



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



INSTITUTO DE INGENIERÍA DE
ALIMENTOS PARA EL DESARROLLO

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

IMPACTO DE LA GOMA ARÁBIGA Y FIBRA DE BAMBÚ EN LA REHIDRATACIÓN DEL POMELO LIOFILIZADO

TRABAJO FIN DE MÁSTER UNIVERSITARIO EN CIENCIA E
INGENIERÍA DE LOS ALIMENTOS

ALUMNO/A: MARÍA DEL CARMEN ALCALÁ VAQUER

TUTOR/A ACADEMICO: NURIA MARTÍNEZ-NAVARRETE

DIRECTOR EXPERIMENTAL: CAROLINA CONTRERAS MONZÓN

Curso Académico: 2016-2017

VALENCIA, 14 de Septiembre de 2017

IMPACTO DE LA GOMA ARÁBIGA Y FIBRA DE BAMBÚ EN LA REHIDRATACIÓN DEL POMELO LIOFILIZADO

Alcalá, M.C.¹; Martínez-Navarrete, N.¹; Contreras, C.²

RESUMEN

La liofilización es un proceso tecnológico que permite obtener fruta en polvo de alta calidad. Su rehidratación, en las condiciones adecuadas, proporciona un zumo de la fruta también de alta calidad. Para favorecer el proceso y mejorar la estabilidad de la fruta en polvo, es frecuente la incorporación de solutos de alto peso molecular, lo que puede afectar a su posterior rehidratación, así como a las características del producto rehidratado. En este trabajo se caracterizó el comportamiento frente a la rehidratación de un producto liofilizado a base de pomelo, así como también el tamaño de partícula y propiedades ópticas del producto rehidratado. Se analizó la influencia de la incorporación, a diferentes concentraciones, de goma arábica y fibra de bambú como estabilizantes del producto liofilizado. Para ello se estudió la solubilidad de cada muestra liofilizada formulada, registrando el aumento de sólidos solubles con el tiempo de rehidratación, a 5, 15 y 25 °C. A las muestras rehidratadas se les analizó el tamaño de partícula por difracción láser y el color en el espacio CIE L*a*b*a partir del espectro de transmitancia. Los resultados obtenidos parecen indicar la buena solubilidad de los biopolímeros añadidos, a cualquiera de las temperaturas estudiadas, el comportamiento inicial de las muestras frente a la rehidratación se ve algo dificultado por estos, aunque favorecido por el pretratamiento de microondas. En cuanto a la caracterización del producto rehidratado, la adición de biopolímeros afectó significativamente al tamaño de partícula y a las propiedades ópticas. No obstante, el pequeño efecto observado en este sentido, recomienda su uso.

PALABRAS CLAVE: pomelo liofilizado en polvo, biopolímeros estabilizantes, rehidratación, solubilidad, tamaño de partícula, color.

RESUM

La liofilització és un procés tecnològic que permetria obtenir fruita en pols d'alta qualitat. La seva rehidratació, en les condicions adequades, proporcionarà un suc de fruita també d'alta qualitat. Per afavorir el procés i millorar l'estabilitat de la fruita en pols, és freqüent la incorporació de soluts d'alt pes molecular, el que pot afectar la seva posterior rehidratació, així com a les característiques del producte rehidratat. En aquest treball es va

¹ Grupo de Investigación e Innovación Alimentaria (CUINA). Departamento de Tecnología de Alimentos. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n. 46022. Valencia.

² Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos para el Desarrollo. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n. 46022. Valencia.

caracteritzar el comportament enfront la rehidratació d'un producte liofilitzat a base de pomelo, així com també la mida de partícula i propietats òptiques del producte rehidratat. Es va analitzar la influència de la incorporació, a diferents concentracions, de goma aràbiga i fibra de bambú com a estabilitzants del producte liofilitzat. Per a això es va estudiar la solubilitat de cada mostra liofilitzada formulada, registrant l'augment de sòlids solubles amb el temps de rehidratació, a 5, 15 i 25 °C. A les mostres rehidratades se'ls va analitzar la mida de partícula per difracció làser i el color en l'espai CIE L * a * b * a partir de l'espectre de transmissió. Els resultats obtinguts semblen indicar la bona solubilitat dels biopolímers afegits, a qualsevol de les temperatures estudiades, el comportament inicial de les mostres enfront de la rehidratació es veu una mica dificultat per aquests, encara que afavorit pel pretractament de microones. Pel que fa a la caracterització del producte rehidratat, l'addició de biopolímers va afectar significativament a la mida de partícula i a les propietats òptiques. No obstant això, el petit efecte observat en aquest sentit, recomana el seu ús.

PARAULES CLAU: pomelo liofilitzat en pols, biopolímers estabilitzants, rehidratació, solubilitat, mida de partícula, color.

ABSTRACT

Freeze-drying is a technological process that would allow obtaining high quality fruit powder. Its rehydration, in the right conditions, will provide a fruit juice also of high quality. In order to favor the process and to improve the stability of the powdered fruit, the incorporation of high molecular weight solutes is frequent, which can affect its subsequent rehydration, as well as the characteristics of the rehydrated product. In this work the rehydration behavior of a freeze-dried product based on grapefruit was characterized, as well as the particle size and optical properties of the rehydrated product. The influence of the incorporation, at different concentrations, of gum arabic and bamboo fiber as stabilizers of the freeze-dried product was analyzed. To this end, the solubility of each freeze-dried sample was studied, recording the increase of soluble solids with the rehydration time, at 5, 15 and 25 °C. The rehydrated samples were analyzed for particle size by laser diffraction and color in the CIE L*a*b* space from the transmittance spectrum. The results obtained seem to indicate the good solubility of the added biopolymers, at any of the temperatures studied, although the initial behavior of the samples against rehydration is somewhat hampered by these, while favored by microwave pretreatment. Regarding the characterization of the rehydrated product, the addition of biopolymers significantly affected particle size and optical properties. However, the small effect observed in this regard, recommends its use.

KEYWORDS: freeze-drying grapefruit powder, stabilizing biopolymers, rehydration, solubility, particle size, color.

INTRODUCCIÓN

Es bien conocido que las frutas tienen un papel muy importante en el equilibrio de la dieta humana, siendo su consumo sinónimo de salud y de protección frente a diversas enfermedades. En particular, las frutas cítricas son las de consumo más frecuente debido a sus reconocidas propiedades beneficiosas para la salud como también por su amplia disponibilidad estacionaria. Conforme a los datos publicados por la FAO el pomelo (*Citrus paradisi*) es el cuarto cítrico con mayor producción mundial detrás de las naranjas, mandarinas y limones (FAO, 2012). Desde el punto de vista nutricional, esta fruta es una fuente muy importante de vitamina C, fenoles y β -caroteno, proporcionando beneficios saludables debido a su capacidad antioxidante (Xu et al., 2008; Igual et al., 2010). No obstante, su marcado sabor amargo consecuencia de su alto contenido de naringina (flavanona glicosilada), reduce su consumo en fresco por lo que se consume principalmente transformado en mermeladas o en zumos (Infoagro, 2010). En España la variedad de pomelo más consumida es la Star Ruby ya que posee mejor sabor y un color más intenso debido a la mayor presencia de licopeno (Kimball, 1999).

