

# Transición vítrea en alimentos: sistemas binarios agua-carbohidratos

Luis Fernando Gutiérrez Mosquera<sup>a\*</sup>, Sebastián Arias Giraldo<sup>a</sup>, Danny Garzón Jiménez<sup>a</sup>,  
Diana Marcela López Velasco<sup>a</sup>, Andrea Osorio Alturo<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Grupo de Investigación Alimentos y Agroindustria, Facultad de Ingeniería, Universidad de Caldas. Manizales, Colombia.

Recibido: 19/04/2015. Aprobado: 09/08/2015.

---

## RESUMEN

La transición vítrea es el paso de un estado termodinámico metaestable, caracterizado por una alta agregación y orden molecular, a otro estado termodinámico conocido como estado gomoso, donde existe mayor movilidad de las moléculas y por ende menor estabilidad. Conocer la temperatura a la cual sucede el cambio del estado vítreo al estado desordenado supone una información muy importante a la hora de predecir y controlar las condiciones de almacenamiento óptimas que requiere un producto alimenticio, con miras a preservar sus características y propiedades sensoriales y alargar su vida útil. El presente trabajo es una revisión de conceptos técnicos sobre los fenómenos de transición vítrea en alimentos, haciendo especial énfasis en las interacciones entre el agua y los distintos carbohidratos presentes en las matrices alimentarias. Se abordan los efectos de estos macro nutrientes sobre el aumento o disminución de la temperatura de transición  $T_g$ , y se presentan algunos modelos matemáticos empleados en la predicción de este parámetro.

**Palabras clave:** alimentos, azúcares, carbohidratos, polisacáridos, transición vítrea.

---

## Glass transition in foods: binary systems water- carbohydrates

### ABSTRACT

The glass transition is the passage of a metastable thermodynamic state, characterized by high molecular order and aggregation, to another thermodynamic state, known as rubbery state, where there is more molecular mobility and thus lower stability. Knowing the temperature at which the change happens from glassy state to the rubbery state is a very important information, when it comes to predicting and controlling optimal storage conditions required by the product, for the purpose of preserving their characteristics and sensory properties and prolong lifespan. This paper is a review of technical concepts about the glass transition phenomena in foods, with special emphasis on the interactions between water and different conformational carbohydrate of food matrices, their effects on the increase or decrease in  $T_g$  and mathematical models that predict this parameter.

**Key words:** food, sugars, carbohydrates, polysaccharides, glass transition.

---

## 1. Introducción

Los alimentos son sistemas biológicos complejos en los que interactúan compuestos como agua, proteínas, lípidos, carbohidratos, vitaminas y minerales. La estructura física de un alimento está definida por el estado de sus principales constituyentes y por el grado de interacción molecular existente entre los solutos (nutrientes) y el agua; así como por el tipo de proceso

de transformación y conservación al que es sometido cada producto (Hui, 2006).

Los componentes de los alimentos se presentan en la naturaleza en un estado que no corresponde a su condición de máxima estabilidad termodinámica, y exhiben muchos cambios dependientes del tiempo que no son típicos de las sustancias puras. En estos casos, el estado físico es extremadamente sensible a la humedad, la temperatura y el tiempo de conservación, ocurriendo transiciones de fase como consecuencia de alteraciones en la composición o en alguna de las variables anteriormente mencionadas (Rahman,

---

\* Autor de correspondencia.

E-mail: fernando.gutierrez@ucaldas.edu.co (L.F. Gutiérrez)

Cómo citar este artículo:

Gutiérrez L.F., Arias S., Garzón D., López D.M., Osorio A. (2014). Transición vítrea en alimentos: sistemas binarios agua-carbohidratos.

Revista Vector, 9: 21-28. DOI:

1995; Cedeño y Cornejo, 2010). El conocimiento del fenómeno de transición, y su dependencia respecto a algunos factores intrínsecos o extrínsecos a los procesos de transformación, son parámetros importantes para el almacenamiento y la manipulación de matrices alimentarias (Rodríguez *et al.*, 2011).

Desde la perspectiva del equilibrio de fases, las transiciones de primer orden son cambios en donde un sistema absorbe o desprende calor, presentando coexistencia de fases como en el caso de la fusión, ebullición y solidificación. Por otra parte, las transiciones de segundo orden no tienen un calor latente asociado, y se caracterizan por presentar una discontinuidad abrupta en cualquiera de las propiedades térmicas o físicas del sistema de interés (Palacios, 2012).

Con el objetivo de conferir estabilidad a los alimentos, se realizan tradicionalmente algunas operaciones como la congelación o la deshidratación, que generan un rápido incremento en la viscosidad del agua y por ende una disminución de la movilidad molecular, dificultando que se alcancen en los solutos configuraciones de equilibrio. En lugar de ello, se obtienen estructuras metaestables, conocidas como el estado vítreo (Maroulis y Saravacos, 2003; González y Orrego, 2005; Barreiro y Sandoval, 2006).

