

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE ZUMO DE FRUTA OBTENIDO A PARTIR DE POMELO LIOFILIZADO.

Silva, M.A.; Agudelo, C.; Camacho, M.M.; Martínez-Navarrete, N.

RESUMEN

La estabilización de la mayor parte de los zumos de fruta existentes en el mercado se consigue por tratamientos térmicos intensos que perjudican sus características nutricionales, sensoriales y funcionales. La liofilización es un método de deshidratación que proporciona productos muy estables y de muy alta calidad, aunque no es frecuente su uso con este fin. La liofilización de un puré de fruta proporciona una torta que se puede triturar hasta obtener un polvo. En cualquiera de las dos formas, el producto puede rehidratarse para su consumo como zumo, aunque la viscosidad puede verse afectada. En este trabajo se ha estudiado el comportamiento reológico del zumo obtenido a partir de diferentes purés de pomelo liofilizados y rehidratados, en comparación con tres productos comerciales tipo zumo. Se ha trabajado con tres muestras de puré de pomelo formulado añadiendo goma arábica (GA) y fibra de bambú (FB) y acondicionado a diferente nivel de humedad (3,8 g GA+0,47 g FB/100 g puré, 71 g agua/100 g puré+solutos; 2,6 g GA+0,32 g FB/100 g puré, 80 g agua/100 g puré+solutos; 0,73 g GA/100 g puré, 94 g agua/100puré+solutos). Tras su liofilización (48 h a -55 °C y 0.021mPa) parte de la torta fue triturada (<0,7 mm). Tanto la torta como el polvo fueron rehidratados a 10, 20 y 30 °C. Se obtuvo la curva de flujo (0 a 150 s⁻¹ y a 20 °C) de estas muestras rehidratadas y de las comerciales. A las muestras rehidratadas a 20 °C se les caracterizó el comportamiento reológico también a 10 y a 30 °C. Los resultados mostraron que los zumos obtenidos a partir de las tortas muestran mayor viscosidad que los productos comerciales. Sin embargo, la trituración de la torta antes de su rehidratación permite disminuir la viscosidad del zumo obtenido. La selección adecuada del tamaño de partícula del producto triturado permitirá obtener la viscosidad deseada.

PALABRAS CLAVE: Liofilización, trituración, pomelo, rehidratación, reología, viscosidad, fruta, zumo.

RESUM

L'estabilització de la major part dels suc de fruita existents en el mercat s'aconsegueix per tractaments tèrmics intensos que perjudiquen les seues característiques nutricionals, sensorials i funcionals. La liofilització és un mètode de deshidratació que proporciona productes molt estables i de molt alta qualitat, encara que no és freqüent el seu ús amb este fi. La liofilització d'un puré de fruita proporciona una coca que es pot triturar fins a obtindre una pols. En qualsevol de les dos formes, el producte pot rehidratar-se per al seu consum com a suc, encara que la viscositat pot veure's afectada. En este treball s'ha estudiat el comportament reològic del suc obtingut a partir

de diferents purés de pomelo liofilitzats i rehidratats, en comparació amb tres productes comercials tipus suc. S'ha treballat amb tres mostres de puré de pomelo formulat afegint goma aràbiga (GA) i fibra de bambú (FB) i preparat a diferent nivell d'humitat (3,8 g GA+0,47 g FB/100 g puré, 71 g aigua/100 g puré+solutos; 2,6 g GA+0,32 g FB/100 g puré, 80 g aigua/100 g puré+solutos; 0,73 g GA/100 g puré, 94 g aigua/100 puré+solutos). Després de la seua liofilització (48 h a -55 °C i 0.021mPa) part de la coca va ser triturada (<0,7 mm). Tant la coca com la pols van ser rehidratats a 10, 20 i 30 °C. Es va obtenir la corba de flux (0 a 100 s⁻¹ i a 20 °C) d'estes mostres rehidratades i de les comercials. A les mostres rehidratades a 20 °C li sels va caracteritzar el comportament reològic també a 10 i a 30 °C. Els resultats van mostrar que els suc obtinguts a partir de les coques mostren major viscositat que els productes comercials. No obstant això, la trituració de la coca abans de la seua rehidratació permet disminuir la viscositat del suc obtingut. La selecció adequada de la grandària de partícula del producte triturat permetrà obtenir la viscositat desitjada.

PARAULES CLAU: Liofilització, trituració, pomelo, rehidratació, reologia, viscositat, fruita, suc.

ABSTRACT

Stabilization of most fruit juices available on the market is achieved by intense heat treatments that adversely affect its nutritional, sensory and functional characteristics. Freeze drying is a dehydration method that provides very stable and high quality products, although it is not common its use for juice purposes. Freeze drying of a fruit puree provides a cake that can be crushed to a powder. In either form, the product can be rehydrated for consumption as juice, although the viscosity can be affected. In this work we have studied the rheological behavior of juice obtained from different freeze-dried grapefruit purees and rehydrated, compared with three existing commercial juices. Three samples of grapefruit puree were formulated adding gum arabic (GA) and bamboo fiber (FB) and conditioned at different water content (3.8 g GA+0.47 g FB/100 g puree, 71 g water/100 g puree + solutes, 2.6 g FB GA+0.32 g/100 g puree, 80 g water/100 g puree+solute GA 0.73 g/100 g puree, 94 g water/100 g puree+solute). After lyophilization (48 h, -55 °C and 0.021mPa) a part of the cake was crushed (<0.7 mm). Both the cake and the powder were rehydrated at 10, 20 and 30 °C. The flow curve (0-100 s⁻¹ and 20 °C) of these rehydrated samples and the commercial ones was obtained. The rheological behavior of the samples rehydrated at 20 °C was also characterized at 10 and 30 °C. The results showed that the juices obtained from cakes show higher viscosity than the commercial products. However, crushing of the cake before rehydration allows to decrease the viscosity of the obtained juice. The proper selection of particle size of the ground product will allow to obtain the desired viscosity.

KEY WORDS: Freeze drying, crushing, grapefruit, rehydration, rheology, viscosity, fruit, juice.

1. INTRODUCCIÓN

Las frutas son componentes esenciales de una dieta saludable cuyo consumo diario suficiente podría contribuir a la prevención de enfermedades importantes, como las cardiovasculares y algunos cánceres. Esta protección es atribuida a su contenido en compuestos bioactivos como fitoquímicos, algunas vitaminas y fibra (De Ancos et al., 2000). El pomelo destaca por su alto contenido en vitamina C y en compuestos fenólicos, los cuales contribuyen a su capacidad antioxidante que puede producir efectos beneficiosos neutralizando la formación de radicales libres (Xu et al., 2008).

En general, se calcula que cada año podrían salvarse 1,7 millones de vidas si se aumentara lo suficiente el consumo de frutas y verduras. (OMS, 2015). El consumo de frutas frescas puede verse limitado por diferentes factores, entre ellos, la corta vida útil asociada a su alto contenido en agua. Actualmente, son muchos los productos procesados a base de fruta que existen en el mercado. No obstante, no es habitual su comercialización en forma de puré liofilizado. La liofilización es un método de deshidratación que elimina el agua de la fruta por sublimación. Con él se consiguen productos con alta calidad sensorial, nutritiva y funcional debido a las bajas temperaturas a las que se lleva a cabo el proceso, reduciendo al mínimo el daño térmico sobre los componentes termolábiles (Guio et al., 2000; Barbosa-Cánovas et al., 2005). La liofilización del puré de fruta supondría la obtención de una torta que podría consumirse como tal, si se le consigue dar una textura adecuada, o podría triturarse para la obtención de un polvo. Cualquiera de los dos formatos podría utilizarse para la preparación de zumos, infusiones, postres, productos lácteos, ensaladas, helados, entre otros, e incluso para el enriquecimiento en compuestos bioactivos de casi cualquier alimento.