A pesar de que la ingesta de fruta fresca es la mejor manera de aprovechar todas sus propiedades nutritivas, en la actualidad, los nuevos estilos de vida llevan al consumidor a sustituir los productos frescos por productos procesados, pero buscando siempre que éstos posean características similares a las del producto fresco en cuanto a propiedades nutricionales y organolépticas. Debido a ello, el desafío tecnológico es conseguir elaborar productos atractivos para el consumidor que respondan y respeten sus necesidades. Métodos tan frecuentes como lo es la reducción del contenido de agua de los productos han sido ampliamente utilizados por la industria para extender la vida útil y disponibilidad de los alimentos. Al respecto, la liofilización es una técnica que permite la obtención de productos de muy baja humedad y una notable calidad sensorial, nutritiva y funcional debido a las condiciones del proceso (Ghio et al., 2000; Barbosa-Cánovas et al., 2005; López et al., 2006). La liofilización se basa en la eliminación de agua por sublimación, con lo que se consigue reducir la actividad del agua a niveles adecuados para evitar el deterioro microbiano y la pérdida de calidad debida a reacciones bioquímicas indeseables, evitando pérdidas organolépticas y nutricionales, reduciendo al mínimo el daño térmico sobre los componentes termolábiles (Igual et al., 2010). El producto resultante presenta una estructura porosa con excelentes propiedades de rehidratación, lo que puede contribuir en la comercialización de productos de alto valor añadido y contrarrestar el alto coste del tratamiento (Barbosa-Cánovas et al., 2005; Mosquera, 2010).

Desde el punto de vista de la investigación y de la innovación se vuelve fundamental estudiar el comportamiento de los diferentes productos obtenidos en función de los procesos de elaboración a los que han sido sometidos, con el objetivo de caracterizarlos y evaluarlos persiguiendo el máximo beneficio para el consumidor. Si el objetivo es elaborar alimentos en polvo, para su consumo como tales o una vez rehidratados, una

consideración importante a tener en cuenta es obtener un adecuado nivel higroscópico que no favorezca fenómenos relacionados con el colapso de la estructura en relación con el desarrollo de fenómenos de pegajosidad, apelmazamiento y/o cristalización de solutos, frecuentes en polvos con baja actividad del agua y elevado contenido en azúcares, como es el caso de las frutas. Con el fin de evitar este problema y mejorar el rendimiento del proceso y la calidad del producto es frecuente la adición de biopolímeros tales como gomas, pectinas y fibras que aporten un efecto encapsulante, antihumectante y antiapelmazante (Krishnan et al., 2005). La goma arábica, polisacárido natural (E-414), suele ser ampliamente utilizada en la industria alimentaria por sus propiedades texturizantes, gelificantes, estabilizantes y emulsificantes, además de presentar una alta solubilidad en agua (Badui, 2013). El uso de fibra de bambú es menos frecuente en alimentos, no obstante las nuevas tendencias tecnológicas ya la incluyen en productos cárnicos y de confitería (Igual et al., 2014; Sigma, 2017) a fin de optimizar la textura de los productos.

Al tratarse de productos en polvo, se debe potenciar ciertas características deseables en este tipo de alimentos deshidratados tales como presentar buen comportamiento frente a su reconstitución, siendo la capacidad y velocidad de rehidratación dos atributos de calidad ampliamente evaluados en bibliografía, al ser considerados como una medida del daño producido en el material durante el secado (Meda y Ratti, 2005, McMinn y Magge, 1997; Lewick, 1998). Una situación óptima sería esperar que, si no existen efectos adversos sobre la integridad del tejido, éste absorbiese agua llegando al mismo contenido de humedad que el producto original. No obstante, no es frecuente encontrar conductas reversibles en matrices alimentarias (Senadeera et al., 2000). A efectos prácticos es de gran utilidad poder describir el comportamiento cinético frente a la rehidratación mediante expresiones matemáticas que permitan la comparación entre productos. Un modelo sencillo es el propuesto por Peleg (1988), el cual relaciona las variaciones en el contenido de humedad con dos constantes cinéticas asociadas con la velocidad inicial de transferencia de masa y con la máxima capacidad de solubilización, en función del tiempo de proceso. La aplicación de este modelo se incluye en diversas publicaciones científicas vinculadas con estudios de rehidratación de alimentos de baja humedad (Contreras et al., 2012a; Vasanth Kumar et al., 2011; Shafaei, et al., 2016).

Complementariamente, un aspecto interesante de los productos en polvo reconstituidos es conocer la distribución de tamaño de partícula de las partículas no solubilizadas, dado que esta característica puede llegar a ser de gran importancia en muchos de sus aspectos tecnológicos en cuanto a que puede afectar a la uniformidad y estabilidad del producto final, así como también influir en las propiedades ópticas y en el comportamiento reológico (Allen, 1992). Para sistemas en suspensión, la solubilidad a menudo está directamente relacionada con el tamaño de partícula debido a su influencia en la velocidad de disolución, a menor tamaño mayor velocidad (Contreras et al., 2012b). Existen múltiples métodos para la caracterización del tamaño de partículas, no obstante la tecnología por difracción láser se ha convertido en el estándar preferido en muchas industrias para la evaluación y control de

calidad, siendo el rango de aplicación de acuerdo con la norma ISO13320 de 0.1 a 3000 μm (AENOR, 2009).

Las propiedades mencionadas pueden influir en mayor o menor medida en el color, uno de los parámetros sensoriales más valorados por los productores y consumidores, buscando siempre la aceptación del producto final vinculado con el recuerdo de la materia prima a partir de la cual ha sido obtenido. La concentración de pigmentos, protagonistas del color, puede verse fácilmente afectada a consecuencia de los tratamientos aplicados para el procesado de la fruta, pudiendo deteriorarse su calidad por reacciones de pardeamiento, ya sean oxidativas, enzimáticas o de Maillard (Igual, 2011). Además, los ingredientes que se hayan podido añadir al producto para facilitar su procesado y/o almacenamiento también pueden afectar al color. Un método frecuentemente utilizado para evaluar objetivamente las propiedades ópticas es la espectrocolorimetría, a través de la comparación de las coordenadas de color del espacio CIE $L^*a^*b^*$, lo que nos permite caracterizar el producto en cuanto a su luminosidad, su pureza de color y su tono, así como también detectar variaciones en el color asociadas a los procesos de elaboración.