El paso de un estado amorfo desordenado a uno vítreo más estable se conoce como transición vítrea, y se produce a una temperatura  $T_g$  que es específica de cada componente (Telis y Sobral, 2002). Este parámetro de proceso depende del grado de polimerización de la molécula y su geometría, y de la cristalinidad y el peso molecular del soluto. Como los alimentos son sistemas multicomponentes, la transición vítrea ocurre en un rango de temperaturas; e incluso, un mismo producto puede tener numerosas transiciones de estado (Hui, 2006; Quiroz, 2007).

El rango de temperaturas de transición vítrea de los productos agroindustriales depende principalmente de la composición (Recondo *et al.*, 2006). Si las moléculas de soluto pueden moverse con facilidad, menor cantidad de calor habrá que suministrarles para que sus cadenas empiecen a vibrar y puedan pasar de un estado vítreo rígido a otro blando y flexible (gomoso). Por otra parte, al aumentarse el contenido de agua, crece la movilidad de las moléculas y la  $T_g$  disminuye. Por encima de la curva de temperaturas de transición vítrea, el alimento se encuentra en un estado amorfo desordenado; mientras que por debajo de este límite, el alimento está en condiciones vítreas más estables, bajo las cuales se reducen significativamente las velocidades de deterioro (Baroni *et al.*, 2003; Gharsallaoui *et al.*, 2007; López *et al.*, 2009).

Existen agentes químicos que alteran la temperatura

de transición vítrea de un material: cuando la disminuyen, se habla de un agente plastificante, y en caso contrario, de un agente endurecedor (Gómez-Díaz y Navaza, 2002). Entre los primeros se destaca el agua, puesto que el estado físico de una disolución está cuantitativamente definido por las propiedades fisicoquímicas del solvente. Además, la estabilidad en la estructura y las propiedades funcionales de un alimento están fuertemente condicionadas por el contenido de humedad, así como por los solutos que interactúan con la molécula de agua (Correia-Calpe *et al.*, 2011).

En este trabajo se pretende exponer y analizar el fenómeno de transición vítrea que ocurre en algunos sistemas alimentarios, concebidos como disoluciones acuosas de azúcares y polisacáridos. Para ello, y haciendo uso de los principios de la ciencia, tecnología e ingeniería, se enfoca el presente artículo de revisión hacia la influencia de la temperatura  $T_g$  sobre la estabilidad de los alimentos, los cambios de propiedades ocurridos durante su transformación, y las metodologías experimentales y matemáticas disponibles para la caracterización de las transiciones de estado.

## 2. Temperatura de transición vítrea en sistemas agua-azúcar

Los factores más importantes que determinan la temperatura de transición vítrea en una solución azucarada corresponden a la flexibilidad de las cadenas orgánicas, a su peso molecular y a las posibles interacciones existentes entre ellas. La  $T_g$  disminuye si la cadena polimérica se mueve más fácil, como en el caso de la glucosa y la fructosa. Todos los mono y disacáridos son, en general, notablemente flexibles (Recondo *et al.*, 2006; García, 2011).

La trehalosa es un disacárido no reductor, muy estable químicamente en condiciones extremas de temperatura y pH bajo. Se encuentra naturalmente presente en la miel, las levaduras, los champiñones y en algunas bebidas fermentadas. Su  $T_g$  está entre los 105-115°C, mucho mayor que la de la sacarosa con 31°C (Patist y Zoerb, 2004). Por otra parte, la trehalosa proporciona mayor protección frente a la congelación y liofilización, ya que aumenta considerablemente la temperatura de transición debido a su fuerte solubilidad e interacción con el agua. Gracias a su alto peso molecular, potencia considerablemente la viscosidad de la fase continua y aumenta la  $T_g$  en las disoluciones alimenticias (Richards *et al.*, 2002).

### 2.1. Caramelos y productos de confitería

En el caso de los caramelos duros, estos deben

exhibir estructuras amorfas estables o vítreas, que se pueden formar de distintas maneras: la primera, por una disminución de temperatura por debajo del punto de fusión; y la segunda, sometiendo al producto a una rápida evaporación del agua que contiene (Cedeño y Cornejo, 2010). Los factores que se deben controlar para obtener un producto final con buenas características sensoriales son: temperatura durante el proceso, dureza del agua utilizada, composición de la fórmula del caramelo y porcentaje inicial de sólidos. Si algunas de las condiciones del proceso varían, como la temperatura o el contenido de humedad final en el producto, esto provocará un cambio abrupto del estado vítreo al estado gomoso (Lim, 2007).

El principal problema de calidad de los caramelos y productos de confitería, relacionado con la temperatura de transición vítrea de sus azúcares como componentes mayoritarios, es la pegajosidad (Cedeño y Cornejo, 2010). La plastificación de un alimento genera el fenómeno de pegajosidad, en el cual el alimento se humecta excesivamente, permitiendo la cohesión de las partículas debido al decrecimiento de la viscosidad superficial (Palacios, 2012).