La comercialización de la fruta deshidratada en estado vítreo contaría con las ventajas que supone su manipulación y almacenamiento, en relación con el menor volumen ocupado y con su estabilidad física, química y microbiológica. No obstante, podría presentar problemas relacionados con la transición vítrea de su matriz amorfa, relacionada con el aumento de la velocidad de las reacciones de deterioro y con el desarrollo de fenómenos de colapso conducentes a la pérdida de la estructura, que se vuelve extremadamente pegajosa. El paso del estado vítreo, altamente estable, al gomoso, más inestable, ocurre cuando se sobrepasa la temperatura de transición vítrea (T_g) de la muestra, lo que puede ocurrir, en productos deshidratados, por pequeños aumentos en la humedad o en la temperatura. Para prevenir esta situación indeseable, se ha señalado el uso de solutos de alto peso molecular, como goma arábica (GA) o fibra de bambú (FB), capaces de aumentar la temperatura de transición vítrea (Barbosa-Canovas et al., 2005; Gabas et al., 2007; Sablani et al., 2008; Silva et al., 2006; Telis y Martínez-Navarrete, 2009). La goma arábica, en concreto, ejerce una acción estabilizante sobre la estructura y textura del producto (Dickinson, 1992). Por otra parte, la liofilización es un proceso largo y energéticamente costoso. Si se pretende conseguir un producto liofilizado con un coste moderado, se debe tratar de optimizar el proceso. En este sentido, se ha visto que una

deshidratación previa del producto favorece el proceso (Iguar et al., 2010; Iguar et al., 2011, Benlloch et al., 2013).

Estudios previos realizados en el grupo de investigación en el que se enmarca este trabajo, han optimizado la formulación del puré de pomelo, en cuanto a la incorporación de GA, FB y contenido en agua, para obtener un producto liofilizado en polvo con las mejores características sensoriales (color, higroscopicidad y porosidad), nutricionales (vitamina C) y funcionales (fenoles totales, carotenoides totales, actividad antioxidante). Estas formulaciones se muestran en la tabla 1 (Agudelo et al., 2014; Machirant, 2014).

TABLA 1. Formulación del puré de pomelo que permite optimizar las características funcionales y/o sensoriales del polvo obtenido por liofilización.

Óptimo	x_w¹	GA²	FB³
Funcional	71	3,8	0,47
Funcional + sensorial	80	2,6	0,32
Sensorial	94	0,73	0

¹g agua/100 g puré+solutos; ²g goma arábica/100 g puré; ³g fibra de bambú/100 g puré.

Una de las formas de consumo de este liofilizado podría ser como zumo, previa rehidratación con el agua eliminada durante el proceso. Sin embargo, tanto los solutos incorporados como la etapa adicional de trituración de la torta para obtener el polvo, podrían afectar al comportamiento reológico del producto rehidratado, el cual es de gran importancia para la percepción del consumidor (Sherman, 1975). Conocer ambos efectos ha sido el objetivo de este estudio. Para ello se ha comparado el comportamiento reológico de los productos obtenidos por rehidratación de la torta y del polvo y también con el de productos comerciales similares.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materias Primas

2.1.1. FRUTA

Los pomelos (*Citrus paradise* var. Star Ruby) empleados en este estudio fueron adquiridos en un supermercado local de la ciudad de Valencia. La elección de los pomelos se realizó mediante inspección visual basándose en la homogeneidad del tamaño, color y buena integridad física.

2.1.2. ZUMOS COMERCIALES

Se adquirieron tres marcas diferentes de productos de pomelo tipo zumo en un supermercado local de la ciudad de Valencia, que llamaremos A, B y

C. La información composicional de cada uno de ellos, según sus etiquetas, es la siguiente: el producto A es un néctar de pomelo rosa con un contenido de fruta mínimo de 55 % elaborado a base de concentrado (52 %), agua, azúcar, pulpa de pomelo rosa (3 %) y vitamina C; el B es zumo de pomelo, no procedente de concentrado (zumo directo); C es zumo de pomelo exprimido con 2 % de pulpa.

2.1.3. SOLUTOS

Los solutos empleados como aditivos para la obtención del pomelo liofilizado fueron goma arábica (Scharlab, Sentmenat, Spain) y fibra de bambú (VITACEL®, Rosenberg, Germany).

2.2. Preparación de la muestra a liofilizar

Para la obtención del puré de pomelo se partió de fruta previamente lavada, pelada y cortada, que se trituró mediante un robot de cocina (Thermomix TM 21, Vorwerk, Spain) a velocidad 9 durante 40 s. Con el puré se prepararon 3 formulaciones con diferentes concentraciones de solutos y diferentes niveles de humedad previa a la liofilización, según lo señalado en la tabla 1. En este trabajo, a las formulaciones de los óptimos funcional, funcional+sensorial y sensorial, se les ha llamado formulación 1, 2 y 3, respectivamente.

Para conseguir las diferentes formulaciones mostradas en la tabla 1, al puré de pomelo, se le añadieron los solutos correspondientes y se mezcló con el robot de cocina hasta alcanzar la homogeneidad de la muestra. Se midió los °Brix y se analizó la humedad de la mezcla preparada (apartado 2.5.1), antes de proceder a su pre-deshidratación (formulaciones 1 y 2) o hidratación (formulación 3) hasta el nivel estipulado. La pre-deshidratación se llevó a cabo por microondas (Moulinex, Ultimys Duo Comby) a una potencia de 2W/g, colocando 300 g de mezcla en bandejas de teflón. A partir de los °Brix del puré con solutos se estimó, mediante un balance de materia, el peso final que debía tener la muestra para conseguir la humedad final prevista. En el caso de la formulación 3, se calculó mediante balance de materia el agua a añadir para alcanzar el nivel de hidratación requerida. A continuación las muestras fueron colocadas en bandejas de aluminio, con un espesor de 0,5 cm.

2.3. Liofilización y trituración

Las bandejas de aluminio con las muestras se congelaron por un tiempo mínimo de 48 horas a -45 °C (Liebherr Mediline 7083 207-00). El secado de

las muestras congeladas se llevó a cabo en un liofilizador Telstar Lioalfa-6, a 0,021 mPa y -55 °C en el condensador, durante 48 horas. Una parte de las tortas obtenidas se colocaron en envases herméticos de cristal a 4 °C hasta su rehidratación y caracterización reológica. Otra parte se trituró en una habitación con un 45 % de humedad relativa, utilizando el mismo robot de cocina, obteniendo un polvo que se tamizó por un tamiz de 0,7 mm de luz de malla. El polvo obtenido se almacenó en bolsas zip dentro de un desecador con silicagel hasta su análisis. Antes de su uso, se determinó la humedad de la torta y del polvo (apartado 2.5.1).

2.4. Rehidratación

La rehidratación del producto liofilizado en forma de torta y polvo se realizó para obtener nuevamente la mezcla preparada con el puré de pomelo y los solutos añadidos, antes de su pre-deshidratación con microondas o de su hidratación. La cantidad de agua a incorporar para conseguir que el producto rehidratado alcance la humedad inicial se calculó por balance de materia. Las rehidrataciones se realizaron en vasos de precipitados de 50 ml con doble camisa conectados a un baño termostático (Refrigerated Circulator 901, Poly Science), con el fin de asegurar la temperatura de rehidratación. Se estudiaron tres temperaturas: 10, 20 y 30 °C. La mezcla de agua destilada y pomelo liofilizado (torta o polvo) se mantuvo en agitación magnética constante (750 rpm) durante 10 minutos. Cada 2 minutos se midieron los °Brix para conocer la evolución de la rehidratación del producto. Las muestras rehidratadas se dejaron en reposo en refrigeración durante 24 horas para su estabilización antes del estudio del comportamiento reológico.

