



# Uso de gomas naturales en la microencapsulación de pigmentos (antocianinas, betalaínas y carotenoides) mediante secado por atomización y liofilización

---

O., Jiménez- González\* y J.A., Guerrero-Beltrán

\*Programa de Doctorado en Ciencia de Alimentos  
Correo electrónico: [oscar.jimenezgz@udlap.mx](mailto:oscar.jimenezgz@udlap.mx) • [angel.guerrero@udlap.mx](mailto:angel.guerrero@udlap.mx)

## RESUMEN

La microencapsulación es útil para la conservación y estabilidad de pigmentos. Los métodos más utilizados son el secado por atomización y la liofilización; ambos métodos requieren agentes encapsulantes. Las gomas de origen natural se han convertido en un ingrediente importante, ofreciendo múltiples beneficios estructurales para la microcápsula y protectores para el componente activo. La goma arábica, goma de mezquite, goma xantana y goma guar, han sido probadas en la microencapsulación de antocianinas, betalainas y carotenoides. El uso de estas gomas incrementa la estabilidad de los pigmentos, además, su empleo permite la obtención de colorantes en polvo de fácil incorporación a matrices alimenticias complejas. El objetivo de esta revisión es presentar el uso que tienen estas gomas en la encapsulación de pigmentos mediante el secado por atomización y liofilización; además de discutir los factores que afectan su estabilidad y analizar los trabajos que han llevado a cabo la incorporación en matrices alimenticias.

**Palabras clave:** microencapsulación, secado por atomización, liofilización, pigmentos, gomas naturales.

## ABSTRACT

Microencapsulation is a useful technique for the preservation and stability of pigments. The most commonly used methods are spray drying and freeze drying; both methods require encapsulating agents. Natural gums are important ingredients, as they offer numerous structural benefits for the microcapsule and protection for the core compounds. Gum arabic, mesquite gum, xanthan gum and guar gum, have been tested to encapsulate anthocyanins, betalains and carotenoids. It has been observed that these gums increase pigments' stability, in addition, their utilization allows the obtention of powder-state colorants that can be easily incorporated into food matrices. The aim of this review is to present the use of these gums in the encapsulation of pigments through spray drying and freeze drying; furthermore, to discuss factors that affect their stability, and to analyze the studies concerning the incorporation into food matrices.

**Keywords:** microencapsulation, spray drying, freeze drying, natural pigments, natural gums.

## INTRODUCCIÓN

El color es uno de los aspectos sensoriales más importantes en la industria alimentaria, ya que puede modificar el comportamiento del consumidor, influenciando la selección, aceptabilidad, preferencia y deseo sobre un alimento (Clydesdale, 1993; Garber *et al.*, 2016; Paakki *et al.*, 2019; Piqueras-Fizman y Spence, 2015; Wadhwa y Capaldi-Phillips, 2014). El color agradable de un alimento puede ser un factor de calidad (Francis, 1995; Sukkwai *et al.*, 2018). Asimismo, el color de los alimentos ayuda a la identificación de sabores u olores (Garber *et al.*, 2016; Porcherot *et al.*, 2013; Spence, 2015; Spence *et al.*, 2010).

La adición de colorantes en alimentos permite dar uniformidad de color entre lotes de un mismo producto, aumentar la intensidad del color, obtener el color esperado de acuerdo con las expectativas del consumidor (por ejemplo, el color amarillo en helado de vainilla), restaurar el color que se ha perdido debido al procesamiento (por ejemplo, en la pasteurización de jugos), colorear alimentos que carecen de color (por ejemplo, refrescos, bebidas saborizadas, dulces, entre otros), o enmascarar características indeseables (Lehto *et al.*, 2017; Martins *et al.*, 2016; Scotter, 2011).

Los colorantes alimentarios se dividen en artificiales o sintéticos, idénticos a los naturales (análogos a los naturales, pero producidos sintéticamente) y naturales (Scotter, 2011). El término «colorante natural», puede referirse a extractos purificados o concentrados de frutas o vegetales ricos en pigmentos (Lehto *et al.*, 2017; Scotter, 2011). Existe una gran variedad de pigmentos presentes en la naturaleza, los cuales pueden ser extraídos y usarse en la industria alimentaria. En general, las antocianinas, betalainas y carotenoides, son los pigmentos más estudiados, con múltiples tonalidades como azules-rojos-morados (antocianinas), amarillos-rojos (betalainas) y amarillos-naranjas-rojos (carotenoides) (Martins *et al.*, 2016; Rodríguez-Amaya, 2016; Rodríguez-Amaya, 2019).