Por encima de la temperatura de transición  $T_g$ , el estado es gomoso, o en el caso de los confites, es fluido o líquido. Si el producto se encuentra sobre este valor, ciertas propiedades se verán afectadas, la más importante será el incremento en la movilidad del agua y la disminución de su viscosidad. Por lo tanto, el producto empezará a desarrollar una pegajosidad no característica del mismo.

## 2.2. Alimentos deshidratados

El cambio de movilidad, asociado con la transición de estado vítreo a gomoso, influye significativamente sobre las propiedades mecánicas de los alimentos deshidratados. En el caso de los productos en polvo, está relacionado con el desarrollo de fenómenos como la pegajosidad, apelmazamiento y colapso estructural, así como con la cristalización de azúcares (Martínez *et al.*, 2000). Además, el aumento en la concentración de sólidos que se da durante el secado, puede favorecer reacciones de deterioro relacionadas con pardeamiento no enzimático, dando lugar a cambios de color en el producto (Ross, 1995). Con base en lo anterior, la temperatura de transición vítrea y la actividad de agua permiten caracterizar conjuntamente las condiciones de procesado y fabricación que garantizan la calidad, estabilidad y seguridad de los alimentos desecados (Lozano, 2009; Mosquera *et al.*, 2009).

La temperatura de apelmazamiento  $T_a$  para un polvo de fruta, fabricado mediante secado por aspersión, se puede determinar a partir de la temperatura de transición vítrea. Bhandari (2001)

concluye que la  $T_a$  corresponde, en promedio, a un valor 20°C por encima de la  $T_g$ .

De acuerdo con Parada (2010), la liofilización es una técnica de deshidratación que da lugar a productos con una actividad acuosa más baja que en el caso de otras técnicas de secado y, por tanto, a productos más estables. Se puede entonces obtener por liofilización un producto seco en polvo. Sin embargo, los polvos usualmente se encuentran en un estado amorfo inestable, por lo que su estado físico puede cambiar de un estado de sólido vítreo a un estado de líquido gomoso una vez alcanzada la temperatura de transición vítrea  $T_g$ , como consecuencia de la ganancia de humedad por parte del polvo o por un aumento en la temperatura durante su almacenamiento.

Respecto a las condiciones de secado, Bonelli *et al.* (1997) investigaron el efecto del contenido de humedad residual sobre la  $T_g$  de azúcares liofilizados. Concluyeron que la temperatura de transición disminuye a medida que la humedad de los azúcares aumenta, en el rango de bajo contenido de agua. El comportamiento de las isoterms para productos con alto contenido de azúcar muestra que se adsorben relativamente pequeñas cantidades de agua a bajas  $a_w$  y grandes cantidades a altas  $a_w$ , debido a que predominan las interacciones soluto-solvente.

Temperaturas de almacenamiento superiores a su  $T_g$ , para matrices deshidratadas, pueden causar la cristalización de azúcares amorfos o incrementar los cambios gomosos indeseables. Poder manipular satisfactoriamente la transición vítrea mediante el control de condiciones ambientales, o haciendo uso de aditivos específicos, ofrece la posibilidad de asegurar el desarrollo de productos de una alta calidad y excelente estabilidad. Las maltodextrinas y las gomas son ampliamente usadas como coadyuvantes para incrementar la viscosidad, retardar la cristalización, mejorar las características de encapsulación, y minimizar la adherencia e higroscopicidad de los productos secos (Pasquel, 2001; Maldonado y Singh, 2008).

## 2.3. Frutas

Los principales componentes de las frutas son los azúcares sacarosa, glucosa y fructosa, y los ácidos orgánicos málico y cítrico (Badui, 2006). Se han realizado estudios interesantes sobre este tipo de productos con alto contenido de azúcares, enfocados a su temperatura de transición vítrea. Existe especial interés en el comportamiento calorimétrico de los monómeros de carbohidratos (Ross y Karel, 1990, 1991; Vanhal y Blond, 1999) y de los alimentos ricos en estas sustancias, como los polvos de fruta deshidratados.

Además, se encuentran investigaciones sobre la construcción de diagramas de estado para sistemas modelo de frutas, como los propuestos por Sobral *et al.* (2001), Telis y Sobral (2002) y Baroni *et al.* (2003).

La Tabla 1 presenta las temperaturas de transición vítrea reportadas por varios autores para frutas, estabilizadas por medio de diferentes tratamientos tecnológicos o por la adición de azúcares.