Teniendo en cuenta los antecedentes comentados, el objetivo de este estudio ha sido conocer el impacto de la incorporación de los biopolímeros goma arábica y fibra de bambú a un triturado de pomelo, previo a su liofilización, en la solubilidad del producto obtenido, así como en el tamaño de partícula y color del producto rehidratado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materias primas y preparación de las muestras

En este estudio se trabajó con tres muestras liofilizadas de pomelo con biopolímeros añadidos, con el objetivo de evitar el apelmazamiento del producto en polvo, las cuales fueron posteriormente rehidratadas. Las tres formulaciones preparadas fueron seleccionadas teniendo en cuenta los resultados de estudios previos llevados a cabo por Agudelo et al. (2014), enfocados a la obtención de un producto en polvo con óptimas características sensoriales (humedad, higroscopicidad, porosidad y color) o con alto valor funcional (contenido en carotenoides, fenoles, vitamina C y actividad antioxidante) o un producto que combinase ambos aspectos. En este sentido, a efectos de nomenclatura, las tres muestras han sido identificadas como S^+ , F^+ y $S^+ \& F^+$, respectivamente.

Para la preparación de las muestras se utilizaron pomelos (*Citrus paradisi*) de la variedad Star Ruby, adquiridos en un supermercado local de la ciudad de Valencia. Las piezas fueron seleccionadas teniendo en cuenta su firmeza, tamaño, color visual y la ausencia de daños físicos y fisiológicos en la superficie. Los biopolímeros utilizados como ingredientes fueron goma arábica (Sigma-Aldrich, USA) y fibra de bambú (VITACEL®, Rosenberg, Alemania). Las piezas de pomelo fueron lavadas y peladas, eliminando el albedo y las semillas, seguidamente se trituraron en un robot de cocina

(Thermomix TM 21, Vorwerk, España), a velocidad 9 durante 40 segundos. A 1 kg de pomelo triturado (de humedad media de $88\pm 1\%$) se le añadió la goma arábica y la fibra de bambú necesarias según cada formulación preparada (tabla 1) y se mezcló durante 40 segundos más. Para conseguir la humedad final deseada, las muestras F^+ y $S^+&F^+$ se sometieron a un proceso de deshidratación parcial por microondas (Ultimys Duo Comby, Moulinex, Francia), empleando esta tecnología dado que diversos estudios destacan que la deshidratación mediante microondas ayuda a minimizar la pérdida de calidad de los productos (Igual et al., 2010; Benlloch-Tinoco et al., 2015a; Benlloch-Tinoco et al., 2015b; Contreras et al., 2017). Para ello las muestras fueron colocadas en bandejas de teflón y sometidas a una potencia de 2 W/g. La duración del proceso para la reducción de la humedad fue ajustada aplicando el respectivo balance de masa conocidas la humedad inicial de la muestra y la humedad final deseada. Por otra parte, a la muestra S^+ se le adicionó la cantidad de agua necesaria, calculada igualmente con el correspondiente balance de masa, para cumplir con las especificaciones de la tabla 1. Una vez alcanzadas las especificaciones, las muestras fueron inmediatamente congeladas a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 48 h y posteriormente liofilizadas (LyoAlfa-6, Telstar Technologies, España) durante 24 horas (0.021 mPa y $-59\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el condensador). Para obtener el producto en polvo, las muestras liofilizadas fueron trituradas (Thermomix TM 21, Vorwerk, España) y tamizadas (luz de malla 0.7 mm), realizándose esta operación en un habitáculo con temperatura controlada y provisto de un deshumidificador a fin de obtener las condiciones ambientales que minimizasen la ganancia de humedad de las muestras. Las muestras en polvo finalmente obtenidas se envasaron a vacío y se almacenaron en un desecador con sílica gel hasta el momento de su rehidratación.

TABLA 1. Formulación de las muestras previo a la liofilización

	Goma arábica (g/kg pomelo triturado)	Fibra de bambú (g/kg pomelo triturado)	Humedad de la muestra (g agua/100g mezcla)
S^+	7.3	0	94
F^+	38	4.7	71
$S^+&F^+$	26	3.2	80

El contenido de agua de la mezcla del pomelo triturado con los biopolímeros y también la del producto liofilizado fue determinado, por triplicado, según el método 20.013 (AOAC, 1980) para frutas ricas en azúcar. Las muestras fueron colocadas en una estufa a vacío (Vacioterm, JP. Selecta, España) a una presión de 50 mm Hg y una temperatura de $60\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar el peso constante (diferencia de peso ≤ 0.001). La humedad fue calculada a partir de la diferencia de peso de las muestras antes y después de ser sometidas al secado, determinada con una balanza analítica (PB 303-L, Mettler Toledo, Suiza).

Comportamiento de la muestra liofilizada frente a su rehidratación

El estudio del comportamiento del producto liofilizado frente a la rehidratación se realizó, por duplicado, a tres temperaturas de interés: 5, 15 y 25 °C. Teniendo en cuenta la humedad de las muestras liofilizadas se estimó la cantidad necesaria de producto en polvo y de agua a mezclar para obtener 25 mL de producto reconstituido con una humedad de 88 ± 1 g agua/100 g pomelo triturado (humedad del pomelo utilizado como materia prima). Para la rehidratación se utilizó un vaso con doble camisa conectado a un baño de temperatura controlada con recirculación continua (Refrigerated Circulator 9100, PolyScience, USA) y a un agitador magnético programado a 750 rpm. Se consideró la lectura de los °Brix (Refractómetro NAR-3T, Atago Co., Japón) como una cuantificación efectiva de los sólidos solubles, SS ($\text{g}_{\text{sólidos solubles}}/\text{100 g}_{\text{fase líquida}}$), en función del tiempo de rehidratación. Tan pronto se puso en contacto la muestra liofilizada con la respectiva masa de agua (bajo agitación y temperatura controlada) se realizó el control de los °Brix a diferentes tiempos del proceso: 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 150, 180, 210, 240, 300, 360, 420, 510, 600, 750 y 900 segundos. Con el objetivo de analizar la dependencia del proceso con la temperatura, los valores de sólidos solubles en el primer tiempo de control, SS^0 , fueron ajustados a la ecuación de Arrhenius (Ec. 1).

$$SS^0 = A * e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (1)$$

donde: A es una constante, E_a es la energía de activación ($\text{KJ} \cdot \text{mol}^{-1}$), R es la constante universal de los gases ($8.3145 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$) y T es la temperatura absoluta (K).

Por otra parte, los valores experimentales de °Brix en el producto rehidratado en función del tiempo (SS^t) fueron modelizados tomando como base teórica el modelo de Peleg adaptado a los valores obtenidos (Ec. 2).

$$SS^t = SS^0 + \frac{t}{K_1 + K_2 * t} \quad (2)$$

donde: t es el tiempo de rehidratación (s), SS^0 son los °Brix en el primer tiempo de control ($\text{g}_{\text{sólidos solubles}}/\text{g}_{\text{fase líquida}}$) y K_1 ($\text{s} \cdot \text{g}_{\text{fase líquida}}/\text{g}_{\text{sólidos solubles}}$) y K_2 ($\text{g}_{\text{fase líquida}}/\text{g}_{\text{sólidos solubles}}$) son las constantes del modelo.