El uso y consumo de pigmentos ha ganado importancia debido a que presentan propiedades benéficas para la salud humana, como la reducción de síntomas o prevención de enfermedades crónico-degenerativas o cardiovasculares, así como la protección de las funciones cognitivas, además, pueden actuar como antiinflamatorios, analgésicos, entre otros (Chawla *et al.*, 2016; He y Giusti, 2010; Rodríguez-Amaya, 2016; Rodríguez-Amaya, 2019). Esto va de la mano con las nuevas tendencias del consumo de alimentos. Actualmente, los consumidores demandan alimentos

más saludables, de origen vegetal, ricos en antioxidantes y con menos aditivos artificiales (Martins *et al.*, 2016). No obstante, una de las principales desventajas del uso de estos pigmentos es la inestabilidad ante condiciones ambientales (pH, luz, oxígeno, temperatura, entre otros) y la dificultad al momento de su incorporación en alimentos (Ngamwonglumlert *et al.*, 2017; Rodríguez-Amaya, 2019). El desarrollo de pigmentos microencapsulados ha sido una de las principales opciones para su conservación, ya que de esta forma se incrementa su estabilidad (Castro-Enriquez *et al.*, 2019; Mahdavi *et al.*, 2014) y, en algunos casos, su solubilidad (De Marco *et al.*, 2013; Kshirsagar *et al.*, 2010). Al mismo tiempo, sirve como método de transporte de compuestos bioactivos y permite controlar la liberación de los mismos (Niu *et al.*, 2020; Ye *et al.*, 2018).

Se han utilizado diferentes agentes de encapsulación para la formación de la microcápsula. En especial, el uso de biopolímeros como las gomas provenientes de exudados de árboles y bacterias, o extraídas de semillas (Ahmad *et al.*, 2019; Hamdani *et al.*, 2019), las cuales presentan propiedades que ayudan a la formación de la pared y actúan como emulgentes (Hamdani *et al.*, 2019; Salarbashi y Tafaghodi, 2018), además de ser biocompatibles, biodegradables y seguras para su consumo (Gupta *et al.*, 2018). Se ha reportado el uso de gomas para la microencapsulación de pigmentos, como la goma arábica, goma de mezquite, goma xantana, goma guar, entre otras (Antigo *et al.*, 2017; Ochoa-Velasco *et al.*, 2017; Pavón-García *et al.*, 2011; Ravichandran *et al.*, 2014; Venil *et al.*, 2016).

El objetivo de la presente revisión es proveer información acerca del uso de gomas naturales, en la encapsulación de pigmentos (antocianinas, betalainas y carotenoides) mediante microencapsulación usando secado por atomización y liofilización, analizar el efecto de los factores de inestabilidad de pigmentos microencapsulados bajo diferentes condiciones de almacenamiento, así como la aplicación de los pigmentos en matrices alimenticias.

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 1. Microencapsulación de pigmentos

La microencapsulación permite que diferentes compuestos, entre ellos pigmentos, sean recubiertos por una matriz polimérica (homogénea o heterogénea) (Zhang *et al.*, 2020). Dentro de los

factores que influyen en la formación de la microcápsula, se encuentran el tamaño y las características de la microcápsula (figura 1a), el método de encapsulación (químico, físico o fisicoquímico), las condiciones del proceso, el método de homogeneización y la naturaleza física y química de la solución debido a los agentes de encapsulación (Aguir et al., 2016; Gharsallaoui et al., 2007).

Existen diferentes métodos de encapsulación para la conservación de compuestos activos naturales; no obstante, la liofilización y el secado por atomización son las técnicas más usadas (Corrêa et al., 2019; Ephrem et al., 2018; Labuschagne, 2018).