Tabla 1  
Temperaturas de transición vítrea  $T_g$ , reportadas para varias frutas a diferentes actividades de agua

Referencia	Temperatura de transición vítrea $T_g$ (°C)					
	González y Orrego (2005)		Correia-Calpe <i>et al.</i> (2011)		Baroni <i>et al.</i> (2003)	
Actividad de agua $a_w$	Tomate de árbol liofilizado	Tomate de árbol secado por aspersión	Pomelo con 30% trehalosa	Pomelo con 40% trehalosa	Tomate de aliño sin tratar	Tomate de aliño con 60% sacarosa
0,00	-	-	-	-	49,00	43,20
0,11	5,44	12,65	51,40	54,00	26,50	2,74
0,22	4,30	1,36	42,80	44,80	-0,79	0,89
0,33	-2,60	-2,14	24,20	27,50	-3,23	-9,48
0,43	-11,18	-14,28	-12,20	-12,00	-18,27	-21,00
0,52	-	-	-23,50	-22,00	-27,94	-31,8
0,61	-	-	-	-	-37,20	-48,62
0,75	-	-	-52,15	-43,80	-60,87	-67,29

Los termogramas obtenidos por González y Orrego (2005) para muestras liofilizadas de tomate de árbol, equilibradas a baja actividad de agua, presentan una disminución en la temperatura de transición vítrea al incrementarse el contenido de humedad, en vista del efecto plastificante del agua en la región higroscópica.

En la investigación desarrollada por Correia-Calpe *et al.* (2011), se evaluó el efecto de la adición de trehalosa sobre las propiedades fisicoquímicas de pomelo liofilizado. El comportamiento variable de las muestras, en función de la actividad de agua, parece estar relacionado con la cristalización de los azúcares; observándose el inicio de la cristalización de trehalosa a una  $a_w$  cercana a 0,43. Hasta este punto, la interacción completa del soluto con el agua aumenta su viscosidad, elevando de forma general la del sistema.

Durante el proceso de liofilización, la eliminación rápida del disolvente impide la cristalización de los azúcares presentes en el pomelo, quedando en un estado amorfo de no equilibrio termodinámico (Ross, 1995). A partir de un determinado contenido en humedad, el aumento en la movilidad molecular del sistema hace posible la formación de una estructura cristalina. La cristalización supone una liberación de moléculas de agua, por lo que para un mismo contenido de humedad, el valor de la actividad acuosa aumenta al cristalizar el soluto y el producto pierde estabilidad (Orrego, 2003).

### 3. Transiciones de fase en polisacáridos

La estructura química y la masa molecular de los polisacáridos tienen un efecto considerable sobre la temperatura de transición vítrea de los alimentos. Por ejemplo, los polímeros con gran proporción de cadenas lineales, como la amilosa, presentan valores mayores de  $T_g$  en comparación con las moléculas ramificadas. Además, los polímeros de alto peso molecular tienden a exhibir una  $T_g$  superior como sustancias puras (Santagapita, 2010).

#### 3.1. Almidón

El gránulo de almidón existe en estado vítreo, hasta que alcanza por calentamiento su temperatura de transición, donde las moléculas pierden su organización y el polímero se vuelve gomoso. Al hacer un calentamiento adicional, tiene lugar la temperatura de fusión  $T_m$ , en la cual el gránulo pierde completamente su configuración (Sandoval *et al.*, 2005).

La gelatinización del almidón permite cambiar la forma cristalina de los gránulos a una forma eventualmente amorfa y digerible, ocurriendo cambios irreversibles que provocan el hinchamiento y la disrupción de estas estructuras (Sandoval *et al.*, 2005). Para que ocurra esta transición, se requiere una temperatura entre 60-75°C y un porcentaje de agua mayor al 30% en solución (Pineda-Gómez *et al.*, 2010).

El almidón gelatinizado presenta una  $T_g$  menor, y es por ello que se evidencia una reducción considerable de su estabilidad (Tripaldi *et al.*, 2010).

Durante el enfriamiento del gel de almidón, las cadenas del polisacárido empiezan a perder su energía y los enlaces de hidrógeno se hacen más fuertes, confiriéndole firmeza al sistema. Cuando el almacenamiento es prolongado, se produce la retrogradación, que se refiere a la recristalización del almidón (Belitz y Grosch, 1997; Badui, 2006). Estos geles tienen una estructura semicristalina, debida a la retrogradación de la amilosa que genera áreas cristalizadas, y a la presencia de amilopectina que constituye la fase amorfa. Las estructuras del almidón pueden recristalizar durante el almacenamiento a temperaturas superiores a la de transición vítrea, debido a que las regiones amorfas tendrán la misma  $T_g$  del producto fresco, mientras que las regiones cristalinicas tendrán una  $T_g$  mayor (Flores, 2006).

Los polímeros semicristalinos poseen un intervalo de temperatura óptima para la retrogradación, que está comprendido por debajo del punto de fusión y por encima de la temperatura de transición vítrea (Benavente, 2007). El almacenamiento a temperaturas de congelación por debajo de la  $T_g$  inhibe la recristalización, debido a que es poco probable que la nucleación se lleve a cabo, debido a la alta viscosidad del sistema y la dificultosa movilidad molecular (Barreiro y Sandoval, 2006; Flores, 2006).

Además de los tratamientos térmicos, el contenido de agua afecta significativamente las transiciones de fase. Por ejemplo, para la amilosa y la amilopectina secas, la  $T_g$  se ha estimado en 227°C, mientras que en la presencia de 13% de humedad disminuye este valor hasta los 56°C. Por esta razón, el empaque del producto y las condiciones de almacenamiento son vitales para evitar que el alimento absorba humedad y pierda su estabilidad (Escobar, 2010).