El contenido teórico de los °Brix una vez alcanzado el equilibrio total de las muestras, SS_{eq} , fue estimado conforme la ecuación 3.

$$SS_{\text{eq}} = SS^0 + \frac{1}{K_2} \quad (3)$$

Caracterización del tamaño de partícula en el producto rehidratado

La distribución del tamaño de partículas del triturado de pomelo inicial y de las diferentes muestras reconstituidas (tras la rehidratación a 25 °C), fue determinada mediante difracción láser aplicando la teoría MIE, conforme con la normativa ISO 13320 (AENOR, 2009) a través de su dispersión por vía húmeda (Mastersizer 3000-hydroMV, Malvern Instruments Ltd., UK). Las muestras reconstituidas durante 180 s, según se justifica en los resultados, con índice de refracción 1.5 e índice de absorción 0.01, fueron dispersadas en agua (índice de refracción 1.33) mediante agitación continua. Se realizaron 10 lecturas de 10 segundos cada una. En la caracterización se tuvo en cuenta el tamaño medio (en μm), identificado como $D[4,3]$ y el ancho de la distribución identificado como Span (adimensional). Estos parámetros fueron obtenidos mediante el software Mastersizer 3000, versión 3.30, aplicando las respectivas ecuaciones 4 y 5 siendo n la cantidad de partículas de diámetro d y $d(0.1)$, $d(0.5)$ y $d(0.9)$ los percentiles matemáticos de la distribución.

$$D[4,3] = \frac{\sum_{i=1}^n n d_i^4}{\sum_{i=1}^n n d_i^3} \quad (4)$$

$$\text{Span} = \frac{d(0.9) - d(0.1)}{d(0.5)} \quad (5)$$

Determinación de las propiedades ópticas del producto rehidratado

La medición del color del triturado de pomelo inicial y de las diferentes muestras reconstituidas, tras la rehidratación a 25 °C, se realizó a partir del espectro de transmisión, obtenido midiendo en una cubeta con 20mm de paso de luz (CM-A999), utilizando para ello un espectrocolorímetro (CM 3600D, Minolta, Japón) y como referencia el observador suplementario 10° e iluminante D65. A partir del espectro de transmisión de las muestras, el equipo permitió obtener los valores de las coordenadas del espacio uniforme de color CIE $L^*a^*b^*$, así como las coordenadas psicométricas tono (h^*_{ab}) y croma (C^*_{ab}). Adicionalmente, con el fin de cuantificar los posibles cambios de color de las muestras rehidratadas durante su almacenamiento en refrigeración, se calculó la diferencia global de color (ΔE , Ec. 6) entre las muestras recién rehidratadas y después de permanecer almacenadas en refrigeración, a 5 °C, y en ausencia de luz durante $t = 1, 6, 24, 48$ y 72 h. Todas las muestras fueron analizadas por cuadruplicado.

$$\Delta E = \sqrt{(a_t^* - a_{t=0}^*)^2 + (b_t^* - b_{t=0}^*)^2 + (L_t^* - L_{t=0}^*)^2} \quad (6)$$

Análisis estadístico de los resultados

El análisis estadístico de los resultados obtenidos se realizó mediante un análisis de varianza (ANOVA). Para determinar las diferencias entre las

muestras para cada parámetro evaluado se utilizó el test de Tuckey a un nivel de significación del 95% utilizando para ello el software Statgraphics Plus (V.5.1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cinética de rehidratación

Todas las muestras liofilizadas presentaron un buen comportamiento frente a su rehidratación. La tabla 2 muestra los valores de °Brix en el primer (SS^0) y último (SS^f) tiempo de control, el contenido teórico de °Brix que presentaría cada muestra una vez alcanzado el equilibrio (SS_{eq}), en función de la temperatura de rehidratación, así como el valor de la energía de activación (E_a) para cada muestra. Como puede observarse en la tabla, el máximo tiempo de rehidratación establecido en el estudio fue suficiente para alcanzar el máximo contenido en sólidos solubles teórico.

TABLA 2. Valores medios (y desviación estándar) de los °Brix (SS , $g_{sólidos\ solubles}/100\ g_{fase\ líquida}$) a los tiempos de control $t=30\ s$ (superíndice 0), $t=900\ s$ (superíndice f) y en el equilibrio (subíndice eq) de las muestras S^+ , F^+ y $S^+&F^+$ (ver Tabla1) y valor medio de la respectiva energía de activación ($KJ \cdot mol^{-1}$).

Temperatura rehidratación (°C)	SS	S^+	F^+	$S^+&F^+$
5	SS^0	8.9 (0.4) ^{aA}	13.7 (0.7) ^{CA}	12.3 (0.6) ^{bA}
15		9.5 (0.5) ^{aAB}	13.9 (0.7) ^{CA}	12.8 (0.4) ^{bA}
25		9.8 (0.5) ^{aB}	14.5 (0.8) ^{CA}	13.2 (0.5) ^{bA}
5	SS^f	11.0 (0.6) ^{aA}	15.2 (0.8) ^{CA}	13.1 (0.7) ^{bA}
15		11.0 (0.6) ^{aA}	15.5 (0.8) ^{CA}	13.5 (0.7) ^{bA}
25		11.0 (0.6) ^{aA}	15.6 (0.8) ^{CA}	13.9 (0.7) ^{bA}
5	SS_{eq}	10.9 (0.5) ^{aA}	15.4 (0.8) ^{CA}	13.1 (0.7) ^{bA}
15		11.2 (0.6) ^{aA}	15.6 (0.8) ^{CA}	13.5 (0.7) ^{bA}
25		10.6 (0.5) ^{aA}	15.6 (0.8) ^{CA}	14.0 (0.7) ^{bA}
	E_a	3.3 (0.3) ^c	1.9 (0.2) ^a	2.5 (0.5) ^b

Letras minúsculas diferentes en el superíndice indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tipo de muestra. Letras mayúsculas diferentes en el superíndice indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre la temperatura de rehidratación para un mismo tipo de muestra.

Debido a la diferente composición de las muestras, la solubilización detectada en las mismas fue diferente, siendo las muestras S^+ y F^+ , con menos y más cantidad de biopolímeros añadidos, las que presentaron menores y mayores valores de SS^0 y SS^f , respectivamente. Los bajos valores de E_a que se obtienen, en comparación con otros valores encontrados en la bibliografía, como por ejemplo el presentado por Planinic et al., 2005, indican el escaso efecto de la temperatura en la solubilidad de estas muestras. De hecho, aunque fue posible apreciar la tendencia a incrementar SS^0 a una mayor temperatura de rehidratación, este efecto, en

la mayoría de casos, no llegó a ser significativo ($p > 0.05$). Los valores de SS^f y de (SS_{eq}) no se vieron afectados ($p > 0.05$) por la temperatura de rehidratación. En cualquier caso, a pesar del escaso efecto de la temperatura de rehidratación en SS^0 , la menor E_a de la muestra F^+ , obtenida al aplicar el ajuste de la ecuación de Arrhenius a los valores de sólidos solubles iniciales, indica que la solubilidad inicial de esta muestra es la que menos afectada se ve por el aumento de la temperatura de rehidratación. Por contra, la más afectada en este sentido fue la muestra S^+ . Los resultados obtenidos parecen indicar la buena solubilidad de los biopolímeros añadidos a cualquiera de las temperaturas estudiadas.

