leiva A (2009) Combination of technologies for the dehydration of pineapple. *Ingen. Compet.* 11: 57-65.
- Prothon F, Ahrne LM, Funebo T, Kidman S, Langton M, Sjöholm I (2001) Effects of combined osmotic and microwave dehydration of apple on texture, microstructure and rehydration characteristics. *Lwt-Food Sci. Technol.* 34: 95-101.
- Rahman SMA, Mujumdar AS (2008) A novel atmospheric freeze-drying system using a vibro-fluidized bed with adsorbent. *Drying Technol.* 26: 393-403.
- Rastogi NK, Raghavarao K, Niranjan K, Knorr D (2002) Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer. *Trends Food Sci. Technol.* 13: 48-59.
- Ratti C (2001) Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *J. Food Eng.* 49: 311-319.
- Reyes A, Vega R, Bustos R, Araneda C (2008) Effect of processing conditions on drying kinetics and particle microstructure of carrot. *Drying Technol.* 26: 1272-1285.
- Sagara Y (2001) Structural models related to transport properties for the dried layer of food materials undergoing freeze-drying. *Drying Technol.* 19: 281-296.
- Schubert HMR (2006) Novel and traditional microwave applications in the food industry. In Willert-Porada M (Ed.) *Advances in Microwave and Radio Frequency Processing*. Springer, Berlin, Germany. pp. 259-270.
- Taiwo KA, Eshtiaghi MN, Ade-Omowaye BIO, Knorr D (2003) Osmotic dehydration of strawberry halves: influence of osmotic agents and pretreatment methods on mass transfer and product characteristics. *Int. J. Food Sci. Technol.* 38: 693-707.
- Wang R, Zhang M, Mujumdar AS, Sun JC (2009) Microwave Freeze-Drying Characteristics and Sensory Quality of Instant Vegetable Soup. *Drying Technol.* 27: 962-968.
- Wolf E (1990) Atmospheric freeze-drying .1. Design, experimental investigation and energy-saving advantages. *Drying Technol.* 8: 385-404.
- Xu YY, Zhang M, Mujumdar AS, Duan X, Jin-Cai S (2006) A two-stage vacuum freeze and convective air drying method for strawberries. *Drying Technol.* 24: 1019-1023.
- Zhang M, Tang J, Mujumdar AS, Wang S (2006) Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends Food Sci. Technol.* 17: 524-534.