## 1.1. Obtención de pigmentos en polvo

### 1.1.1. Secado por atomización

El secado por atomización es la tecnología más utilizada para la microencapsulación, debido a que es barata, reproducible, capaz de operar en continuo y ofrece altos rendimientos (Bakry et al., 2016; Çam et al., 2014; Labuschagne, 2018). El proceso de microencapsulación mediante secado por atomización se basa en la eliminación de agua usando aire caliente y la reducción de tamaño de la gota mediante atomización (figura 1b) (Bakry et al., 2016; Santos et al., 2018). La eficiencia de encapsulación dependerá de los parámetros de operación (temperatura de entrada y salida, presión, flujo del aire de atomización y velocidad de alimentación) y del agente encapsulante. Diferentes autores han descrito el proceso de secado por atomización (Bakry et al., 2016; Gharsallaoui et al., 2007; Santos et al., 2018), el cual se puede resumir en tres etapas principales:

- i. Preparación de la mezcla de encapsulación. Esta puede llevarse a cabo por métodos físicos (agitación magnética, emulsión con un mezclador tipo *ultraturrax*, por ultrasonido o microfluidización) (Mahdi Jafari et al., 2006; Santana et al., 2016; Verma y Singh, 2015) o métodos químicos (coacervación simple o compleja; mayormente aplicada para pigmentos liposolubles, como los carotenoides) (Gomez-Estaca et al., 2016; Jain et al., 2016; Qv et al., 2011; Shaddel et al., 2018; Thakur et al., 2017).
- ii. Atomización. Durante esta etapa, la mezcla de alimentación se divide en pequeñas gotas, aumentando el área de contacto y mejorando la transferencia de energía y masa, lo cual agiliza la evaporación de agua (Santos et al., 2018; Steiner

et al., 2018). La forma y tamaño de la gota dependerán del tipo de atomización y la naturaleza de la solución alimentada (Santos et al., 2018).

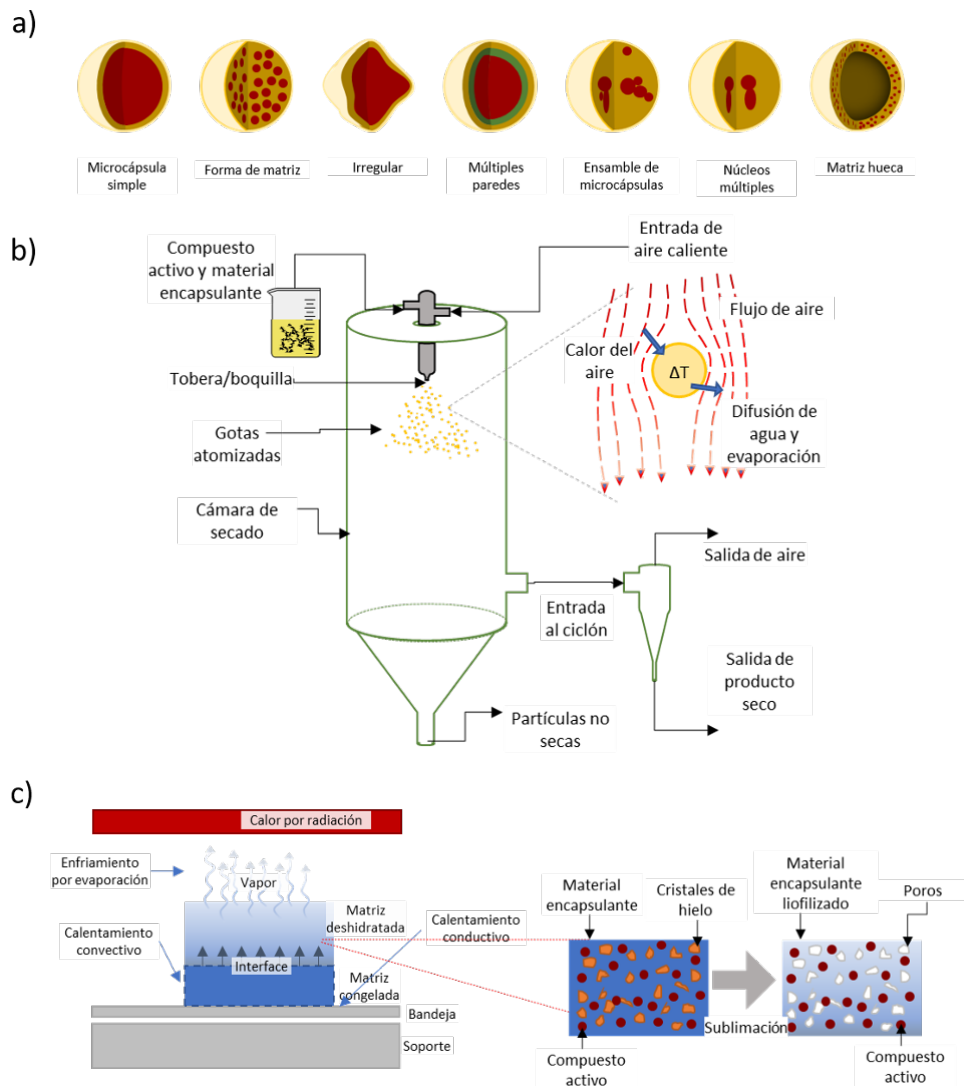
- iii. Deshidratación de la gota. Al entrar en contacto con el aire caliente (las temperaturas comúnmente usadas oscilan entre 150 y 220 °C), la transferencia de energía y masa ocurren de manera simultánea (figura 1b) (Bakry et al., 2016; Gharsallaoui et al., 2007). El proceso de deshidratación es casi instantáneo. Durante este, ocurre un incremento de la temperatura, difusión y evaporación del agua desde el centro hasta el exterior de la cápsula, encogimiento de la cápsula, concentración del material activo, y formación de la costra o pared (Dolinsky, 2001; Santos et al., 2018).