En la figura 1 es posible observar que los mayores cambios en la solubilidad de las muestras sucedieron durante los dos primeros minutos, tiempo aceptable en términos prácticos pensando en el esfuerzo que debería hacer el consumidor para rehidratar el producto. En este sentido, un tiempo de rehidratación no superior a 180 segundos sería suficiente para que todas las muestras alcanzasen el contenido teórico de $^{\circ}\text{Brix}$ estimado.

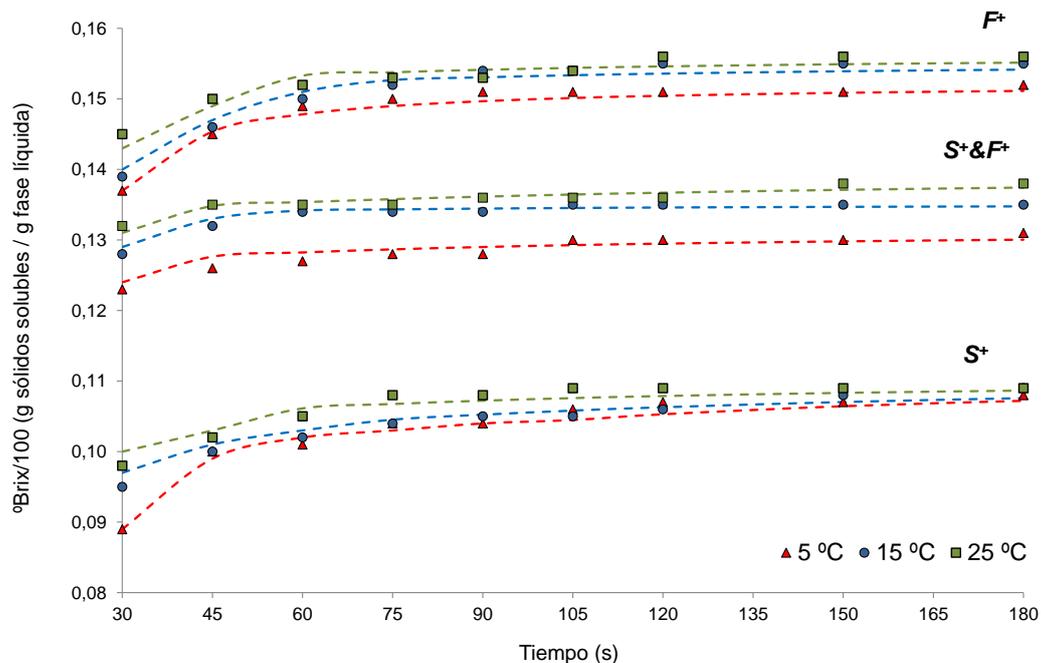


FIGURA 1. Valores experimentales de $^{\circ}\text{Brix}$ de las muestras durante la rehidratación (símbolos geométricos) junto a las curvas predichas por el modelo de Peleg (líneas discontinuas) para las diferentes muestras y temperaturas ensayadas.

El comportamiento observado fue modelizado adaptando la ecuación de Peleg a los cambios de los $^{\circ}\text{Brix}$. Los valores de las constantes K_1 y K_2 fueron obtenidos a partir de la representación gráfica de los resultados ajustados a la ecuación 2, tal como se observa en el ejemplo de la figura 2, correspondiendo K_1 a la ordenada en el origen y K_2 a la pendiente. El valor inverso de la constante K_1 nos indicaría la velocidad inicial de transferencia de masa, mientras que el valor inverso de K_2 nos daría la máxima capacidad

de solubilización. En todos los casos, el coeficiente de determinación, R^2 , fue aproximadamente 0.99, lo que confirma el buen ajuste obtenido entre los resultados experimentales y la ecuación propuesta, e indicaría que el modelo aplicado es adecuado para reproducir satisfactoriamente el comportamiento del producto liofilizado frente a su rehidratación en las condiciones ensayadas. Esto se confirma al observar la figura 1, en la que se muestra los valores experimentales junto con las respectivas curvas predichas mediante el modelo propuesto.

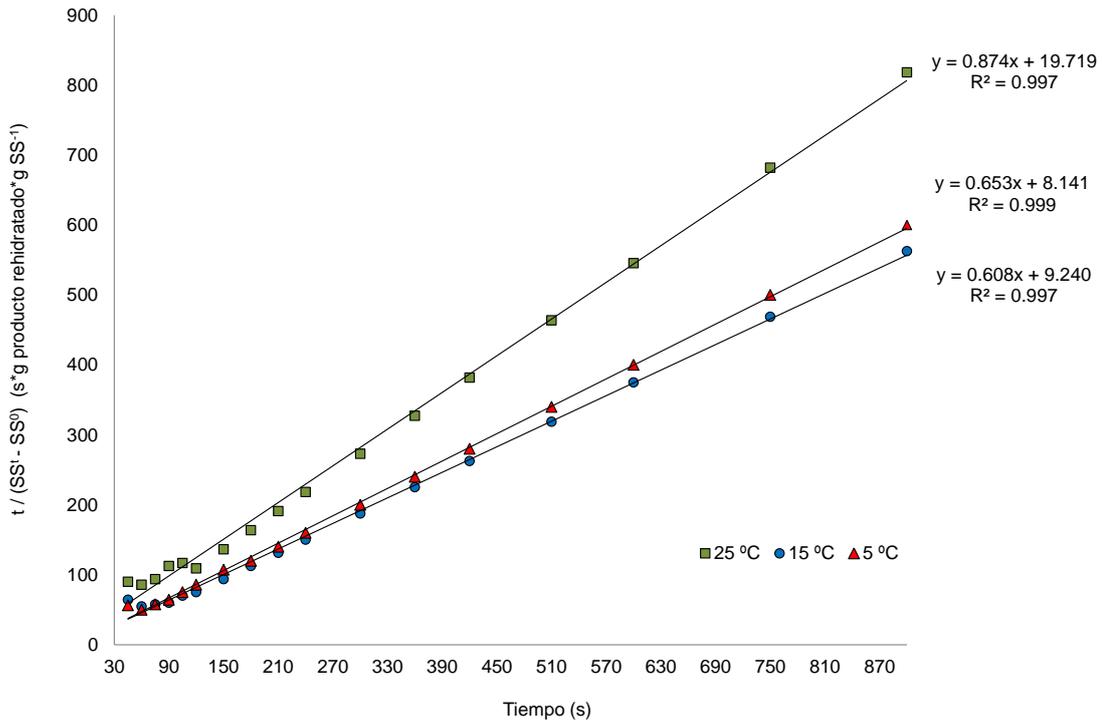


FIGURA 2. Ejemplo de la modelización de la rehidratación de la muestra F^+ a las diferentes temperaturas.

