

## LA TRANSICIÓN VÍTREA EN RELACIÓN CON LA PEGAJOSIDAD EN EL SECADO POR ASPERSIÓN

Laura M. Robaina<sup>1</sup>, Yojhansel Aragüez-Forte<sup>1</sup> y Jorge A. Pino<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones para la Industria Alimenticia. Carretera a Guatao km 3½, La Habana, C.P. 19200, Cuba.

<sup>2</sup>Instituto de Farmacia y Alimentos, Universidad de La Habana. Calle 222 No. 2317, CP 13600, La Habana, Cuba.

E-mail: [jpino@iia.edu.cu](mailto:jpino@iia.edu.cu)

Recibido: 11-06-2019 / Revisado: 18-06-2019 / Aceptado: 27-06-2019 / Publicado: 24-08-2019

### RESUMEN

El secado por atomización puede ser usado para obtener productos deshidratados con buenas características sensoriales y nutricionales. La calidad de los productos deshidratados a partir de materiales ricos en azúcares y ácidos orgánicos mediante esta tecnología es muy dependiente de la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) del material a secar. La  $T_g$  es la temperatura de transición a la forma vítrea desde un estado sólido o líquido, o viceversa. El objetivo del presente trabajo fue recopilar información acerca de la relación de la transición vítrea con la pegajosidad durante el secado por aspersión de alimentos ricos en azúcares y ácidos orgánicos. La predicción de la  $T_g$  de los sistemas alimentarios multicomponentes puede realizarse mediante distintas ecuaciones físicas y una semi-empírica. La cantidad de aditivo que se agregará para el secado de un producto dado se puede calcular bajo este enfoque.

**Palabras clave:** transición vítrea, pegajosidad, secado por aspersión, jugos de frutas.

### ABSTRACT

#### Glass transition in relation to stickiness during spray drying

Spray drying can be used to obtain dehydrated products with good sensory and nutritional characteristics. The quality of dehydrated products from materials rich in sugars and organic acids through this technology is very dependent on the glass transition temperature ( $T_g$ ) of the material to be dried.  $T_g$  is the transition temperature to the vitreous form from a solid or liquid state, or vice versa. The objective of the present work was to gather information about the relation of the glass transition with the stickiness during the spray drying of foods rich in sugars and organic acids. The prediction of the  $T_g$  of multicomponent food systems can be made by different physical equations and a semi-empirical one. The amount of additive that will be added for the drying of a given product can be calculated under this approach.

**Keywords:** glass transition, stickiness, spray drying, fruit juices.

### INTRODUCCIÓN

El interés de la industria alimentaria en elaborar productos naturales se ha incrementado significativamente en la actualidad, debido a la demanda de los consumidores de reducir el uso de aditivos sintéticos con posibles riesgos para la salud a corto y largo plazo. La mayoría de las frutas tropicales poseen colores intensos y sabores que las hacen excelentes candidatas como fuente de nuevos y diversos aditivos. Por lo tanto, un

---

**\*Jorge A. Pino-Alea:** Licenciado en Química (Universidad de La Habana, 1975). Investigador Titular y miembro de la Academia de Ciencias de Cuba. Doctor en Ciencias Técnicas (Centro Nacional de Investigaciones Científicas, 1980) y Doctor en Ciencias (Instituto de Farmacia y Alimentos, 2011). Desarrolla sus investigaciones principalmente en la química analítica y tecnología de aromas de alimentos y aceites esenciales.

reto para la industria alimentaria es el desarrollo de procesos y productos que proporcionen la mejor alternativa, siempre y cuando se considere la seguridad y satisfacción del consumidor.

Para garantizar la demanda del mercado a lo largo del año, las frutas frescas deben ser conservadas mediante diferentes técnicas, pues no siempre se cuenta con su disponibilidad. Por esta razón, es importante por parte de la industria alimentaria la presentación de nuevos formatos que puedan incidir en la prolongación de su vida útil.

Uno de los procesos más utilizados en la industria alimentaria es la deshidratación (1, 2). Los jugos de frutas deshidratados poseen muchos beneficios y potencial económico sobre su variante líquida, tales como reducción del volumen, reducción del envase, facilidad de manipulación y transportación, así como una mayor vida de anaquel (2-5).

Dentro de estos procesos, el más empleado es el secado por aspersión debido a su bajo costo y que produce partículas secas de buena calidad, con un equipamiento accesible, manteniendo muchas de las propiedades de los productos (6-9).