### 1.1.2. Liofilización

La liofilización es el segundo método de microencapsulación más usado, pese a que los costos pueden aumentar entre 30 y 50 veces más que el método de secado por atomización. Es excesivamente tardado, ya que el secado por atomización se puede llevar a cabo en segundos y la liofilización puede tardar días. Sin embargo, la liofilización es ideal cuando el compuesto activo es altamente termolábil (Bakry et al., 2016; Labuschagne, 2018) o cuando se desea retener todos los compuestos volátiles y/o preservar el color (Clark, 2009)

Durante la liofilización, la deshidratación ocurre después de la congelación bajo condiciones de vacío, lo cual propicia la sublimación (Morais et al., 2016). El proceso básico se representa esquemáticamente en la figura 1c. Consta de tres etapas principales, la primera es el congelamiento, a temperaturas menores a 0 °C (entre -18 y -80 °C) durante algunas horas (Ravichandran et al., 2014; Rezende et al., 2018; Yu y Lv, 2019); esta etapa ayuda a controlar los cristales de hielo (orientación, tamaño y morfología) (Fang y Bhandari, 2012). Se recomiendan lotes pequeños cuando la matriz a deshidratar es líquida (solución acuosa o suspensión) (Fang y Bhandari, 2012).

Las siguientes dos etapas son las de deshidratación, en la primera ocurre la sublimación del agua y el transporte del vapor de agua a la cámara de condensación. Uno de los problemas durante esta etapa, se da cuando la vaporización del hielo deja poros abiertos, donde el oxígeno presente en el aire puede interactuar con el compuesto activo y propiciar su degradación (Fang y Bhandari, 2012; Kuck y Noreña, 2016; Ozkan et al., 2019) o la su-



**Figura 1.**

Esquemas relacionados con la microencapsulación: a) tipos de microcápsula, b) proceso de deshidratación mediante secado por atomización, c) proceso de deshidratación mediante liofilización.

blimación incompleta debido a la formación de una barrera que impide el paso del vapor de agua (Kuck y Noreña, 2016). En la segunda etapa de deshidratación se aplica energía para remover el agua remanente (agua ligada / no congelable) (Clark, 2009; Fang y Bhandari, 2012). Una vez concluida esta etapa, el polvo se obtiene mediante un molido (manual o mecánico), lo que resulta en partículas irregulares y de tamaños diversos (Rezvankhah *et al.*, 2020).