La tabla 3 recopila los valores de las constantes K_1 y K_2 para las diferentes muestras y condiciones de rehidratación. El análisis estadístico de los resultados confirmó, tal como era de esperar, que la diferente composición de las muestras afectó significativamente ($p < 0.05$) al comportamiento frente a la rehidratación. En términos globales, la muestra F^+ destaca por ser la que presentó mayor velocidad inicial y capacidad de rehidratación. Este efecto se reflejó en los valores menores de K_1 y K_2 . Siguiendo el mismo análisis, la muestra $S^+ \& F^+$ sería la que presentó un comportamiento cinético más desfavorable. Estos resultados podrían justificarse pensando en la mayor dificultad inicial que presentan los biopolímeros añadidos para su rehidratación y en el efecto que las microondas parecen ejercer en la degradación de la estructura de los tejidos celulares favoreciendo así la posterior rehidratación de las muestras. El mayor o menor peso de uno u otro aspecto, dependiendo de la cantidad de biopolímeros añadidos y de la intensidad del tratamiento, concuerdan con los resultados obtenidos. Respecto a la temperatura de rehidratación para un

mismo tipo de muestra, se observó que éste fue significativo ($p < 0.05$) sobre K_1 y K_2 en el sentido que la rehidratación tiende a ser más favorable a menores temperaturas (valores menores de las constantes cinéticas), sobre todo para las muestras S^+ y F^+ . No obstante hay que recordar el escaso efecto de la temperatura en la rehidratación de las muestras según el ajuste de Arrhenius comentado anteriormente.

TABLA 3. Valores medios (y desviación estándar) de las constantes K_1 ($S^+g_{\text{fase líquida}}/g_{\text{sólidos solubles}}$) y K_2 ($g_{\text{fase líquida}}/g_{\text{sólidos solubles}}$) obtenidos del ajuste del modelo de Peleg a la variación de sólidos solubles durante la rehidratación a diferentes temperaturas

Temperatura rehidratación	Constantes del modelo	S^+	F^+	$S^+ \& F^+$
5	K_1	14.5 (0.7) ^{bA}	8.1 (0.4) ^{aA}	44 (2) ^{cB}
15		32.8 (1.6) ^{cC}	9.2 (0.5) ^{aB}	12.9 (0.6) ^{bA}
25		26.2 (1.3) ^{bB}	19.72 (0.99) ^{aC}	103 (5) ^{cC}
5	K_2	0.45 (0.03) ^{aA}	0.65 (0.03) ^{bA}	1.17 (0.06) ^{cA}
15		0.61 (0.03) ^{aB}	0.61 (0.03) ^{aA}	1.41 (0.07) ^{bB}
25		0.79 (0.04) ^{aC}	0.87 (0.05) ^{aB}	1.27 (0.07) ^{bA}

Letras minúsculas en el superíndice indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tipo de muestra. Letras mayúsculas en el superíndice indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre la temperatura de rehidratación para un mismo tipo de muestra.

Caracterización del tamaño de partículas del producto rehidratado

Teniendo en cuenta los resultados observados en la rehidratación, previo al análisis del tamaño de partículas las muestras fueron rehidratadas durante 180 s a fin de asegurar conseguir el contenido de sólidos solubles en condiciones de equilibrio. La figura 4 muestra la distribución media del tamaño de partícula de las tres muestras. En términos generales las muestras presentaron una distribución monomodal, con tamaños medios entre 190 a 270 μm y valores de Span entre 3 a 4. La tabla 4 muestra los valores medios de los parámetros característicos para cada muestra, en la que se puede observar que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las muestras en cuanto al valor del diámetro medio de distribución en volumen ($D[4,3]$). Las muestras F^+ y $S^+ \& F^+$, son las que presentaron valores mayores, lo que indica que los biopolímeros añadidos proporcionan partículas de mayor tamaño tras la rehidratación. La menor proporción de solutos utilizados en la formulación de la muestra S^+ (únicamente goma arábica) podría ser la responsable del menor valor de $D[4,3]$ y del Span, consiguiendo obtener una muestra rehidratada formada por partículas de menor tamaño y, por tanto, más homogénea.

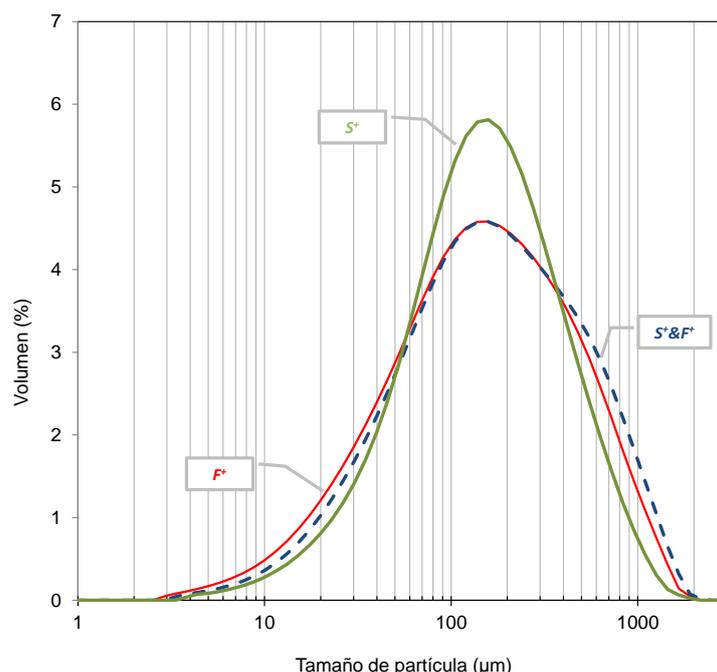


FIGURA 3. Distribución media del tamaño de partículas de las muestras rehidratadas.

TABLA 4. Valores medios (y desviación estándar) del tamaño de partículas (μm), del Span (adimensional) de las muestras de pomelo rehidratadas.

	S^+	F^+	$S^+ \& F^+$
$D[4,3]$	204 (14) ^a	255 (17) ^b	229 (15) ^b
Span	3.0 (0.2) ^a	3.90 (0.17) ^b	4.0 (0.2) ^b

Letras minúsculas en el superíndice indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tipo de muestra

El procesado empleado en la elaboración de las muestras (adición de biopolímeros, liofilización, trituración, rehidratación) afecta directamente a las características del producto final, por lo que no es de extrañar que la caracterización de las muestras rehidratadas difiera significativamente de lo obtenido por el triturado de pomelo inicial el cual presentó valores característicos de $D[4,3]$ de $670 \pm 16 \mu\text{m}$ y Span de 1.95 ± 0.05 . El proceso de congelación, sublimación y sobre todo la trituración de la muestra liofilizada dañaría la integridad de la fibra de la fruta por lo que su reconstitución se vería afectada, tal como lo refleja el menor tamaño descrito.