### 3.2. Alimentos micro encapsulados

Los alimentos y compuestos micro encapsulados requieren que los materiales de recubrimiento proporcionen una matriz amorfa metaestable, resistente al almacenamiento. Por su parte, la liberación de los componentes de interés se da bajo condiciones determinadas de humedad y temperatura, que favorecen la transición del estado vítreo al gomoso. Debido a esto, se ha estudiado la incorporación de carbohidratos de alto peso molecular, como gomas, pectinas y maltodextrinas, que permiten proteger la sustancia de interés y liberarla cuando se requiere (Gharsallaoui *et al.*, 2007; Lozano, 2009).

## 4. Estimación de la temperatura de transición vítrea

La transición vítrea de disoluciones alimenticias no ocurre a una única temperatura sino a lo largo de un amplio rango de temperaturas, en un intervalo de aproximadamente 20°C. Por esta razón, es más correcto hablar de una determinación de rangos de  $T_g$ , y no de un valor puntual para esta propiedad (Bhandari, 2001; Simperler *et al.*, 2006).

La determinación de la temperatura de transición vítrea puede realizarse mediante análisis térmicos (DSC - Calorimetría diferencial de barrido, por sus siglas en inglés), moleculares (espectroscopia) y físicos (dilatometría); o por vía predictiva, la cual requiere el conocimiento de la composición química del sistema para aplicar posteriormente ecuaciones con un alto grado de confiabilidad.

### 4.1. Métodos experimentales para la determinación de $T_g$

El método más común para la determinación de la transición vítrea en alimentos es la Calorimetría diferencial de barrido (DSC). El valor de  $T_g$  sobre la curva DSC es escogido como el punto medio en la discontinuidad de la capacidad calorífica o en cualquier otra propiedad térmica, como lo muestra la Figura 1 (González y Orrego, 2005). Los métodos calorimétricos se han aplicado extensivamente en el estudio de la estructura y las transiciones de fase de azúcares, almidón puro, pectina, celulosa y otros sistemas complejos (Sandoval *et al.*, 2005).

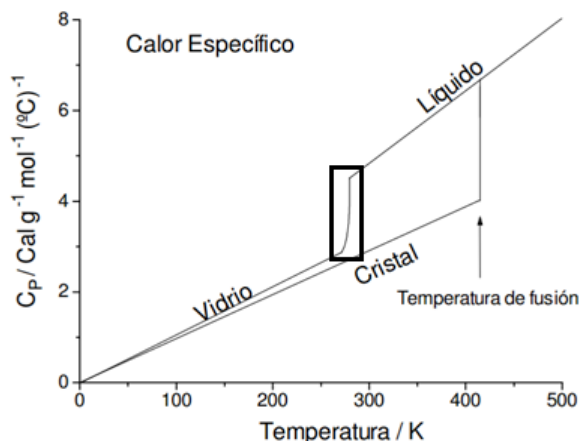


Figura 1. Estudio de la temperatura de transición vítrea utilizando un DSC - Calorímetro diferencial de barrido. Fuente: Caffarena (1996).

A medida que la temperatura del equipo se eleva, la movilidad aumenta y la viscosidad de los componentes de la muestra disminuye. Las moléculas pueden reorientarse hasta alcanzar un estado termodinámicamente más estable, como lo es la estructura cristalina. La cristalización se manifiesta como un pico exotérmico en el termograma, y al incrementar aún más la temperatura, un azúcar puede fundir produciendo un pico endotérmico (Recondo *et al.*, 2006).

La transición vítrea también puede ser detectada y estudiada por medio de la dilatometría, que aprovecha el hecho de que el volumen específico cambia con la temperatura. Se espera que el coeficiente de dilatación térmica de un sistema disminuya cuando este pasa de la forma gomosa a la vítrea. Entonces, una gráfica de volumen específico contra temperatura para estas disoluciones mostrará cambios en la pendiente de la  $T_g$ . Este parámetro puede ser así identificado como el punto de intersección entre las líneas de alta y baja temperatura de la Figura 2. A menudo, este método es empleado para modelar la  $T_g$  de polímeros y carbohidratos (Simperler *et al.*, 2006).

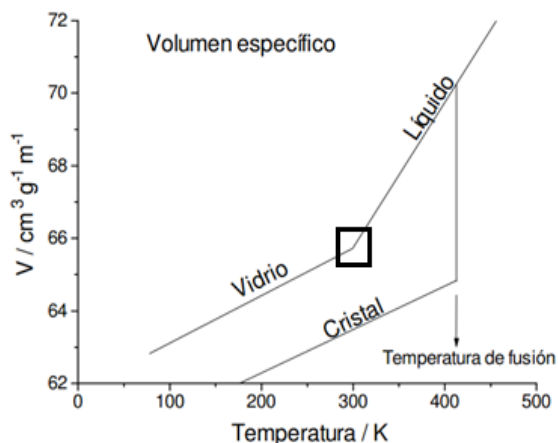


Figura 2. Análisis de la temperatura vítrea de transición de una solución, por medio de dilatometría. Fuente: Caffarena (1996).