2.5. Determinaciones analíticas

2.5.1. CONTENIDO EN AGUA Y °BRIX

El contenido en agua (x_w , gramos de agua por 100 g de producto) y los °Brix (gramos de sólido solubles por 100g de fracción líquida) se determinaron a las mezclas de pomelo triturado con los solutos añadidos ya las muestras rehidratadas hasta este mismo nivel, según lo descrito en el apartado 2.4. El contenido en agua se determinó según el método AOAC 934.06 (2000), que consiste en secar la muestra a 60 ± 1 °C, a una presión < 100 mm Hg, hasta peso constante. Para ello se utilizó una estufa de vacío (Vaciotherm, J.P. Selecta). Los °Brix se midieron con un refractómetro (Abbe Atago 89553, Zeiss Japan) a 20 °C. Los °Brix medidos durante la rehidratación a 10 y 30 °C se corrigieron con la temperatura para referirlos a 20 °C (National Bureau of Standards Publications, 1942).

2.5.2. REOLOGÍA

Se estudió el comportamiento reológico de los zumos comerciales y de las muestras liofilizadas, rehidratadas a las tres temperaturas, a partir de la torta y del producto en polvo, en las condiciones descritas en el apartado 2.4. Se obtuvieron las curvas de flujo al aplicar un barrido de gradiente de velocidad de 0 a 150 s⁻¹ a temperatura constante a 20 °C (Viscotherm VT 10, Physica). Para ello se utilizó un reómetro de gradiente de velocidad controlado (Rheolab MC 1, Paar Physica) con geometría de cilindros concéntricos (Z1DIN, doublé gap, para los zumos comerciales y Z2DIN, 45 mm, para las muestras rehidratadas). Las curvas de flujo ascendentes fueron ajustadas al modelo Ostwald-de Waele (Ec. 1) para obtener el índice de comportamiento al flujo (n) y el índice de consistencia (K). Con estos dos parámetros se calculó la viscosidad (Ec. 2) a 100 s⁻¹.

$$\sigma = K (\dot{\gamma})^n \quad (1)$$

$$\eta = K (100)^{n-1} \quad (2)$$

Donde σ : esfuerzo cortante (Pa), $\dot{\gamma}$: gradiente de velocidad (s⁻¹), n: índice de comportamiento al flujo, K: índice de consistencia (Pa sⁿ), η : viscosidad (Pa s).

Además, el comportamiento reológico de las muestras rehidratadas a 20 °C, se analizó también, en las mismas condiciones, pero a 10 y a 30 °C. Tras la obtención del índice de consistencia (K), se calculó la energía de activación (E_a) utilizando una ecuación tipo Arrhenius (Ec. 3) para cuantificar el efecto de la temperatura sobre el índice de consistencia.

$$K = K_0 \exp(E_a/RT) \quad (3)$$

Donde K: índice de consistencia (Pa sⁿ), K₀: parámetro del modelo (Pa sⁿ), T: temperatura (K), R: constante de los gases (=8,314 J/K mol); E_a: energía de activación (J/mol).

2.6. Análisis estadístico

Para establecer las diferencias existentes entre las muestras analizadas, se efectuaron análisis de la varianza (ANOVA) de carácter simple, para un nivel de significación $\alpha = 0,05$. El análisis estadístico de los resultados obtenidos se ejecutó con el programa Statgraphics Centurion XVI.II.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la rehidratación de cada muestra se planteó un balance de agua considerando la humedad inicial de las muestras de puré de pomelo con los solutos añadidos, la humedad de las tortas o productos en polvo a rehidratar

hasta ese mismo nivel y la cantidad de muestra rehidratada a preparar (45 g). La tabla 2 muestra las humedades correspondientes y la mezcla producto liofilizado:agua.

TABLA 2. Rehidratación de los productos liofilizados. Mezcla de producto liofilizado y agua, en función de la humedad de las muestras.

Muestra		Humedad (g agua/100 g producto)	Cantidad (g)	
			Liofilizado (g)	Agua (g)
Formulación 1	Inicial	84,89 (0,09)	-	-
	Torta	3,02 (0,16)	6,98	38,02
	Polvo	2,10 (0,06)	6,92	38,08
Formulación 2	Inicial	85,70 (0,06)	-	-
	Torta	2,71 (0,17)	6,50	38,50
	Polvo	3,08 (0,10)	6,52	38,48
Formulación 3	Inicial	87,47 (0,17)	-	-
	Torta	1,3 (0,2)	5,63	39,37
	Polvo	3,63 (0,18)	5,76	39,23

3.1. Curvas de rehidratación

Se obtuvieron las curvas de evolución de los °Brix durante la rehidratación de las muestras, cada dos minutos hasta diez minutos. En las figuras 1-3 se muestran dichas representaciones para las 3 formulaciones ensayadas y también para el puré de pomelo con los solutos añadidos antes de su deshidratación.

Como se observa en las gráficas, en general, las muestras rehidratadas alcanzan un mayor contenido en sólidos solubles que la muestra antes de su liofilización. En el caso de la formulación 1 y 2, esto puede ser debido a la utilización del microondas como paso previo a la liofilización, el cual podría contribuir a la solubilización de compuestos poco accesibles al agua. Esto se confirmó mediante una prueba adicional realizada con pomelo triturado, el cual se sometió a un tratamiento por microondas en las mismas condiciones descritas en el apartado 2.2. Se pudo confirmar que con el tiempo de permanencia de la muestra en el microondas, los °Brix aumentaron, descontando la pérdida de agua. El hecho de que, para las formulaciones 1 y 2, la torta se rehidrate algo mejor que el polvo, puede deberse a la relación superficie a rehidratar /volumen de agua disponible. En el polvo hay mucha más superficie a rehidratar con la misma cantidad de agua disponible, lo que puede hacer el proceso más lento por los fenómenos interfaciales.

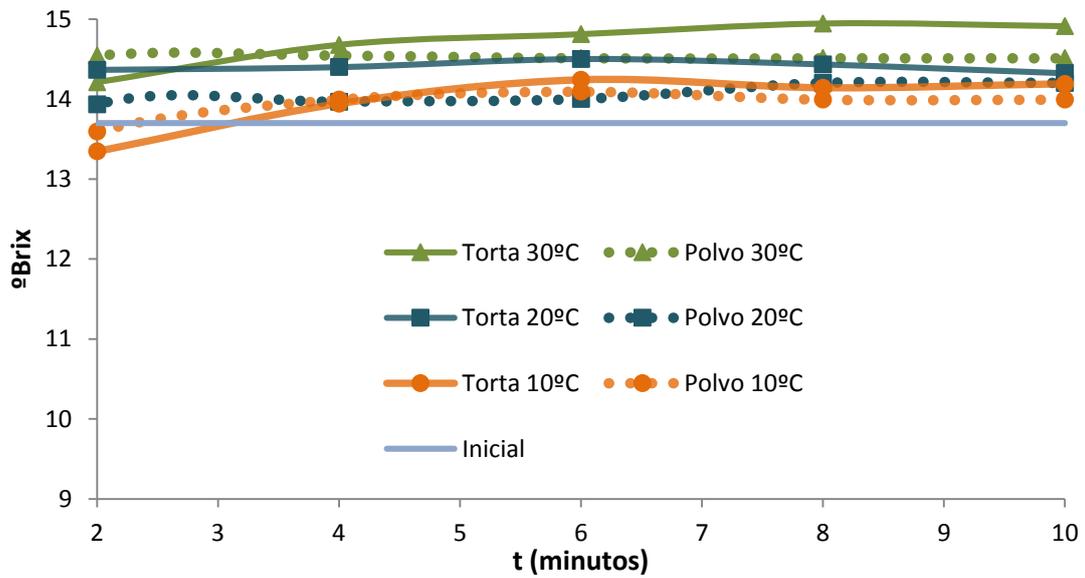


FIGURA 1. Evolución de los °Brix con el tiempo durante la rehidratación, a 10, 20 y 30 °C, de las tortas y de los polvos de la formulación 1. El inicial corresponde al puré de pomelo con 3,8 % GA y 0,47 % FB.