## 1.2. Importancia de la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ )

La temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) es una propiedad

termodinámica de los polímeros amorfos, la cual está relacionada con la identidad, peso molecular y concentración de los productos en la mezcla «compuesto activo-agente de encapsulación» (Bhandari y Howes, 1999; Santos *et al.*, 2018). Se trata del paso de un material amorfo a su estado cristalino. El aumento de la temperatura por encima de la de transición vítrea (superior a 10-20 °C) genera cambios en las propiedades físicas, como el incremento en la capacidad calorífica ( $C_p$ ) y cambios en las propiedades viscoelásticas (Bhandari y Howes, 1999). Estos cambios en el secado por atomización

pueden propiciar que el producto se adhiera a las paredes de la cámara de secado o la aglomeración del producto (Santos *et al.*, 2018). Por otro lado, si durante la liofilización la temperatura de deshidratación es mayor a la  $T_g$  (conocida como temperatura de colapso) puede disminuir la viscosidad del material debido al cambio de la estructura sólida-cristalina a una gomosa-amorfa (Morais *et al.*, 2016); como resultado la estructura puede colapsar o deformarse y el producto final tener exceso de agua residual y problemas de rehidratación (Bhandari y Howes, 1999). Asimismo, a lo largo del almacenamiento, la  $T_g$  está relacionada con algunos mecanismos de deterioración de la microcápsula y del compuesto activo (Naik *et al.*, 2017).

Los compuestos presentes en los extractos usados para la encapsulación, como ácidos orgánicos o la fructosa, glucosa (monómeros) y sacarosa (disacárido), son de bajo peso molecular y, por consiguiente, de baja  $T_g$  —en los tres últimos, de 5, 31 y 62 °C, respectivamente—, a diferencia de la maltodextrina (MDX) de 10 ED (PM = 1800 g/mol), cuya  $T_g$  es de 160 °C. Por otro lado, el valor de la  $T_g$  se basa en las fracciones molares de los componentes en la mezcla, por lo que cada uno influye en el valor final de la  $T_g$  (Bhandari *et al.*, 1993). La adición de compuestos que incrementen la  $T_g$ , permite el secado a temperaturas más altas y ayuda a la formación de la pared que protege a los pigmentos (Zhang *et al.*, 2020). Los polímeros más comunes son hidrolizados de almidón como la MDX, almidones modificados, proteínas o gomas (Villacrez *et al.*, 2014). La selección del agente encapsulante dependerá de factores como la solubilidad, el peso molecular, la  $T_g$ , el punto de fusión, la cristalinidad, la difusividad, las propiedades para formar una película, y las propiedades emulgentes, además de la aplicación deseada del producto final (Bakry *et al.*, 2016; Gharsallaoui *et al.*, 2007).

## 2. Gomas usadas en la microencapsulación de pigmentos

Mahdavi *et al.* (2014) mencionan que en la microencapsulación los factores morfológicos del polvo, así como la baja humedad y actividad de agua, son tan importantes como la solubilidad y la higroscopicidad, ya que en ellos se basa la estabilidad de los compuestos. Además, la interacción de los grupos funcionales, la estructura y el grado de ramificaciones presentes en las gomas, influye en la estabilidad de los pigmentos (Zhang *et al.*, 2020), dando como resultado que el uso de los diferentes agentes encapsulantes resulte en propiedades fisicoquímicas carac-

terísticas de cada uno de ellos. En la tabla I se muestran los trabajos realizados en los últimos años en la encapsulación de pigmentos con gomas. Asimismo, en la tabla II se resumen algunas de las características de las gomas mencionadas en esta revisión.

### 2.1. Goma arábiga o acacia

De las gomas mencionadas en este trabajo, la goma arábiga o goma acacia (GA) es la más utilizada para la encapsulación de pigmentos (tabla I). La goma arábiga (GA) es el exudado del árbol de *Acacia senegal* o *Acacia seyal* y es una molécula compleja (heteropolisacárido ramificado, tabla II), casi esférica (figura 2), constituida por un arabinogalactano o unidades de  $\beta$ -D galactopiranosil unidas por los carbonos 1  $\rightarrow$  3 y 1 $\rightarrow$ 6 como cadena principal y ramificaciones  $\beta$ -D glucopiranosil ácido urónico unidas por los carbonos de 1 $\rightarrow$ 6. Estas cadenas pueden contener ácido glucurónico, galactopiranosil, arabinofuranosil y ramnosa (Nie *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2015).

La GA presenta buena solubilidad en agua, puede formar una película que favorece la encapsulación de pigmentos, se usa como estabilizante, espesante (en solución acuosa presenta comportamiento newtoniano), gelificante, y emulgente (posiblemente por su fracción proteica de aproximadamente 2 %), puesto que permite la encapsulación de compuestos como los carotenoides (Gharsallaoui *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2020).