Uno de los principales inconvenientes es la aglomeración del polvo durante y después del proceso, debido a que se conocen los problemas de pegajosidad de aquellos alimentos ricos en azúcares y ácidos orgánicos, tales como los jugos de frutas, miel y algunos derivados de almidón (siropes de glucosa/maltodextrina con altos valores de equivalente de dextrosa) (10-13). La pegajosidad puede ser el resultado de la unión partícula-partícula conocida como cohesión o de la adherencia partícula-superficie de la pared, también llamada, adhesión (14). Ambas características de la pegajosidad (cohesividad y adhesividad) pueden coexistir durante el secado por aspersión de los alimentos ricos en azúcares, como es el caso de los jugos de frutas (15). En el caso de estos productos, se produce un problema en el secado bajo condiciones normales de trabajo, pues generalmente se pegan en la pared del secador, dando lugar a aglomerados indeseables en la cámara de secado y en el sistema de transporte, que conduce a problemas de operación y bajo rendimiento, este inconveniente está relacionado principalmente a la baja temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) de los azúcares de bajo peso

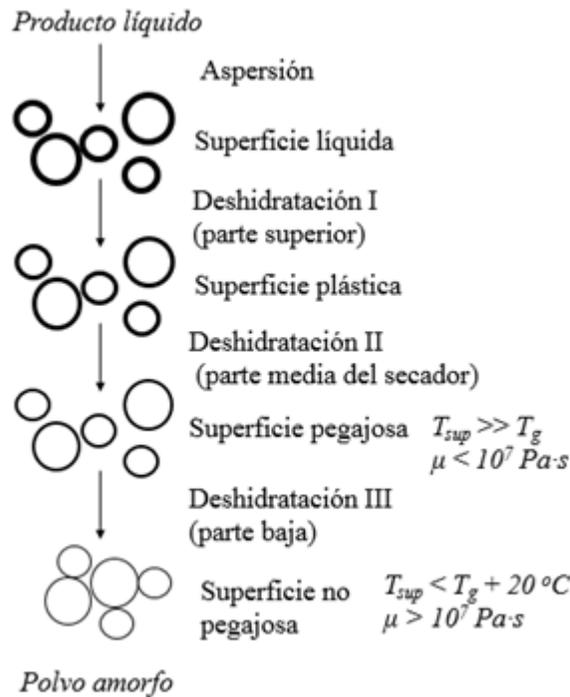
molecular presentes en los jugos de frutas, esencialmente sacarosa, glucosa y fructosa, así como de ácidos orgánicos, tales como ácido cítrico, ácido málico, entre otros (2, 9).

La Fig. 1 muestra los cambios más significativos que tienen lugar durante el secado por aspersión de productos ricos en azúcares y ácidos. La primera etapa es la atomización de la mezcla, donde la solución a secar es atomizada en finas gotas en el rango de 20 a 50  $\mu\text{m}$ . Durante la evaporación del agua, el producto en estado líquido pasa a un sirope y finalmente a un sólido. En dependencia de las características del producto y de su composición, así como de las condiciones del secado, las superficies de las gotas al secarse pueden quedar plásticas, lo que resulta en una pegajosidad en las paredes del secador. Al final del proceso, el producto amorfo obtenido puede ser, un polvo pegajoso o con poca fluidez (9). Estos problemas dentro del proceso pueden resolverse mediante la adición de diferentes soportes, como polímeros y gomas, variando sus concentraciones en la mezcla a secar.

Por todo lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue recopilar información acerca de la relación de la transición vítrea con la pegajosidad durante el secado por aspersión de alimentos ricos en azúcares y ácidos orgánicos.

### **La transición vítrea y la pegajosidad en el secado por aspersión**

En la ciencia de los materiales, la materia existe en tres estados: gas, líquido y sólido. Las moléculas en su estado gaseoso se encuentran en constante movimiento aleatorio y tienen mayor movilidad. Los estados líquidos y sólidos son materias condensadas. La fuerza intermolecular es relativamente más baja en los líquidos, aunque las moléculas se difunden entre ellas. En estado sólido, las moléculas interactúan fuertemente entre sí y como resultado su movilidad es extremadamente baja. Los materiales sólidos se pueden subdividir en cristalinos y amorfos. La forma cristalina está fuertemente empaquetada, por lo tanto, solo grupos moleculares radicales o funcionales en la superficie externa de los cristales pueden interactuar con materiales externos, tales como el agua (absorción). Termodinámicamente, la forma cristalina es el estado de equilibrio estable. Las moléculas en estado amorfo están en anarquía, más abiertas y porosas; por lo que una