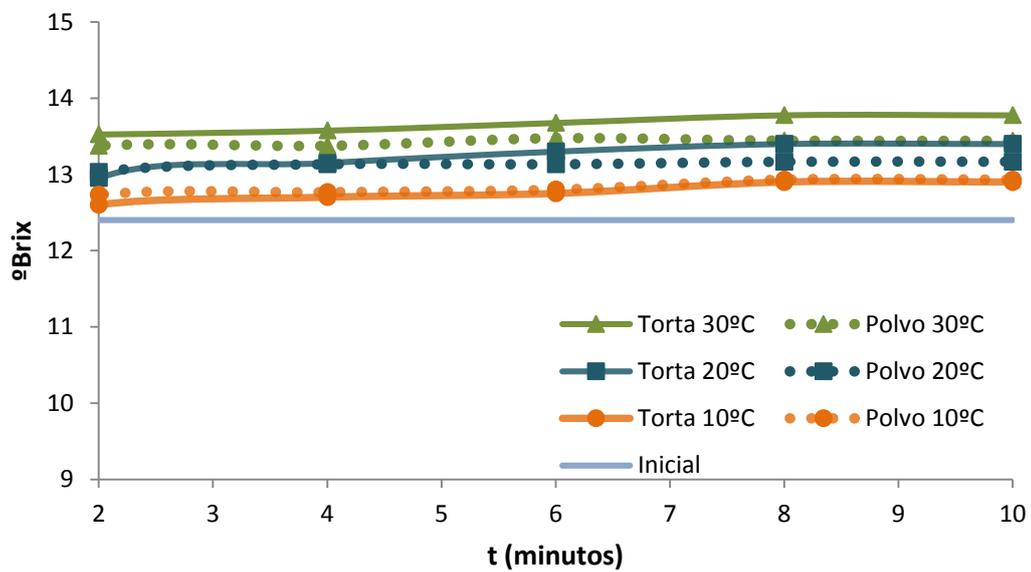


FIGURA 2. Evolución de los °Brix con el tiempo (minutos) durante la rehidratación de las tortas y polvos a 10, 20 y 30 °C de la formulación 2. El inicial corresponde al puré de pomelo con 2,6 % GA y 0,32 % FB.

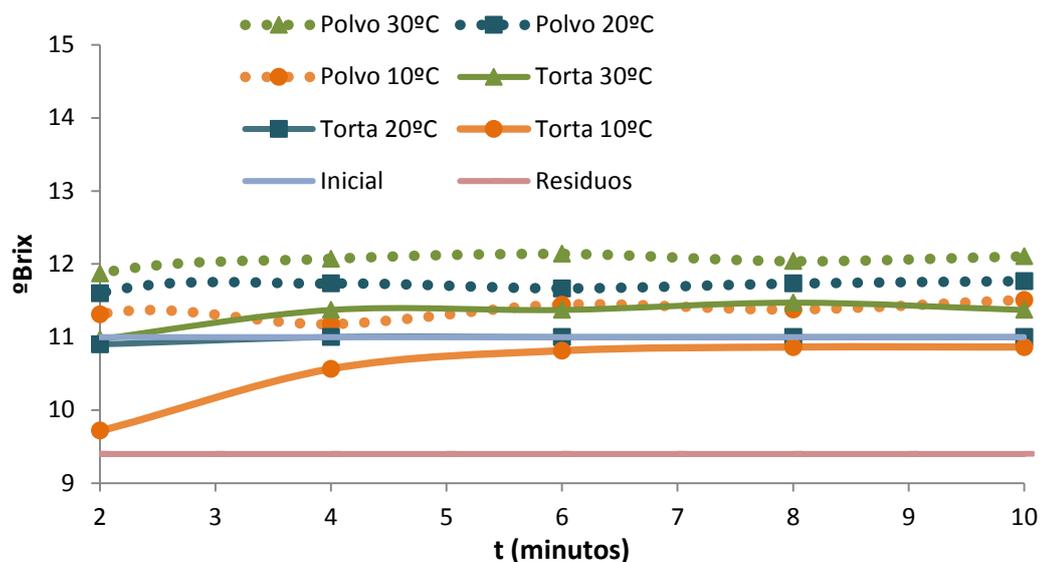


FIGURA 3. Evolución de los °Brix con el tiempo (minutos) durante la rehidratación de las tortas y polvos a 10, 20 y 30 °C de la formulación 3. El inicial corresponde al puré de pomelo con 0,73 % GA.

En el caso de la formulación 3, los productos en polvo rehidratados son los que alcanzan los °Brix más altos. Cuando la torta es triturada, una parte del producto pasa por el tamiz y la otra se queda como residuo. En este caso, se pensó que la composición del polvo obtenido y del residuo podían ser diferentes. Tratando de confirmar esta hipótesis, se estudió la rehidratación del residuo. Como se ve en la figura 3, efectivamente el residuo presenta menor cantidad de sólidos solubles, que sobre todo se encuentran en los polvos utilizados para la rehidratación. Así pues, las tortas rehidratadas quedan con los mismos °Brix que el producto inicial y los productos en polvo rehidratados contienen más sólidos solubles.

También se observan en las gráficas la diferencia de rehidratación del mismo producto, torta o polvo, con relación a la temperatura de rehidratación. A mayor temperatura de rehidratación, mayor solubilización de los solutos, lo que hace que aumenten los °Brix. Esta tendencia se observa en las 3 formulaciones.

3.2. Análisis del comportamiento reológico

Las curvas de flujo obtenidas mostraron un comportamiento típico de los productos pseudoplásticos. La figura 4 muestra, como ejemplo, algunas de estas curvas obtenidas a partir de la formulación 1. Todas las curvas de los productos iniciales, las tortas y los polvos, rehidratados a las 3 temperaturas, y los zumos comerciales, medidos a 20 °C, se ajustaron al modelo de Ostwald-de Waele y se obtuvieron los valores de n y K (tabla 3).

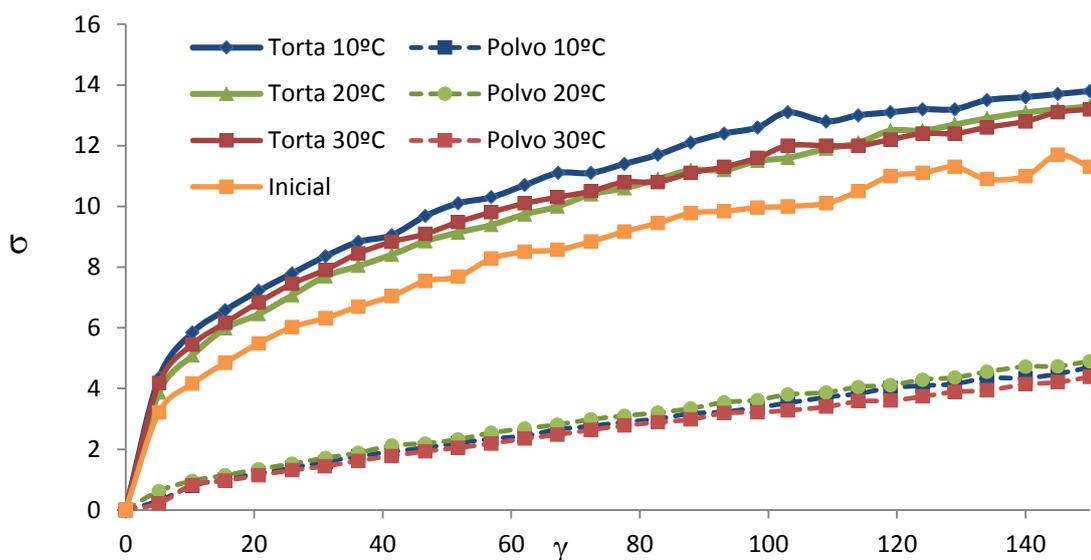


FIGURA 4. Curvas de flujo obtenidas de los productos rehidratados (tortas y polvos) a 10, 20 y 30 °C y del producto inicial.