Se ha utilizado ampliamente en la encapsulación de antocianinas, betalainas y carotenoides (tabla I). Como se mencionó, los factores morfológicos son importantes en la estabilidad. Zhang *et al.* (2020) compararon el uso de MDX, GA y la mezcla de ambos en la encapsulación de jugo de arándano. Los resultados de este estudio demostraron que las partículas fueron más esféricas, sin grietas o rupturas sobre la superficie, pero presentaban rugosidades. Los autores hipotetizan que la rugosidad puede deberse a la rápida formación de la costra por la presencia de la GA y la deshidratación desigual de la partícula, promoviendo un encogimiento irregular y mayor contenido de humedad. Estos resultados concuerdan con los de Yu y Lv (2019), quienes mencionan que las moléculas cuya cadena estructural es más larga impiden el paso o salida del agua de la microcápsula. Por el contrario, otros agentes de encapsulación, como la MDX, a pesar de ser capaces de formar una película, lo hacen con mayor lentitud y, si bien permiten una deshidratación más uniforme, el compuesto activo se encuentra más expuesto a ser deteriorado debido a la temperatura (Zhang *et al.*, 2020).

**Tabla I.** Secado por atomización y liofilización como métodos de microencapsulación de pigmentos naturales

| Fuentes   | Método de secado <sup>a</sup>               | Agente encapsulante <sup>b</sup>             | Concentración                                       |     | Condiciones de encapsulación <sup>c</sup>  | Eficiencia % | L*                   | a*        | b*        | Referencia                       |
|---|---|--|---|-----|--|--------------|----------------------|-----------|-----------|----------------------------------|
| <i>Antocianinas</i>                                   |   |  |   |     |  |              |                      |           |           |                                  |
| Jugo de arándanos ( <i>Vaccinium myrtillus</i> )      | SD  | GA   | 15 %  | w/v | T in = 185 °C;<br>T out = 105 °C           | 69.8         | -                    | -         | -         | Zhang <i>et al.</i> , 2020       |
|   |   | GA-MDX (1:1)                                 | 15 %  | w/v | T in = 185 °C;<br>T out = 105 °C           | 83.3         | -                    | -         | -         |                                  |
| Rosa japonesa ( <i>Rosa rugosa</i> )                  | SD  | GA-MDX (1:1)                                 | 10:100  | w/v | T in = 170 °C;<br>T out = 80 °C            | 69.83        | 77.57                | 11.7      | 5.86      | Yu y Lv, 2019                    |
|   | FD  | GA-MDX (1:1)                                 | 10:100  | w/v | T = - 52 °C;<br>t = 48 h;<br>P = 0.45 mbar | 72.15        | 66.83                | 17.4      | 1.04      |                                  |
| Pulpa de morera ( <i>Morus alba</i> )                 | FD  | GA   | 1:50, 1:60,<br>1:70, 1:80,<br>1:90, 1:100,<br>1:110 | w/w | -  | -            | -                    | -         | -         | Xu <i>et al.</i> , 2019          |
| Pulpa de mora andina ( <i>Rubus glaucus</i> Benth)    | SD  | GA   | 1:1   | w/w | T in = 120 °C;<br>T out = 70 °C            | -            | -                    | -         | -         | Villacrez <i>et al.</i> , 2014   |
|   |   | GA-MDX 20ED (1:1)                            | 1:1   | w/w | T in = 120 °C;<br>T out = 70 °C            | -            | -                    | -         | -         |                                  |
| Extracto de mora azul ( <i>Vaccinium corymbosum</i> ) | SD  | GA-MDX (1:4)                                 | 10 %  | w/w | T in = 125 °C                              | 83.33        | ΔE (extracto) = 6.53 |           |           | Tatar Turan <i>et al.</i> , 2015 |
|   | SD (atomizador ultrasónico, 60 kHz, 1-15 W) | GA-MDX (1:4)                                 | 10 %  | w/w | T in = 125 °C                              | 87           | ΔE (extracto) = 5.49 |           |           |                                  |
|   | FD  | GA-MDX (1:4)                                 | 10 %  | w/w | T = - 80 °C; t = 24 h;<br>P = 0.1 mbar     | 98           | ΔE (extracto) = 3.25 |           |           |                                  |
| Extracto de bagazo de uva                             | FD  | GA (solución, 30 % sólidos totales)          | -   | -   | t = 72 h                                   | 89.5         | 72.22                | 13.15     | 8.29      | Stoll <i>et al.</i> , 2016       |
|   |   | GA-MDX (1:1, solución, 30 % sólidos totales) | -   | -   |  | 89.61        | 73.43                | 16.39     | 6.17      |                                  |
| Frambuesas negras ( <i>Rubus occidentalis</i> )       | FD  | GA-gelatina (conservación)                   | -   | -   | -  | -            | 18.88-22.6           | 1.51-7.59 | 2.18-4.05 | Shaddel <i>et al.</i> , 2018     |
| Extracto de piel de berenjena                         | SD (atomizador rotatorio)                   | GA   | 10 %  | -   | T in = 140 °C                              | -            | 33.34                | 9.48      | 73.32     | Sarabandi <i>et al.</i> , 2019   |
|   |   |  |   |     | T in = 170 °C                              | -            | 34.61                | 9.15      | 73.41     |                                  |
|   |   | GA-MDX (1:1)                                 | 10 %  | -   | T in = 140 °C                              | -            | 32.37                | 10.66     | 70.08     |                                  |
|   |   |  |   |     | T in = 170 °C                              | -            | 34.39                | 10.06     | 70.85     |                                  |
| Pulpa de palmito                                      | SD  | GA-almidón modificado-WPC o SPI              | 1:1   | w/w | T in = 150 °C;<br>T out = 90 - 98 °C       | 80.3-99.4    | -                    | -         | -         | Santana <i>et al.</i> , 2016     |