#### 4.2. Modelamiento matemático de la temperatura de transición vítrea

Existen diferentes modelos matemáticos para predecir la transición vítrea en sistemas binarios; los cuales son una función de mezcla de los componentes principales y sus respectivas  $T_g$  en estado puro. Estas ecuaciones reportan una desviación experimental que no supera el 5%, siempre que se tengan valores precisos de los parámetros a utilizar (Palacios, 2012).

##### 4.2.1. Modelo de Gordon y Taylor (1952)

Correia-Calpe *et al.* (2011) utilizaron el modelo propuesto por Gordon y Taylor (1952) para estimar la temperatura de transición vítrea de pomelo procesado, asumiendo un enfoque de disolución entre azúcares y agua:

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

$$T_g = T_{g1} + k \frac{w_2 (T_{g1} - T_{g2})}{(1 - w_2)} \quad (2)$$

La segunda ecuación corresponde a la forma linealizada del modelo original, donde  $w_1$  es la fracción másica de sólidos,  $w_2$  es la fracción másica de agua,  $T_{g2}$  es la temperatura de transición vítrea del agua pura (tomada como  $-135^\circ\text{C}$ ) y  $T_{g1}$  es la temperatura de transición vítrea de los sólidos anhidros.  $k$  es el parámetro principal del modelo, que muestra la variación del volumen específico del agua como función de su  $T_g$ . Este factor está íntimamente relacionado con la variación en el coeficiente de expansión térmica de la disolución.

##### 4.2.2. Modelo de mezclas de Fox (1956)

Las temperaturas de transición vítrea de extractos vegetales se calcularon por Bhandari (2001) a partir de la siguiente ecuación, que estima la  $T_g$  media de una solución a partir de una regla de mezclado entre la fracción másica de sus componentes individuales:

$$\frac{1}{T_g} = \frac{w}{T_{g1}} + \frac{w_2}{T_{g2}} \quad (3)$$

donde  $T_g$  corresponde a la mezcla,  $T_{g1}$  corresponde al extracto vegetal y  $T_{g2}$  a un coadyuvante del secado.  $w_1$  y  $w_2$  son las fracciones en peso del extracto y el agente estabilizante, respectivamente. Esta expresión asume que los volúmenes específicos de los componentes de una disolución binaria son aproximadamente iguales.

##### 4.2.3. Ecuación de Kwei (1984)

El modelo de Kwei se basa en la expresión de Gordon y Taylor (1952), trabajando la  $T_g$  de una disolución a partir de reglas aditivas. Sin embargo, incluye un factor que considera las interacciones intermoleculares en las matrices evaluadas, en lo referente a la existencia de puentes de hidrógeno y fuerzas de Vander Waals.

$$T_g = \frac{w_1 T_{g1} + k w_2 T_{g2}}{w_1 + k w_2} + q w_1 w_2 \quad (4)$$

donde  $q$  es el parámetro de ajuste relacionado con las fuerzas intermoleculares. Este modelo ha sido

utilizado con éxito para representar las curvas de transición vítrea de varios productos, incluyendo frutas y hortalizas (Telis y Sobral, 1999; Sobral *et al.*, 2001).

## 5. Conclusiones

El estudio de la temperatura de transición vítrea define regiones de estabilidad variable para un determinado producto. Su conocimiento en sistemas binarios agua-carbohidratos reviste gran interés para optimizar el procesamiento y almacenamiento de los alimentos, gracias a que permite definir las condiciones adecuadas de preservación que mantengan características texturales aceptadas por el consumidor.

En sistemas agua-azúcar debe seleccionarse el sacárido adecuado, teniendo en cuenta su  $T_g$  al momento de formular un producto alimenticio. Algunos factores como la temperatura de cocción, la dureza del agua empleada, la composición del alimento y la concentración de los sólidos deben ser definidos durante la formulación de caramelos y productos de confitería. De igual forma, estos parámetros deben controlarse para evitar un producto final no deseado, húmedo, pegajoso y en estado gomoso.

En alimentos deshidratados, la remoción de agua del alimento implica una reducción en la actividad de agua, incrementando la  $T_g$  y favoreciendo la estabilidad del alimento.

El almidón se caracteriza por presentar cambios considerables durante la transición de fase, que se ven influenciados por factores intrínsecos como el tipo de almidón y el tamaño de sus gránulos, y por factores extrínsecos como la velocidad de calentamiento y el contenido de humedad. De otro lado, el almidón gelatinizado presenta una  $T_g$  menor, y productos que contienen este tipo de polisacárido son menos estables.