TABLA 3. Índice de consistencia (K), índice de comportamiento al flujo (n) y viscosidad a 100 s⁻¹ (η (100 s⁻¹)) de las diferentes muestras.

Muestra		n	K (Pas ⁿ)	η (100 s ⁻¹) (Pa s)
Formulación 1 ¹	Inicial	0,33 (0,05)	2,2 (0,5)	0,1002 (0,0003)
	Torta 10°C	0,335 (0,005)	2,60 (0,03)	0,122 (0,002)
Rehidrataciones	Torta 20°C	0,355 (0,018)	2,4 (0,2)	0,121 (0,006)
	Torta 30°C	0,35 (0,03)	2,3 (0,3)	0,1145 (0,0014)
	Polvo 10°C	0,663 (0,013)	0,168 (0,013)	0,0356 (0,0008)
	Polvo 20°C	0,689 (0,03)	0,1516 (0,0012)	0,03620 (0,00019)
	Polvo 30°C	0,682 (0,007)	0,142 (0,005)	0,0329 (0,0003)
	Formulación 2 ¹	Inicial	0,344 (0,004)	2,11 (0,02)
Rehidrataciones	Torta 10°C	0,310 (0,005)	3,14 (0,13)	0,131 (0,004)
	Torta 20°C	0,341 (0,015)	2,6 (0,3)	0,123 (0,005)
	Torta 30°C	0,328 (0,011)	2,71 (0,12)	0,1224 (0,0004)
	Polvo 10°C	0,684 (0,015)	0,155 (0,013)	0,0360 (0,0005)
	Polvo 20°C	0,690 (0,005)	0,166 (0,002)	0,0398 (0,0003)
	Polvo 30°C	0,636 (0,014)	0,221 (0,015)	0,0413 (0,0002)
Formulación 3 ¹	Inicial	0,33 (0,02)	1,8 (0,2)	0,0835 (0,0009)
	Torta 10°C	0,27 (0,02)	3,1 (0,3)	0,106 (0,002)
Rehidrataciones	Torta 20°C	0,314 (0,011)	2,20 (0,18)	0,093 (0,003)
	Torta 30°C	0,301 (0,008)	2,50 (0,12)	0,100 (0,006)
	Polvo 10°C	0,430 (0,014)	0,85 (0,06)	0,0618 (0,0003)
	Polvo 20°C	0,47 (0,01)	0,63 (0,03)	0,0557 (0,0005)
	Polvo 30°C	0,440 (0,016)	0,75 (0,06)	0,0564 (0,0009)
	Comerciales ²	A	0,18 (0,06)	0,90 (0,19)
B		0,17 (0,05)	1,1 (0,2)	0,238 (0,0004)
C		0,15 (0,04)	1,28 (0,18)	0,027 (0,008)

¹Coefficiente de determinación de productos iniciales y rehidratados (R²: 0,9614-0,9998)

²Coefficiente de determinación de productos comerciales (R²: 0,5566-0,9473)

A partir de los datos de la tabla 3, se observa un índice de comportamiento al flujo $n < 1$, que confirma el comportamiento pseudoplástico de la totalidad de los productos analizados. En este tipo de fluidos, la viscosidad, parámetro fundamental que caracteriza el comportamiento reológico, disminuye cuando aumenta el gradiente de velocidad. Como ejemplo para comparar las diferencias en la viscosidad de las muestras, a partir de los parámetros del modelo, se obtuvo, en cada caso, la viscosidad a 100 s^{-1} . Sin embargo, para comparar las diferentes muestras, se utilizó el parámetro K, directamente relacionado con la viscosidad pero constante en todo el intervalo de gradiente de velocidad estudiado.

Las figuras 5, 6 y 7 muestran los valores de K obtenidos, con sus intervalos LSD, para las formulaciones 1, 2 y 3, respectivamente, tanto de la muestra inicial como de las rehidratadas a partir de la torta y del polvo, a 10, 20 y 30 °C. La comparación de las tres formulaciones iniciales responde a su diferente composición, siendo mayor el valor de K y, por tanto de la viscosidad (tabla 3), cuanto mayor es el contenido en solutos añadidos.

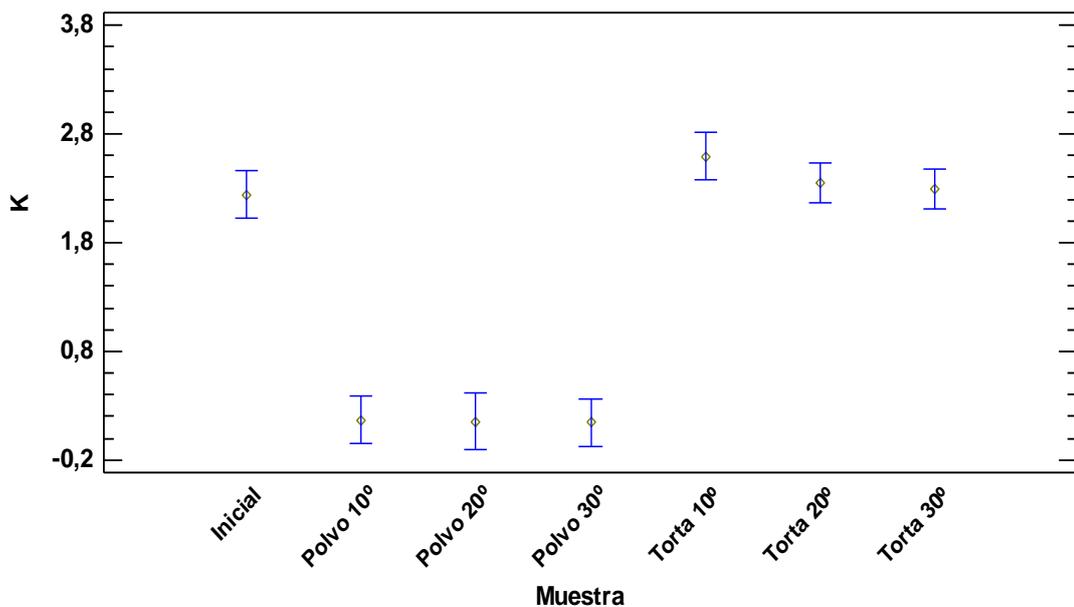


FIGURA 5. Medias e intervalos LSD de la formulación 1: torta y polvo rehidratados a 10, 20 y 30 °C.