**Fig. 1. Diagrama de los cambios físicos en la gota durante el secado por aspersión. Deshidratación I, II y III representan las etapas de la deshidratación.  $\mu$ : viscosidad.  $T_g$ : temperatura de transición vítrea.  $T_{sup}$ : temperatura superficial de la partícula al secarse (10).**

molécula individual posee más sitios para interacciones externas y, como resultado, por ejemplo, una estructura amorfa puede absorber agua fácilmente (10).

Una estructura amorfa es un estado termodinámicamente inestable (metaestable). Las formas amorfas a veces se denominan «el cuarto estado de la materia», porque tienen la estructura de un líquido pero las propiedades de un sólido. También son llamadas como «solución sólida» o «sólido vitrificado». Una estructura amorfa se forma en condiciones de no equilibrio, ya sea mediante la eliminación del medio de dispersión (como el agua), de la masa fundida por enfriamiento, o por superenfriamiento. Este material no está en equilibrio termodinámico, y por lo tanto, es inestable en relación con la forma cristalina, se comporta como un líquido extremadamente viscoso. En este estado, el movimiento molecular es altamente limitado, lo cual es necesario para una organización alineada de moléculas para cristalizar (16).

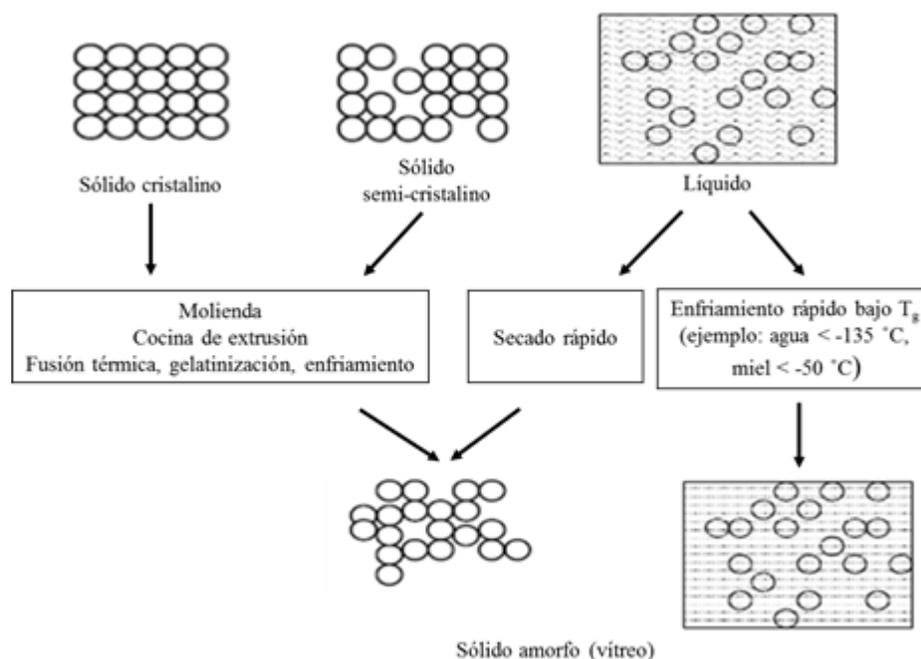
La temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) es la temperatura de transición a la forma vítrea desde un estado sólido o líquido, o viceversa. A diferencia de la transición

de primer orden, de sólido cristalino a líquido por fusión, la transición vítrea es un cambio de fase de segundo orden y se caracteriza por cambios bruscos de viscosidad, calor específico, relajación mecánica y volumen molecular libre. En términos simples, por encima de la  $T_g$ , la materia se encuentra en estado líquido, mientras que por debajo está en estado sólido. En un sentido físico real, durante la transición vítrea el material se convierte de un estado sólido a un estado gomoso; por lo tanto, las moléculas alcanzan un repentino incremento en su movilidad. El estado gomoso se caracteriza por la pegajosidad y mayores velocidades de reacción (17). La Tabla 1 presenta la  $T_g$  de algunos materiales alimenticios.