La caracterización de las transiciones de fase puede realizarse por vía experimental directa o por vía predictiva. Así, con los modelos de Gordon y Taylor, Fox y Kwei, es posible expresar la temperatura  $T_g$  teórica de un sistema agua-carbohidrato con el fin de evaluar su estabilidad durante el procesamiento y almacenamiento.

La determinación de la temperatura de transición vítrea en alimentos es útil para predecir su vida de anaquel, controlar sus propiedades y determinar el efecto de diferentes solutos sobre la curva de  $T_g$ , con el fin de establecer condiciones de fabricación y transformación que maximicen las características físicas, químicas y biológicas de las matrices de interés agroindustrial.

## Referencias

- Badui S. (2006). *Química de los alimentos*. 4° ed. Ed. Pearson Educación: México D.F. 716 p.
- Baroni A.F., Sereno A.M., Hubinger M.D. (2003). Thermal transition of osmotically dehydrated tomato by modulated temperature differential scanning calorimetry. *Thermochimica acta*, 395: 237-249.
- Barreiro J.A., Sandoval A.J. (2006). *Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas*. Primera ed. Equinoccio: Caracas. 365 p.
- Belitz H.D., Grosch W. (1997). *Química de los alimentos*. 2° ed. Ed. Acirbia S.A.: Zaragoza, España. 1087 p.
- Benavente R. (2007). Polímeros amorfos, semicristalinos, polímeros cristales líquidos y orientación. *Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros*, 15.
- Bhandari B. (2001). *Glass transition in relation to stickness during spray drying*. En: *Food technology international*. Sterling Publications: Londres.
- Bonelli P., Schebor C., Cukierman A.L., Buera M., Chirife J. (1997). Residual moisture content as related to collapse of freeze-dried sugar matrices. *Journal of Food Science*, 62: 693-695.
- Caffarena E.R. (1996). *Propiedades dinámicas de carbohidratos*. Ciencias exactas, Universidad Nacional de La Plata: La Plata, Argentina. 149 p.
- Cedeño M., Cornejo F. (2010). *Determinación de la temperatura vítrea de transición en caramelos duros*. Escuela Superior Politécnica del Litoral: Guayaquil, Ecuador.
- Correia-Calpe E., Igual M., García E., Moraga G., Martínez N. (2011). *Efecto de la adición de solutos en propiedades físico-químicas relacionadas con la calidad y estabilidad de Pomelo liofilizado en polvo*. Grupo de Investigación e innovación alimentaria (CUINA), Departamento de Tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia.
- Escobar N.P. (2010). *Desarrollo de la formulación base para productos horneados con adición de un biopolímero*. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia: Bogotá.
- Flores A. (2006). *Estudio de retrogradación del almidón presente en las tortillas, utilizando diferentes técnicas*. Centro de Desarrollo de Productos Bióticos, Instituto Politécnico Nacional Yauatepec, México.
- Fox T.G. (1956). Influence of diluent and copolymer composition on the glass temperature of a polymer system. *Bulletin of the American Physical Society*, 1: 123.
- García E.E. (2011). *Optimización del secado por aspersión del mucilago de pitahaya en función de sus propiedades reológicas*. Ingeniería, Instituto Politécnico Nacional: Oaxaca, México. 93 p.
- Gharsallaoui A., Roudaut G., Chambin O., Voilley A., Saurel R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food Research International*, 40(9): 1107-1121.
- Gómez-Díaz D., Navaza J.M. (2002). Caracterización reológica de dispersiones agua-alginato sódico con aplicación en la industria alimentaria. *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, 3(5): 302-306.
- González M.E., Orrego C.E. (2005). Isotermas de sorción y transiciones vítreas de jugo de tomate de árbol *Cyphomandra betacea* (Cav) sendt liofilizada y secada por aspersión. En: *V Seminario nacional e internacional de frutales*. pp. 360-366.
- Gordon M., Taylor J.S. (1952). Ideal copolymers and the second order transitions of synthetic rubbers: Non-crystalline copolymers. *Journal of applied chemistry*, 2: 493-500.
- Hui Y.H. (2006). *Handbook of food science, technology and engineering*. Vol. I. CRC Press - Taylor & Francis Group: Boca Ratón, Estados Unidos. 3618 p.
- Kwei T. (1984). The effect of hydrogen bonding on the glass transition temperature of polymer mixtures. *Journal of polymer science*, 22: 307-313.