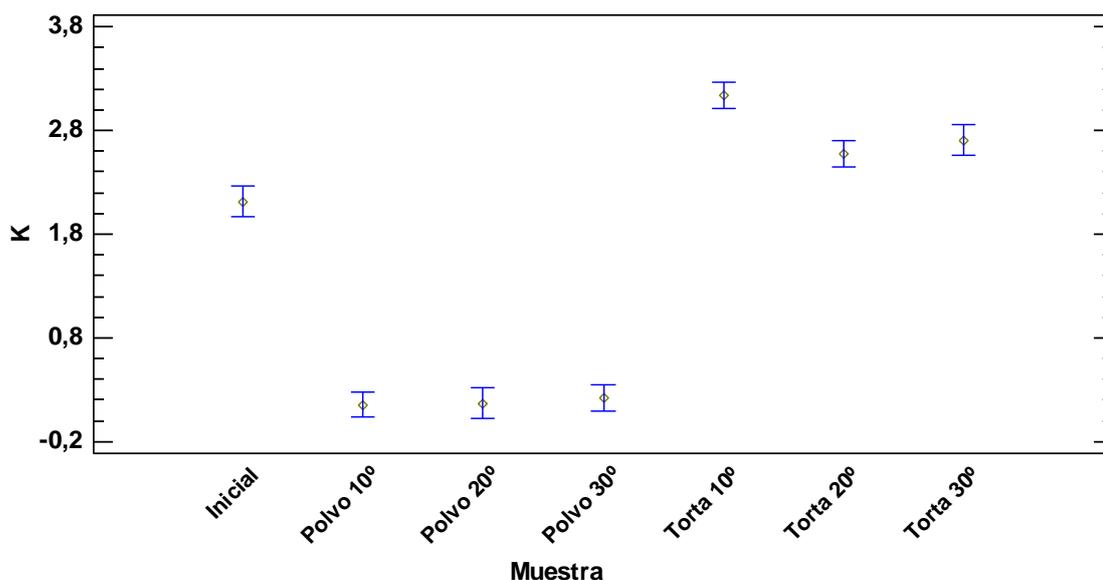


FIGURA 6. Medias e intervalos LSD de la formulación 2: torta y polvo rehidratados a 10, 20 y 30 °C.

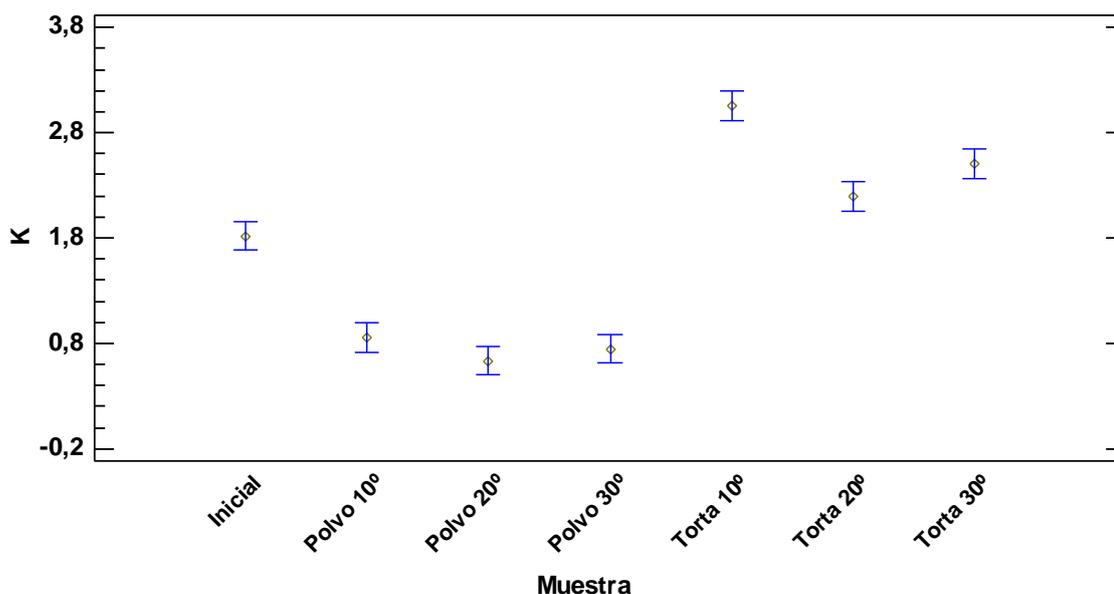


FIGURA 7. Medias e intervalos LSD de la formulación 3: torta y polvo rehidratados a 10, 20 y 30 °C.

Para las tres formulaciones se observa como la trituración de la torta, para obtener el polvo supone una disminución significativa ($p < 0,05$) del índice de consistencia del producto rehidratado con respecto al producto rehidratado obtenido a partir de la torta y también al producto inicial. Esto es debido, fundamentalmente, a la diferente cantidad y tamaño de los solutos insolubles presentes. Como se ha comentado antes, el tamizado de las muestras para obtener el polvo hace que éstas contengan menor cantidad

de solutos insolubles que son los principales responsables del aumento de viscosidad. Además, el menor tamaño de los solutos insolubles que sí que pasan el tamiz, supone un aumento de la superficie de contacto con el agua, que actúa como lubricante y facilita el movimiento de dichas partículas, que se traduce en una menor viscosidad de las muestras (tabla 3). El comportamiento reológico de todos los productos rehidratados a partir del polvo fue independiente de la temperatura de rehidratación. En el caso de la rehidratación de las tortas, si que se obtuvo un producto con mayor valor de K cuando se rehidrató a 10 °C, lo que podría estar indicando una peor rehidratación en este caso. De hecho, los °Brix que alcanzan las muestras rehidratadas a esta temperatura son siempre menores (figuras 1 a 3). Al comparar los productos rehidratados a partir de las tortas con los iniciales, no se observan diferencias significativas para la formulación 1, pero en los otros 2 casos, las tortas rehidratadas mostraron mayor índice de consistencia.

Para la comparación del índice de consistencia de las muestras formuladas en este estudio con los productos comerciales analizados, se seleccionó el comportamiento de los productos rehidratados a 20 °C. En la figura 8, se muestra los valores de K de los productos rehidratados a partir de las tortas y de los polvos de cada formulación, así como también de los productos A, B y C.

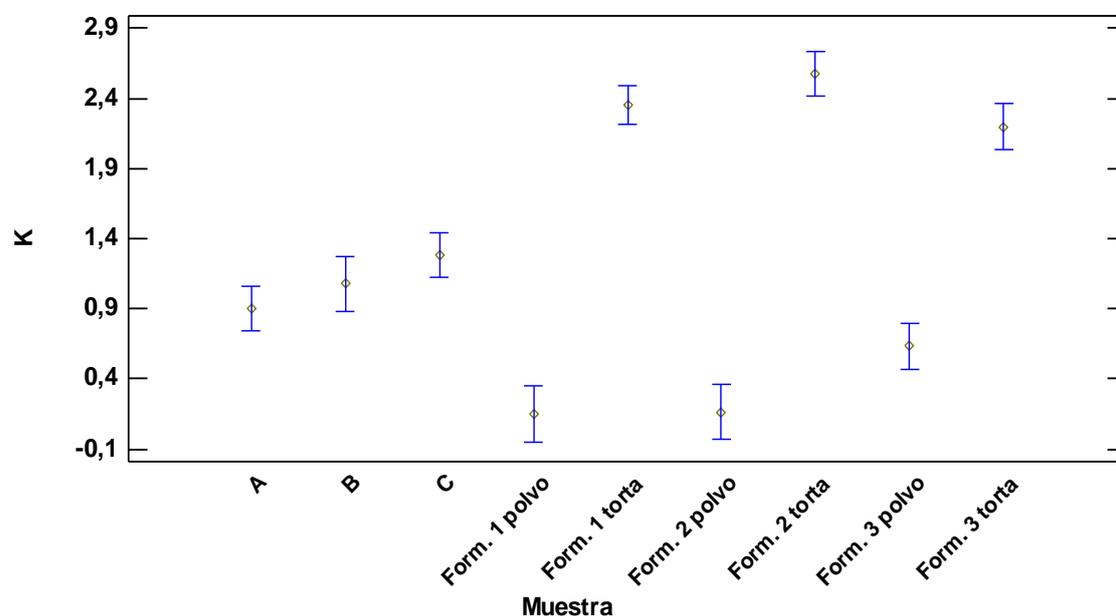


FIGURA 8. Medias e intervalos LSD de la formulación 1, 2 y 3: torta y polvo rehidratados a 20 °C y productos comerciales.