En el procesamiento de alimentos, la estructura amorfa del material alimenticio es obtenida de varias maneras (Fig. 2). Si el alimento sólido cristalino se derrite y la masa fundida se enfría muy rápidamente, las moléculas no tienen tiempo suficiente para realinearse y cristalizar, lo que da como resultado un sólido amorfo. Del mismo modo, si una solución (o un alimento sólido con alta humedad) se enfría rápidamente se convierte en

**Tabla 1. Temperatura de transición vítrea de algunos materiales alimenticios**

Sustancia	Peso molecular	T <sub>g</sub> (°C)	Referencia
Fructosa	180	5	16
Glucosa	180	31	16
Sacarosa	342	62	16
Maltosa	342	87	16
Lactosa	342	101	16
Ácido cítrico	192	62	16
Maltodextrina			
DE 36	500	100	16
DE 25	720	121	16
DE 20	900	141	16
DE 10	1800	160	16
DE 5	3600	188	16
Almidón	-	243*	16
Goma arábiga	-	194,5	18
Agua	18	-135	16



**Fig. 2. Formación vítrea durante el procesamiento de los alimentos (19).**

un sólido amorfo. Los sólidos cristalinos y semicristalinos también son convertidos en un sólido amorfo debido a la fusión seguido de un rápido enfriamiento. Por ejemplo, la estructura semicristalina de almidón se convierte en estructura amorfa durante la cocción. El secado de los materiales alimenticios es

otro ejemplo donde la humedad se elimina rápidamente, como en el secado por aspersión, o moderadamente rápido como en otros procesos de secado. La cristalización de materiales amorfos no puede tener lugar en este caso debido al tiempo limitado para que las moléculas puedan difundirse y alinearse para cristalizar (16).

Los problemas de pegajosidad en el secado por aspersión de los alimentos ricos en azúcares y ácidos como jugos y pulpas de frutas, miel, algunos derivados del almidón, suero de leche, azúcares e hidrolizado de proteínas y azúcares son bien conocidos (2, 3, 9, 13). Durante el secado de los productos ricos en azúcares y ácidos orgánicos, estos pueden permanecer como jarabe o pegarse en la pared de la cámara. También existe el problema de la aglomeración en la cámara de secado y en el sistema de transporte. Esto conduce a afectaciones en la calidad del producto, menores rendimientos de productos y problemas operativos (16). Ha sido demostrado que, para evitar los problemas de pegajosidad en la cámara del secador por aspersión, la temperatura del gas secante a la salida debe estar alrededor de 10 a 20 °C por debajo del valor estimado de la  $T_g$  (20).

Los problemas de pegajosidad causan un impacto económico considerable y limitan la aplicación de las técnicas de secado para algunos alimentos. La solución a estos problemas ha llamado la atención de muchos investigadores y de la industria alimentaria durante décadas (9). Se han sugerido varios enfoques alternativos y algunos se practican a escala comercial para controlar el impacto de la adherencia. Los enfoques más comunes son el uso de un secador especialmente diseñado con una cámara de secado con doble pared refrigerada y barredor de paredes, enfriando el polvo a temperaturas por debajo de las cuales se vuelve pegajoso, el uso de aire deshumidificado, selección adecuada de los parámetros de secado y adición de algunos soportes para prevenir o reducir la adherencia del polvo (21-28).

Hay dos fenómenos relacionados con la propiedad de adherencia: adhesión y cohesión. La adhesión entre las partículas y la pared más seca está influenciada por sus propiedades superficiales. La cohesión entre las partículas se produce en el producto depositado en la pared y en el conducto, en el sistema de fluidización o en recipientes de recolección si el polvo no se enfría inmediatamente después del secado o si la humedad del aire de refrigeración es alta. La cohesión entre las partículas resulta en apelmazamiento (18).

### Predicción del soporte requerido para elevar la temperatura de transición vítrea

El enfoque más común para los productos ricos en azúcares y ácidos orgánicos ha sido agregar aditivos de alto peso molecular. Esto tiene el efecto de elevar

la  $T_g$  (4, 8, 12). La cantidad de aditivo necesaria para elevar la  $T_g$  requerida puede calcularse de forma teórica utilizando varias ecuaciones. Algunos de ellos se describen a continuación.