- Lim M.H. (2007). *Changes in physical states of confectionery products due to the availability of water*. Otago, Nueva Zelanda.
- López O.D., Márquez T., Mayo O., Toledo C., Pérez E. (2009). Características del aceite de semillas de Cucurbita pepo L. microencapsulado mediante secado por aspersión con maltodextrina y goma arábiga. *Latin American Journal of Pharmacy*, 28(4): 628-632.
- Lozano M. (2009). *Obtención de micro encapsulados funcionales de zumo de Opuntia stricta mediante secado por atomización*. Trabajo de grado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Cartagena: Cartagena, España.
- Maldonado S., Singh J.C. (2008). Efecto de gelificantes en la formulación de dulce de yacón. *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, 28(2): 429-434.
- Maroulis Z.B., Saravacos G.D. (2003). *Food process design*. Marcel Dekker: New York. 516 p.
- Martínez N., Andrés A.M., Chiralt A., Fito P. (2000). *Temodinámica y cinética de sistemas alimento entorno*. Segunda ed. Editorial UPV: Valencia.
- Mosquera L., Moraga G., Martínez N. (2009). Effect of maltodextrin on the stability of freeze-dried Borojó powder. *Journal of Food Engineering*, 97: 72-78.
- Orrego C.E. (2003). *Procesamiento de alimentos*. Primera ed. Universidad Nacional de Colombia: Manizales, Colombia. 321 p.
- Palacios L.M. (2012). *Factibilidad técnica para la obtención de panela porcionada de alta velocidad de disolución a nivel de trapiche*. Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia: Bogotá, Colombia. 259 p.
- Parada D.R. (2010). *Adición de maltodextrina o goma arábiga a pulpa de fresa para la obtención de polvos liofilizados estables durante el almacenamiento*. Ingeniería Química y Alimentos, Universidad de Las Américas: Puebla: México.
- Pasquel A. (2001). Gomas: una aproximación a la industria de alimentos. *Revista amazónica de investigación alimentaria*, 1(1): 1-8.
- Patist A., Zoerb H. (2004). Preservation mechanisms of trehalose in food and biosystems. *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*, 40: 107-113.
- Pineda-Gómez P., Coral D., Arciniégas M., Rivera A.R., García M.R. (2010). Papel del agua en la gelatinización del almidón de maíz: estudio por calorimetría diferencial de barrido. *Ingeniería y Ciencia-ing. cienc.*, 6(11): 129-141.
- Quiroz L.O. (2007). *El Modelo Extendido de Zwanzig y la Teoría de Adam-Gibbs en el Plegamiento y Desnaturalización de Proteínas*. Universidad Autónoma Metropolitana: México.
- Rahman S. (1995). *Food properties Handbook*. CRC Press: Boca Ratón, Estados Unidos. 500 p.
- Recondo M.P., Elizalde B.E., Buera M.P. (2006). Modeling temperature dependence of honey viscosity and of related supersaturated model carbohydrate systems. *Journal of Food Engineering*, 77(1): 126-134.
- Richards A.B., Krakowka S., Dexter L., Schmid H., Wolterbeck A., Waalkens-Berendsen D., Shigoyuki A., Kurimoto M. (2002). Trehalose: a review of properties, history of use and human tolerance, and results of multiple safeties studies. *Food and chemical toxicology*, 40: 871-898.
- Rodríguez L.T., Lecot J., Pérez A., Campderrós M.E., Zaritzky N. (2011). Effect of saccharides on glass transition temperatures of frozen and freeze dried bovine plasma protein. *Journal of Food Engineering*, 106(1): 74-79.
- Ross Y. (1995). Characterization of food polymers using state diagrams. *Journal of Food Engineering*, 4(3): 339-360.
- Ross Y., Karel M. (1990). Differential scanning calorimetry study of phase transitions affecting the quality of dehydrated materiales. *Biotechnology progress*, 6: 159-163.
- Ross Y., Karel M. (1991). Water and molecular weight effects on glass transitos on amorphous carbohydrates and carbohydrate solutions. *Journal of Food Science*, 55: 1676-1681.
- Sandoval A., Rodríguez E., Fernández A. (2005). Aplicación del análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC) para la caracterización de las modificaciones del almidón. *DYNA*, 72(146): 45-53.
- Santagapita P.R. (2010). *Estabilidad de enzimas en medios de distinta movilidad molecular. Impacto de interacciones con azúcares y biopolímeros y de la encapsulación*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires: Buenos Aires.
- Simperler A., Kornherr A., Chopra R., Bonnet A., Jones W., Motherwell S., Zifferer G. (2006). Glass transition temperature of glucose, sucrose, and trehalose: an experimental and *in silico* study. *Journal of physical chemistry*, 110: 19678-19684.
- Sobral P.J., Telis V.R., Habitante A.M., Sereno A. (2001). Phase diagram for freeze-dried Persimmon. *Termochimica acta*, 376: 83-89.
- Telis V.R., Sobral P.J. (1999). Glass transition of freeze-dried pineapple. *Brazilian journal of food technology*, 21(1): 181-184.
- Telis V.R., Sobral P.J. (2002). Glass transition for freeze-dried and air-dried tomato. *Food Research International*, 35: 435-443.
- Tripaldi P., Cristian R., Criollo M., Paredes M., Huayllasaca L., León A. (2010). Estudio preliminar del comportamiento térmico de algunos fideos expendidos en la ciudad de Cuenca. *Universidad del Azuay*, 1: 5.
- Vanhil I., Blond G. (1999). Impact of melting condition of sucrose on the glass transition temperature. *Journal of agriculture and food chemistry*, 47: 4285-4290.