**Tabla I.** Secado por atomización y liofilización como métodos de microencapsulación de pigmentos naturales (continuación)

| Fuentes  | Método de secado <sup>a</sup> | Agente encapsulante <sup>b</sup>              | Concentración |     | Condiciones de encapsulación <sup>c</sup>               | Eficiencia %                            | L*    | a*    | b*                           | Referencia                    |
|--|-------------------------------|---|---------------|-----|---|---|-------|-------|------------------------------|-------------------------------|
| Maqui ( <i>Aristotelia chilensis</i> )               | FD                            | GA  | 10            | w/v | T = - 80 °C; t = 72 h;<br>P = 25 mmHg                   | 24.2                                    | -     | -     | -                            | Romero-González et al., 2020  |
|  |                               |   | 20            | w/v |   | 5.9                                     | -     | -     | -                            |                               |
|  |                               |   | 30            | w/v |   | 20.1                                    | -     | -     | -                            |                               |
|  |                               | GA-MDX  | 10            | w/v |   | 23.7                                    | -     | -     | -                            |                               |
|  |                               |   | 20            | w/v |   | 6.2                                     | -     | -     | -                            |                               |
|  |                               |   | 30            | w/v |   | 18.2                                    | -     | -     | -                            |                               |
|  |                               | GA-inulina                                    | 10            | w/v |   | 27.2                                    | -     | -     | -                            |                               |
|  |                               |   | 20            | w/v |   | 7.5                                     | -     | -     | -                            |                               |
|  |                               |   | 30            | w/v |   | 30.3                                    | -     | -     | -                            |                               |
|  |                               | GA-MDX-inulina                                | 10            | w/v |   | 24.3                                    | -     | -     | -                            |                               |
|  |                               |   | 20            | w/v |   | 6.7                                     | -     | -     | -                            |                               |
|  |                               |   | 30            | w/v |   | 22.3                                    | -     | -     | -                            |                               |
| Jugo de tamarillo ( <i>Solanum betaceum</i> )        | SD (atomizador rotatorio)     | GA  | 20 %          | w/w | T in = 150 °C   | 83.16 antocianinas / 94.83 carotenoides | 64.66 | 20.23 | 6.23                         | Ramakrishnan, et al., 2018)   |
| Chokeberry ( <i>Aronia melanocarpa</i> ) liofilizado | SD                            | GA-MDX 18 20ED (3:37, solución, 40 % sólidos) | 1:3           | w/w | T in = 140 °C   | 78.61                                   | 74.01 | 11.2  | 4.92                         | Pieczykolan y Kurek, 2019     |
|  |                               | GG-MDX 18-20ED (3:37, solución, 40 % sólidos) | 1:3           | w/w | T in = 140 °C   | 91.98                                   | 74.4  | 9.04  | 4.43                         |                               |
| Arroz negro ( <i>Oryza sativa</i> L.)                | SD                            | GA  | 4:1           | w/w | T in = 150 °C   | -                                       | -     | -     | -                            | Papillo et al., 2018          |
|  |                               | GA-MDX (1:1)                                  | 4:1           | w/w |   | -                                       | -     | -     | -                            |                               |
|  | FD                            | GA  | 4:1           | w/w | T = - 40 / -35 °C;<br>t = 6 - 9 / 5 h;<br>P = 1.11 mbar | -                                       | -     | -     | -                            |                               |
|  |                               | GA-MDX (1:1)                                  | 4:1           | w/w |   | -                                       | -     | -     | -                            |                               |
| Jamaica ( <i>Hibiscus sabdariffa</i> )               | SD                            | GA-MDX (1:3)                                  | -             | -   | T in = 150 °C;<br>T out = 100 °C                        | -                                       | -     | -     | Akhavan Mahdavi et al., 2016 |                               |
| Xkijit ( <i>Renalmia alpina</i> )                    | SD                            | GA  | 1:3           | w/w | T in = 150 °C;<br>T out = 98 °C                         | -                                       | 28.3  | 23.12 | -6.58                        | Jimenez-Gonzalez et al., 2018 |
|  |                               | GA-MDX (1:1)                                  | 1:4           | w/w | T in = 150 °C;<br>T out = 98 °C                         | -                                       | 25.3  | 18.24 | -7.48                        |                               |
| Jamaica  | SD                            | GMez  | 1 %           | -   | T in = 180 °C;<br>T out = 104 °C                        | -                                       | 39.2  | 32.04 | 9.11                         | Ochoa-Velasco et al., 2017    |
|  |                               |   | 2 %           | -   |   | -                                       | 40    | 32.18 | 9.22                         |                               |
|  |                               |   | 3 %           | -   |   | -                                       | 40.94 | 32.01 | 8.98                         |                               |
|  |                               |   | 4 %           | -   |   | -                                       | 40.82 | 32.01 | 8.98                         |                               |
|  |                               |   | 5 %           | -   |   | -                                       | 40.53 | 31.44 | 8.95                         |                               |