Propiedades ópticas del producto rehidratado

Las muestras fueron previamente rehidratadas durante 180 s a fin de asegurar conseguir el contenido de SS_{eq} . La caracterización de los productos recién rehidratados se muestra en la tabla 5. Las tres muestras presentan diferencias significativas entre ellas ($p < 0.05$), siendo la muestra F^+ la que más difiere de las otras dos, en cuanto a menor luminosidad y menor componente amarilla, esto último influye a su vez en menor croma y ángulo

de tono. La mayor proporción de goma arábica y fibra de bambú adicionados para la formulación de esta muestra podría estar influyendo en éstos resultados.

En general, tomando como referencia las coordenadas de color obtenidas para el triturado de pomelo fresco ($L^*=27.29\pm 0.05$, $a^*=23.63\pm 0.02$, $b^*=37.70\pm 0.06$), los tres productos rehidratados presentan similar componente roja pero menor componente amarilla y luminosidad.

TABLA 5. Valores medios (y desviación estándar) de las coordenadas de color L^* , a^* , b^* y de los atributos croma (C^*_{ab}) y tono (h^*_{ab}), de las muestras rehidratadas

	S^+	F^+	$S^+ \& F^+$
L^*	11.69 (0.02) ^b	8.954 (0.008) ^a	11.12 (0.04) ^c
a^*	26.46 (0.04) ^c	25.89 (0.09) ^b	25.24 (0.04) ^a
b^*	19.82 (0.04) ^c	15.234 (0.008) ^a	18.89 (0.09) ^b
C^*_{ab}	33.064 (0.012) ^c	30.04 (0.08) ^a	31.52 (0.06) ^b
h^*_{ab}	36.84 (0.09) ^b	30.47 (0.09) ^a	36.82 (0.16) ^b

Letras minúsculas en el superíndice indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tipo de muestra

Se evaluó el cambio de color de este producto rehidratado almacenado en refrigeración, asumiendo que ésta sería una atractiva forma de consumo. Se consideró como período máximo de control 3 días dado que podría esperarse que pasado este tiempo la calidad global del producto pudiese verse afectada. La evolución de los parámetros de color se observa en la figura 5. Únicamente la muestra S^+ presentó cambios significativos, con una importante disminución de la luminosidad y en la coordenada b^* (disminución de tonalidad amarilla), lo que conlleva a una pérdida de pureza de color y tono. Esto podría estar indicando un efecto estabilizante de los biopolímeros añadidos en los pigmentos responsables de dar color a las muestras.

Desde un punto de vista sensorial, autores como Bodart et al. (2008) señalan que valores de ΔE inferiores a 3 representan diferencias de color imperceptibles al ojo humano. Teniendo en cuenta esta consideración y los valores de ΔE mostrados en la tabla 6, es posible reforzar que sólo la muestra S^+ fue la que presentó cambios ópticos importantes que podrían tener cierta influencia a la hora de su consumo durante un período de almacenamiento refrigerado que supere las 24 horas.

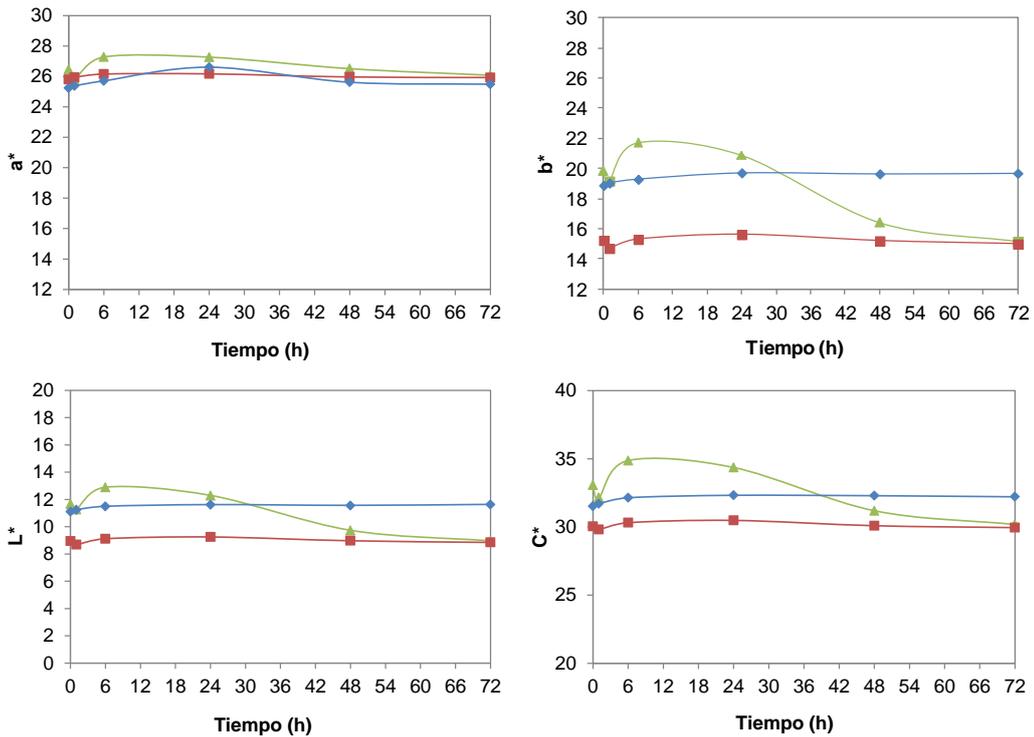


FIGURA 4. Evolución de las propiedades ópticas durante el almacenamiento refrigerado de las muestras rehidratadas: (-▲-) S^+ , (-■-) F^+ , (-◆-) $S^+&F^+$

TABLA 6. Diferencia global de color (ΔE) durante el almacenamiento refrigerado con respecto a la muestra recién rehidratada

	ΔE_{1h}	ΔE_{6h}	ΔE_{24h}	ΔE_{48h}	ΔE_{72h}
S^+	1.0	2.4	1.5	3.9	5.4
F^+	0.6	0.4	0.6	0.2	0.3
$S^+&F^+$	1.8	0.7	1.7	1.0	1.0