**Ecuación de Gordon y Taylor.** La ecuación de Gordon y Taylor (ec. 1) puede ser usada para determinar la  $T_g$  de una mezcla binaria, como resultado, este modelo se limita a un sistema alimentario simple. Las  $T_g$  de cada componente se miden experimentalmente por calorimetría diferencial (29).

$$T_g = \frac{w_1 T_{g1} + k w_2 T_{g2}}{w_1 + k w_2} \quad (\text{ec. 1})$$

Donde  $T_g$  = temperatura de transición vítrea de la mezcla;  $w_1$ ,  $w_2$  = fracción de masa de soluto y agua respectivamente;  $T_{g1}$  y  $T_{g2}$  = temperatura de transición vítrea (K) de soluto y agua (138 K); y  $k$  es una constante.

La  $T_g$  es significativamente sensible a los cambios en la humedad, especialmente en humedades bajas (0 a 5 g/100 g de materia seca). El contenido de humedad y la temperatura del producto son funciones directas de la temperatura del aire de salida. Por lo tanto, un pequeño cambio en la temperatura del aire de salida puede tener un gran impacto en la operación de secado por pulverización. Es conocido que hay un rango estrecho de temperaturas del aire de salida para una operación exitosa de secado por pulverización.

**Ecuación de Couchman y Karasz.** Para más de dos mezclas de componentes, la  $T_g$  se calcula mediante la ecuación de Couchman y Karasz (ec. 2):

$$T_g = \frac{w_1 T_{g1} + \left(\frac{\Delta C_{p2}}{\Delta C_{p1}}\right) w_2 T_{g2}}{w_1 + \left(\frac{\Delta C_{p2}}{\Delta C_{p1}}\right) w_2} \text{ o } \frac{w_1 \Delta C_{p1} T_{g1} + w_2 \Delta C_{p2} T_{g2}}{w_1 \Delta C_{p1} + w_2 \Delta C_{p2}} \quad (\text{ec. 2})$$

Esta ecuación se puede expandir para dos o más componentes de soluto, como para una mezcla terciaria de agua, sacarosa y fructosa. Desafortunadamente, funciona bien solo para sistemas de mezcla ideales, en particular con un sistema anhidro (10).

**Ecuación semi-empírica simplificada.** Una ecuación analítica fue propuesta para estimar la  $T_g$  de mezclas ternarias de sólidos o sólidos con agua (ec. 3) (30). Esta ecuación se basa en el uso de relaciones conocidas

(por ejemplo, Gordon-Taylor o Couchman-Karasz) para cada una de las tres mezclas binarias. Para los sistemas de sacarosa-glucosa-fructosa y los sistemas de sacarosa-fructosa-agua y glucosa-ácido cítrico-agua, los resultados predichos fueron mejores que los obtenidos con la ecuación de Couchman-Karasz para sistemas ternarios. La predicción fue equivalente a la obtenida a partir de la relación Gordon-Taylor, cuando el componente más bajo de  $T_g$  se tomó como plastificante. Esta nueva ecuación requiere pocos puntos de datos. La extensión del modelo para mezclas cuaternarias y superiores es posible utilizando una extensión de este enfoque. En consecuencia, una simplificación de los procedimientos experimentales para la estimación de la  $T_g$  de sistemas alimentarios complejos es una ventaja de este método. Estos modelos pueden ser aplicables a cualquier sistema alimentario, siempre que se puedan ignorar las interacciones de tercer orden o superiores.

Por lo tanto, cuando las tres mezclas binarias, sacarosa-fructosa, glucosa-fructosa y sacarosa-glucosa, sigan la ecuación de Gordon-Taylor, una forma final de la ecuación para la predicción de la  $T_g$  de una mezcla ternaria es:

$$T_{gSGF} = \frac{k_{SG}X_G}{k_{SG}X_G + X_S} \frac{(1-X_F)T_{gG} + k_{GF}X_F T_{gF}}{1-X_F + k_{GF}X_F} + \frac{X_S}{k_{SG}X_G + X_S} \frac{(1-X_F)T_{gS} + k_{SF}X_F T_{gF}}{1-X_F + k_{SF}X_F} \quad (\text{ec. 3})$$

Donde  $X_S$ ,  $X_G$  y  $X_F$  son las fracciones en masa de sacarosa, glucosa y fructosa, respectivamente;  $k_{SG}$ ,  $k_{SF}$  y  $k_{GF}$  son los valores  $k$  en la ecuación de Gordon-Taylor para mezclas binarias de sacarosa-glucosa, sacarosa-fructosa y glucosa-fructosa, respectivamente. Estas constantes se determinan empíricamente, utilizando un método de mínimos cuadrados, a partir de datos de mezcla binaria, como se describió anteriormente.