Los productos en polvo rehidratados de las 3 formulaciones estudiadas presentaron valores de K entre 0,1 y 0,7 Pa.sⁿ, siendo significativamente

bajos con respecto al resto de productos. En otro grupo se encuentran los productos comerciales, con valores entre 0,9 y 1,3 Pa.sⁿ. Las tortas rehidratadas presentan índices de consistencia entre 2,1 y 2,6 Pa.sⁿ, superiores a los comerciales. El producto A es un néctar con un contenido mínimo en fruta de 55 % con un 3 % de pulpa añadida. Su bajo contenido en fruta hace que sea un producto poco viscoso, aunque la pulpa añadida contribuye a aumentarla. Los productos B y C son zumos directamente exprimidos que incorporan pulpa de forma natural y añadida, respectivamente. Sin embargo, ninguno de ellos tiene toda la pulpa de la fruta, como sí que llevan las muestras rehidratadas a partir de las tortas. El elevado contenido en solutos insolubles de la pulpa hace que los productos comerciales tengan un índice de consistencia menor al de los zumos obtenidos por rehidratación de las tortas.

3.3. Efecto de la temperatura sobre el comportamiento reológico

Para este estudio se trabajó con las muestras rehidratadas a 20 °C a partir de las tortas y de los polvos, de las que se obtuvo el comportamiento al flujo, además de a 20 °C (tabla 3), también a 10 y a 30 °C (tabla 4), que son temperaturas habituales para el manejo y consumo de estos productos. Los valores de K de cada muestra obtenidos por el ajuste al modelo de Ostwald-de Waele (R^2 : 0,9802-0,9997), se ajustaron a un modelo tipo Arrhenius (Ec. 3).

TABLA 4. Índice de consistencia (K) e índice de comportamiento al flujo (n) de las diferentes muestras medidas a 10 y 30 °C.

Muestra		n	K
Formulación 1	Torta 10 °C	0,341 (0,0101)	2,93 (0,19)
	Torta 30 °C	0,338 (0,016)	2,2 (0,2)
Reología	Polvo 10 °C	0,708 (0,007)	0,165 (0,004)
	Polvo 30 °C	0,6625 (0,016)	0,149 (0,009)
Formulación 2	Torta 10 °C	0,347 (0,125)	2,91 (0,15)
	Torta 30 °C	0,36 (0,03)	2,2 (0,4)
Reología	Polvo 10 °C	0,704 (0,007)	0,183 (0,003)
	Polvo 30 °C	0,671 (0,019)	0,155 (0,016)
Formulación 3	Torta 10 °C	0,27 (0,04)	3,3 (0,7)
	Torta 30 °C	0,309 (0,017)	2,2 (0,2)
Reología	Polvo 10 °C	0,45 (0,02)	0,813 (0,106)
	Polvo 30 °C	0,514 (0,009)	0,45 (0,03)

Como era de esperar, K aumenta al disminuir la temperatura del ensayo (figuras 9-11). Las energías de activación (E_a) obtenidas del ajuste del modelo, presentaron valores entre 3.700 y 21.025 J/mol (figura 12), rango

que coincide con valores de zumos filtrados de cítricos entre 16.500-21.300 J/mol (Alvarado, 1993) o zumo natural de piña con 18.977 J/mol (Calandrini et al., 2003). Se observa que los productos de las formulaciones 1 y 2 presentan valores de E_a más bajos, lo que está indicando interacciones intermoleculares menos fuertes entre las moléculas polares. La aplicación de microondas y quizás también la adición de fibra de bambú y de goma arábiga a concentración superior al 1 % parece que protege a estos productos del efecto de la temperatura. Las altas temperaturas que pueda haber alcanzado la muestra durante el tratamiento con microondas puede haber causado cambios en el producto que ahora ya no se producen y son, por tanto, poco perceptibles. Asimismo, cuando se tritura la torta de estas 2 formulaciones, el comportamiento reológico del producto rehidratado que se obtiene a partir del polvo es menos sensible a los cambios de temperatura. La formulación 3, presenta los valores más altos de E_a , especialmente el producto en polvo rehidratado.

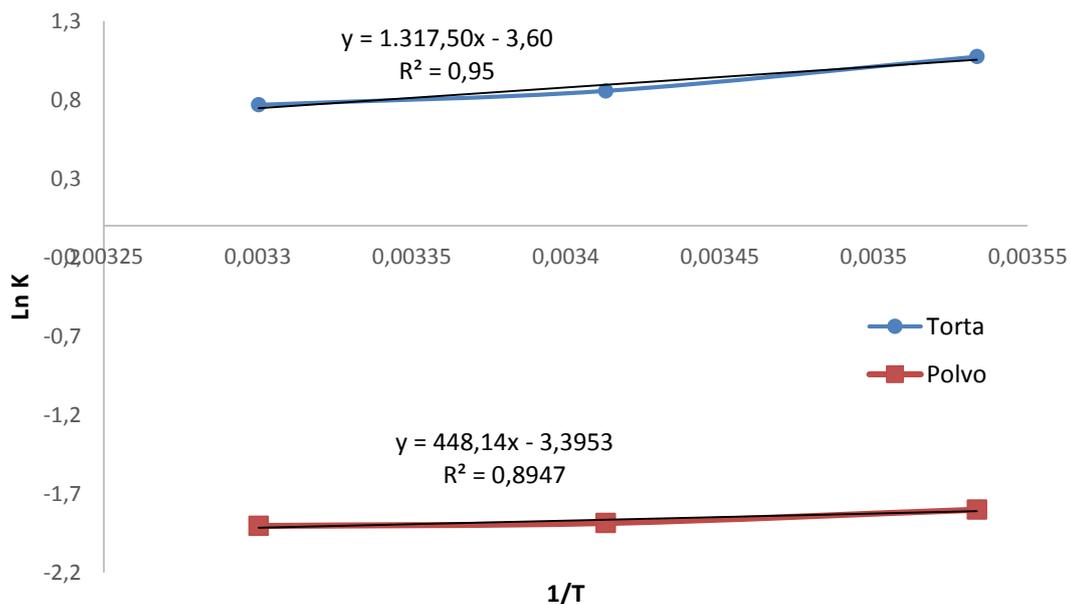


FIGURA 9. Ajuste del modelo de Arrhenius a las muestras de la formulación 1: torta y polvo rehidratados a 20 °C y medidos a 10, 20 y 30 °C.

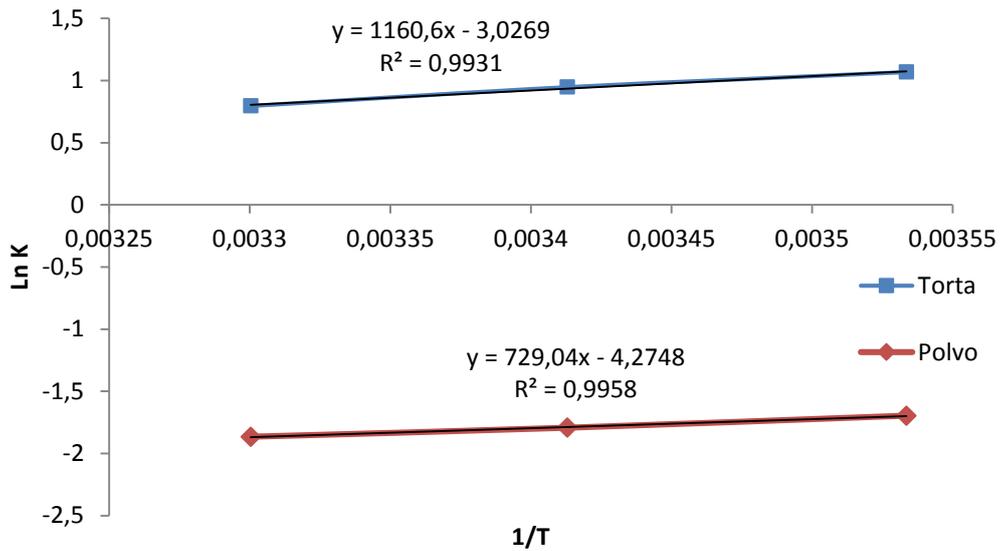


FIGURA 10. Ajuste del modelo de Arrhenius a las muestras de la formulación 2: torta y polvo rehidratados a 20 °C y medidos a 10, 20 y 30 °C.