CONCLUSIONES

Las muestras liofilizadas presentaron buen comportamiento frente a su rehidratación, viéndose éste afectado significativamente por la composición inicial del producto y por el pretratamiento de microondas. La adaptación del modelo de Peleg a los cambios en los °Brix de las muestras reprodujo satisfactoriamente el comportamiento frente a su rehidratación en las diferentes condiciones. Los biopolímeros añadidos dificultan el comportamiento inicial de las muestras frente a la rehidratación y las microondas lo favorecen. De la caracterización del producto rehidratado se concluye que la formulación del liofilizado afectó significativamente al tamaño de partículas y a las propiedades ópticas. A mayor cantidad de biopolímeros adicionados, mayor tamaño medio de partículas y mayor estabilidad en el color. No obstante, teniendo en cuenta el beneficio que

comportan los biopolímeros desde el punto de vista de la estabilidad del producto liofilizado frente a los fenómenos de colapso de su estructura, también desde el punto de vista de su comportamiento frente a la rehidratación se recomienda su incorporación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer la ayuda recibida por parte del Ministerio de Economía y Competitividad, a través del proyecto AGL 2012-39103, que ha permitido la realización de la parte experimental de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- AOAC. 1980. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemist. 15th ed. Washington DC, USA: Horwitz, W.
- AENOR. 2009. Particle size analysis-Laser diffraction methods. ISO 13320:2009.
- Agudelo, C., Marchirant, E., Martínez-Lahuerta, J.J., Igual, M., Martínez-Navarrete, N. 2014. Optimization of grapefruit pulp formulation for freeze-drying. Delegate Abstract Book Innovations in Attractive and Sustainable Food for Health. 28th EFFoST Conference, página 41.
- Allen, T. 1992. Particle Size Measurement. 4th Edition. Chapman & Hall, London.
- Badui, S. 2013. Química de los alimentos. 4th Edition. Grupo Herdez, S.A. de C.V.
- Barbosa-Canovas, G., Ortega-Rivas, E., Juliano, P., Yan, H. 2005. Food powders: physical properties, processing and functionality. Kluwer Academic/Plenum Publisher, New York, 372.
- Benlloch-Tinoco, M., Kaulmann, A., Corte-Real, J., Rodrigo, D., Martínez Navarrete, N. Bohn, T. 2015a. Chlorophylls and carotenoids of kiwifruit puree are affected similarly or less by microwave than by conventional heat processing and storage. *Food Chemistry*, 187:254-262.
- Benlloch-Tinoco, M., Igual, M., Rodrigo, D., Martinez Navarrete, N. 2015b. Superiority of microwaves over conventional heating to preserve shelf-life and quality of kiwifruit puree. *Food Control*, **50**: 620-629
- Bodart, M., Peñaranda, R., Deneyerc, A., Flamant, G. 2008. Photometry and colorimetry characterization of materials in daylighting evaluation tools. *Building and Environment*, **43(12)**:2046-2058.
- Contreras, C., Martín Esparza, M., Martínez-Navarrete, N. 2012a. Influence of drying method on the rehydration properties of apricot and apple. *Journal of Food Process Engineering*, **35(2)**:178–190.
- Contreras, C., Igual, M., Martínez-Navarrete, N. 2012b. Physicochemical properties of bamboo fibre and jams added with bamboo fibre. *Advances in Chemistry Research. Bamboo: Ecology, Management and Conservation*. Nova Science Publishers, Inc. New York, 3: 57-78.
- Contreras, M. Benlloch-Tinoco, D. Rodrigo, N. Martínez-Navarrete. 2017. Impact of microwave processing on nutritional, sensory, and other quality attributes. *The Microwave Processing of Foods*. (Second Edition), 65-99.
- FAO. 2012. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Frutos cítricos frescos y elaborados. Estadísticas anuales 2012. *CCP:CI/ST/2012*, [En línea]. Dirección URL: <<http://www.fao.org>>. [Consulta: 22 Mar. 2015].
- Ghio, S., Barresi, A.A., Rovero, G. 2000. A Comparison of Evaporative and Conventional freezing prior to freeze-drying of fruits and vegetables. *Food Bioproducts Processing*, **78(4)**: 187-192.

- Igual, M., García-Martínez, E., Camacho, M. M., Martínez-Navarrete, N. 2010. Effect of thermal treatment and storage on the stability of organic acids and the functional value of grapefruit juice. *Food Chemistry*, **118**: 291-299.
- Igual, M., Contreras, C., Martínez-Navarrete, N. 2014. Colour and rheological properties of non-conventional grapefruit jams: Instrumental and sensory measurement. *Food Science and Technology*, **56(1)**: 200-206.
- Igual, M. 2011. Calidad sensorial, nutritiva y funcional de productos de pomelo obtenidos por métodos no convencionales. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Infoagro. 2010. El cultivo del pomelo, [en línea]. Dirección URL: <<http://www.infoagro.com/citricos/pomelo.htm>> [Consulta: 25 Abr. 2016].
- Kimball, D. A., 1999. Procesado de cítricos. Ed. Acribia, S.A., Zaragoza, España.
- Krishnan, S., Kshirsagar, A.C., Singhal, S.R. 2005. The use of gum Arabic and modified starch in the microencapsulation of a food flavoring agent. *Carbohydrate Polymers*, **62(4)**: 309-315.
- Lewick, P. P. (1998). Some remarks on rehydration of dried foods. *Journal of Food Engineering*, **36(1)**, 81–87.
- López, H. O. D., Cernada, M. A., Fernández, C. R., Torres, A. L., Sanabria, G. M. L. 2006. Influencia del uso de aditivos sobre el rendimiento del proceso de secado por aspersión de extracto acuoso de *Calendula officinalis* L. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, **11(1)**: 1-8.
- McMinn, W. A. M. y Magee, T. R. A. (1997). Physical characteristics of dehydrated potatoes – part II. *Journal of Food Engineering*, **33(1–2)**: 49–55.
- Meda, L. y Ratti, C. (2005). Rehydration of freeze-dried strawberries at varying temperatures. *Food Process Engineering*, **28(3)**: 233-246.
- Mosquera, L. H. 2010. Influencia de la humedad y la adición de solutos (maltodextrina o goma arábiga) en las propiedades fisicoquímicas de borjón y fresa en polvo. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Peleg, M. (1988). An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, **53**: 1216-1219.
- Planinic, M., Velic, D., Tomas, S., Bilic, M., Bucic, A. 2005. Modelling of drying rehydration of carrots using Peleg's model. *European Food Research and Technology*, **221**:446-451.
- Senadeera, W., Bhandari, B., Young, G., Wijesinghe, B. 2000. Physical property changes of fruits and vegetables during hot air drying. Mujumdar A. S. (eds). *Drying technology in agriculture and food sciences*. Science Publishers, Inc., Enfield NH, USA, 162-176.
- Sigma.2017. La industria cárnica cada vez más adaptada a las nuevas tendencias [en línea]. Dirección URL: <<http://sigmabiotech.es/la-industria-carnica-cada-vez-mas-adaptada-a-las-nuevas-tendencias/>> [Consulta: 9 Sept. 2017].
- Shafaei, S.M., Masoumi, A.A., Roshan, H. 2016. Analysis of water absorption of bean and chickpea during soaking using Peleg model. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, **15(2)**:135-144.
- Vasanth Kumar, K., Souza, Hiléia K.S., Gupta V.K. 2011. On the initial reaction rate of Peleg's model for rehydration kinetics. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **42(2)**:278-280.
- Xu, G., Liu, D.; Chen, J., Ye, X., Ma, Y., Shi, J. 2008. Juice components and antioxidant capacity of citrus varieties cultivated in China. *Food Chemistry*, **106**: 545-551.