**Modelo semi-empírico.** En 1997 se reportó una correlación entre la  $T_g$  y el comportamiento de secado de soluciones de glucosa, fructosa, sacarosa y ácido cítrico con MD (II). La validez de los modelos fue demostrada en el secado de miel y jugo de piña. También describieron un enfoque empírico (ec. 4) para optimizar la cantidad de aditivo que debía agregarse con los alimentos ricos en azúcares y ácido cítrico antes del secado por aspersión, asignando valores de índice de

secado a los componentes individuales de acuerdo con su capacidad para secarse con éxito en un sistema de secado por aspersión.

$$\sum_{i=1}^n a_i X_i = Y \quad (\text{ec. 4})$$

Donde  $X_i$  = peso fraccional de un componente  $i$  (ej., sacarosa, glucosa...);  $a_i$  = valor de índice asignado para ese componente particular;  $Y$  es el índice general. Los valores del índice se calcularon de modo que cuando  $Y < 1$  se dificulta el secado,  $Y = 1$  indica un secado marginalmente exitoso y  $Y > 1$  un secado exitoso.

Los índices de secado o coeficientes para sacarosa, glucosa, fructosa, ácido cítrico y maltodextrina son 0,85; 0,51; 0,27, -0,40 y 1,60; respectivamente. El rendimiento de producto fue considerado como criterio para considerar exitoso el secado por aspersión (II). Estos autores consideraron que un rendimiento  $\geq 50\%$  ya es exitoso y que este indicador está fuertemente afectado por la pegajosidad del producto. Un índice general  $Y$  por debajo de la unidad en solamente 0,02 a 0,03 resultó en una reducción importante en el rendimiento. Es curioso que los investigadores no hayan hecho uso de este modelo con más de 20 años de existencia.

Como conclusión, puede afirmarse que el mecanismo de adherencia durante el proceso de secado por aspersión sugiere que la propiedad de adherencia está influenciada no solo por la  $T_g$  promedio, sino también por la propiedad de la película superficial de la gota de secado. Sin embargo, la  $T_g$  todavía puede ser aplicable para predecir la propiedad de pegajosidad por algún factor de sobreestimación. La predicción de la  $T_g$  de los sistemas alimentarios multicomponentes se puede realizar, de forma simplificada, enfocada por el conocimiento de la propiedad de la mezcla binaria de soluto-agua mediante la ecuación de Gordon y Taylor. Una opción más simple puede ser el empleo del modelo semi-empírico de Bhandari y col. (II). La cantidad de aditivo (como la MD) que se agregará para el secado de un producto dado se puede calcular bajo este enfoque.