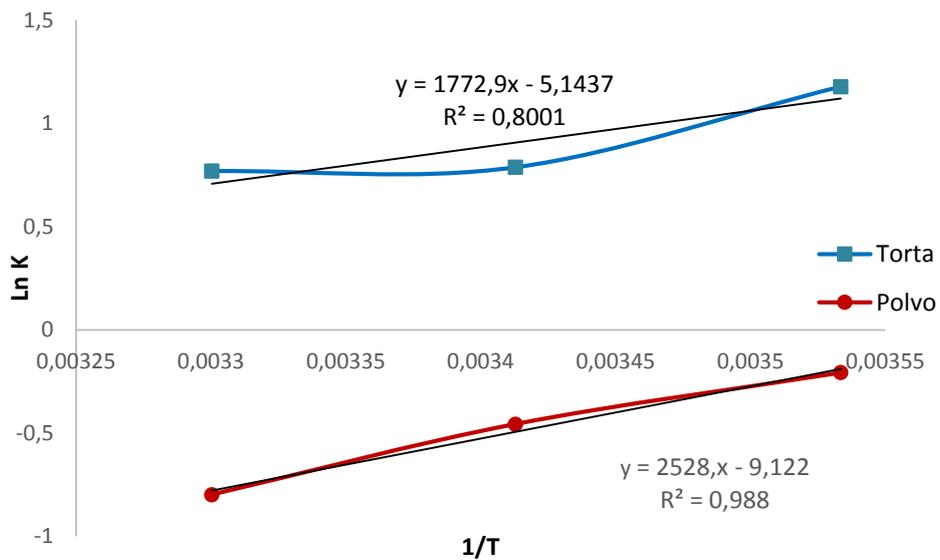


FIGURA 11. Ajuste del modelo de Arrhenius a las muestras de la formulación 3: torta y polvo rehidratados a 20 °C y medidos a 10, 20 y 30 °C.

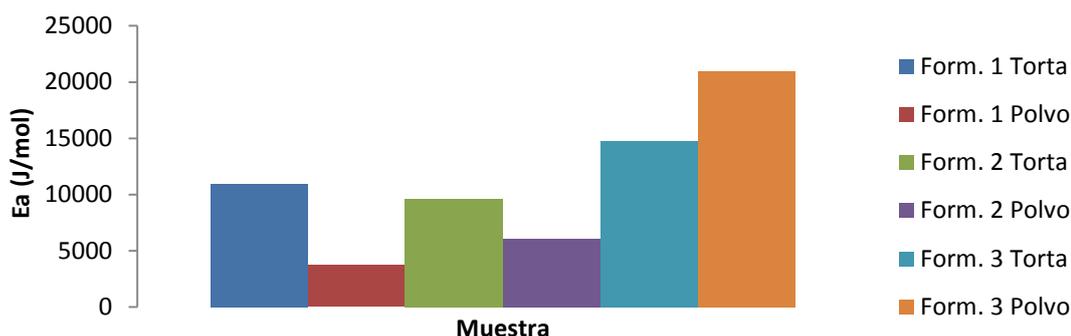


FIGURA 12. Energía de activación (E_a) de los distintos productos.

4. CONCLUSIONES

La rehidratación de la torta que se obtiene de la liofilización de un puré de pomelo proporciona un zumo de esta fruta con una viscosidad superior a la que presentan los productos comerciales. La trituración de la torta previa a su rehidratación permite disminuir la viscosidad del zumo obtenido. En este sentido, es necesario optimizar el tamaño de partícula del triturado para conseguir la viscosidad del zumo deseada.

5. REFERENCIAS

- Agudelo, C.; Machirant, E.; Martínez-Lahuerta, J.J.; Igual, M.; Martínez-Navarrete, N. 2014. Optimization of Grapefruit Pulp Formulation for Freeze-Drying. Actas 28th EFFoST International Conference. 7th International Food Factory for the Future Conference. Uppsala, Sweden. P1.041.
- Alvarado, J.D. 1993. Nota. Viscosidad y energía de activación de juegos filtrados. Revista Española de Ciencia y Tecnología de alimentos, 3, 87-93.
- AOAC. 2000. Official Methods of Analysis of AOAC International, 17th ed. MD, USA: Gaithersburg.
- Barbosa-Canovas, G.; Ortega-Rivas, E.; Juliano, P.; Yan, H. 2005. Food powders: physical properties, processing and functionality. Kluwer Academic/Plenum Publisher New York, N.Y. 372.
- Benlloch, M.; Moraga, G.; Camacho, M.M.; Martínez-Navarrete, N. 2013. Combined Drying Technologies for High-Quality Kiwifruit Powder Production. Food Bioprocess Technol, 6:3544–3553.
- Calandrini, A.C.; Da Cruz, A.M.; Meller, L.H.; Amazonas, L. 2013. Evaluation of influence from temperature and enzymatic treatment in the rheological behavior of pineapple (*Ananas comosus* L. merr.) juice.
- De Ancos, B.; González, E. M.; Cano, M. P. 2000. Ellagic acid, vitamin C, and total phenolic contents and radical scavenging capacity affected by freezing and frozen storage in raspberry fruit. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 48, 4565–4570.

- Dickinson, E. 1992. An introduction to food colloids (pp. 140–170). New York: Oxford University Press.
- Gabas, A. L.; Telis, V.R.N.; Sobral, P.J.A.; Telis-Romero, J. 2007. Effect of maltodextrin and Arabic gum in water vapor sorption thermodynamic properties of vacuum dried pineapple pulp powder. *Journal of Food Engineering*, 82, 246–252.
- Guio, S.; Barresi, A.; Rovero, G., 2000. A Comparison of Evaporative and Conventional freezing prior to freeze-drying of fruits and vegetables. *Trans I Chem E*, Vol 78, Part C. pp187-192. Institution of Chemical Engineers (Ed).
- 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.; García-Martínez, E.; Camacho, M.M.; Martínez-Navarrete, N. 2011. Changes in flavonoid content of grapefruit juice caused by thermal treatment and storage. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 12, 153–162.
- Machirant, E. 2014. Optimización de la formulación de pulpa de pomelo liofilizada. Tesina de Máster universitario en ciencia e ingeniería de alimentos. Univ. Politécnica de Valencia, Valencia-España.
- National Bureau of Standards Publications. 1942 Temperature Corrections for Determining Refractive Index of Sucrose Solutions. Cir. C440, Table 127, p. 664.
- OMS. Estrategia mundial sobre regimen alimentario, actividad física y salud. Fomento del consume mundial de frutas y verdure, [en línea]. Dirección URL: www.who.int/es/. [Consulta 3 Jul. 2015]
- Telis, V.R.N.; Martínez-Navarrete, N. 2009. Collapse and color changes in grapefruit juice powder as affected by water activity, glass transition and addition of carbohydrate polymers. *Food Biophysics*, 43, 44–751.
- Sablani, S.S.; Shrestha, A.K.; Bhandari, B.R. 2008. A new method of producing date powder granules: Physicochemical characteristics of powder. *Journal of Food Engineering*, 87, 416–421.
- Sherman, P. 1975. Factors influencing the instrumental and sensory evaluation of food emulsions. In: D. C. Rha (Ed.), *Theory, determination and control of physical properties of food materials* (pp. 251–256). Dordrecht, Holland: Reidel.
- Silva, M.A., Sobral, P.J.A., Kieckbusch, T.G. 2006. State diagrams of freeze-dried camu camu (*Myrciaria dubia* (HBK) Mc Vaugh) pulp with and without maltodextrin addition. *Journal of Food Engineering*, 77, 426–432.
- 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.