## REFERENCIAS

1. Pragati S, Preeti B. Technological revolution in drying of fruit and vegetables. *Int J Sci Res* 2014; 3:35-8.
2. Tontul I, Topuz A. Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. *Trends Food Sci Technol* 2017; 63:91-102.
3. Verma A, Singh SV. Spray drying of fruit and vegetable juices- a review. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2013; 55(5):701-9.
4. Bringas-Lantigua M, Pino JA, Aragüez-Fortes Y. Secado por atomización de jugos de frutas. *Cienc Tecnol Alim* 2014; 24(3):67-72.
5. Barbosa J, Teixeira P. Development of probiotic fruit juice powders by spray drying: a review. *Food Rev Int* 2017; 33:335-8.
6. Gharsallaoui A, Roudaut G, Chambin O, Voilley A, Saurel R. Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Res Int* 2007; 40:1107-21.
7. Jyothi NVN, Prasanna PM, Sakarkar SN, Prabha KS, Ramaiah PS, Srawan GY. Microencapsulation techniques, factors influencing encapsulation efficiency. *J Microencap* 2010; 27(3):187-97.
8. Krishnaiah D, Nithyanandam R, Sarbatly R. A critical review on the spray drying of fruit extract: effect of additives on physicochemical properties. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2014; 54(4):449-73.
9. Shishir MRI, Chen W. Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices. *Trends Food Sci. Technol* 2017; 65:49-67.
10. Bhandari BR, Datta N, Howes T. Problems associated with spray drying of sugar-rich foods. *Drying Technol* 1997; 15(2):671-84.
11. Bhandari BR, Datta N, Crooks R, Howes T, Rigby S. A semiempirical approach to optimise the quantity of drying aids required to spray dry the sugar-rich foods. *Drying Technol* 1997; 15(10): 2509-25.
12. Phisut N. Spray drying technique of fruit juice powder: some factors influencing the properties of product. *Int Food Res J* 2012; 19(4):1297-306.
13. Muzaffar K, Nayik GA, Kumar P. Stickiness problem associated with spray drying of sugar and acid rich foods: A mini review. *J Nutr Food Sci* 2015; S12:003.
14. Tan LW, Taip FS, Ibrahim MN, Kamil R. Empirical modeling and control for spray drying of orange juice powder. En: Fourth International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization; 2011 Abr 19-21; Kuala Lumpur, Malasia. New York: IEEE; 2011.
15. Adhikari B. Drying kinetics and stickiness of single drop of sugar and acid-rich solutions (tesis doctoral). Australia: The University of Queensland; 2003.
16. Bhandari BR, Howes T. Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods. *J Food Eng* 1999; 40:71-9.
17. O'Callaghan DJ, Hogan SA. The physical nature of stickiness in the spray drying of dairy products—a review. *Dairy Sci Technol* 2013; 93:331-46.
18. Nurhady B, Andoyo R, Mahani J, Rossi I. Study the properties of honey powder produced from spray drying and vacuum drying method. *Int. Food Res. J* 2012; 19(3):907-12.
19. Bhandari BR, Howes T. Glass transition in processing and stability of food. *Food Australia* 2000; 52(12):579-85.
20. Woo MW, Daud WRW, Mujumdar AS, Wu Z, Meor Talib MZ, Tasirin SM. CFD evaluation of droplet drying models in a spray drying fitted with a rotary atomizer. *Drying Technol* 2008; 26(10):1180-98.
21. Boonyai P, Bhandari B, Howes T. Stickiness measurement techniques for food powders: a review. *Powder Technol* 2004; 145:34-46.
22. Farías-Cervantes VS, Delgado-Lincon E, Solís-Soto A, Medrano-Roldan H, Andrade-González I. Effect of spray drying temperature and agave fructans concentration as carrier agent on the quality properties of blackberry powder. *Int J Food Eng* 2016;12(5):451-9.
23. Movahhed MK, Mohebbi M. Spray drying and process optimization of carrot–celery juice. *J Food Process Preserv* 2016; 40:212-25.
24. Tontul I, Topuz A, Ozkan C, Karacan M. Effect of vegetable proteins on physical characteristics of spray-dried tomato powders. *Food Sci Technol Int* 2016; 22(6):516-24.
25. Jimenez-Sánchez DE, Calderon-Santoyo M, Ortiz-Basurto RI, Bautista-Rosales PU, Ragazzo-Sánchez JA. Effect of maltodextrin reduction and native agave fructans addition on the physicochemical properties of spray-dried mango and pineapple juices. *Food Sci Technol Int* 2018; 24(6):519-32.
26. Saavedra-Leos MZ, Leyva-Porras C, Álvarez-Salas C, Longoria-Rodríguez F, López-Pablos AL, González-García R, Pérez-Urizar JT. Obtaining orange juice–maltodextrin powders without structure collapse based on the glass transition temperature and degree of polymerization. *CyTA – J Food* 2018; 16(1):61-9.

27. Ramakrishnan Y, Adzahan NM, Yusof YA, Muhammad K. Effect of wall materials on the spray drying efficiency, powder properties and stability of bioactive compounds in tamarillo juice microencapsulation. *Powder Technol* 2018; 328:406-14.
28. Sarabandi K, Peighambaroust SH, Sadeghi Mahoonak AR, Samaei SP. Effect of different carriers on microstructure and physical characteristics of spray dried apple juice concentrate. *J Food Sci Technol* 2018; 55(8):3098-109.
29. Lisboa HM, Duarte ME, Cavalcanti-Mata ME. Modeling of food drying processes in industrial spray dryers. *Food Bioprod Process* 2018; 107:49-60.
30. Truong V, Bhandari B, Adhikari A, Howes T. Analytical model for the prediction of glass transition temperature of food systems. En: Levine H, Ed. *Progress in Amorphous Food and Pharmaceutical Systems*, Cambridge, UK: The Royal Society of Chemistry; 2002. pp. 31-47.