**Tabla I.** Secado por atomización y liofilización como métodos de microencapsulación de pigmentos naturales (continuación)

| Fuentes                                  | Método de secado <sup>a</sup> | Agente encapsulante <sup>b</sup>                 | Concentración |     | Condiciones de encapsulación <sup>c</sup> | Eficiencia % | L*    | a*    | b*    | Referencia                           |   |       |       |      |  |
|--|-------------------------------|--|---------------|-----|---|--------------|-------|-------|-------|--------------------------------------|---|-------|-------|------|--|
| Mora azul                                | SD                            | GMez (solución, 17 %)                            | 67:33         | v/v | T in = 140 °C;<br>T out = 81 °C           | -            | 38.27 | 32.88 | 3.06  | Jiménez-Aguilar <i>et al.</i> , 2011 |   |       |       |      |  |
|  |                               |  |               |     | T in = 140 °C;<br>T out = 80 °C           | -            | 35.8  | 33.33 | 3.4   |                                      |   |       |       |      |  |
|  |                               |  |               |     | T in = 140 °C;<br>T out = 80 °C           | -            | 35.87 | 33.46 | 4.15  |                                      |   |       |       |      |  |
|  |                               |  |               |     | T in = 160 °C;<br>T out = 95 °C           | -            | 39.48 | 34.46 | 3.67  |                                      |   |       |       |      |  |
|  |                               |  |               |     | T in = 160 °C;<br>T out = 95 °C           | -            | 37.83 | 33.24 | 4.88  |                                      |   |       |       |      |  |
|  |                               |  |               |     |   |              |       |       |       | T in = 160 °C;<br>T out = 92 °C      | - | 36.21 | 33.53 | 5.89 |  |
| Mora azul                                | FD                            | GX-CMC   | -             | -   | T = -58 °C; t = 42 h;<br>P = 0.001 mbar   | -            | 45.87 | 4.95  | 0.26  | Cai <i>et al.</i> , 2019             |   |       |       |      |  |
| Morera                                   | SD                            | GA   | -             | -   | T in = 140 °C                             | -            | -     | -     | -     | Bernardes <i>et al.</i> , 2019       |   |       |       |      |  |
| Cáscara de uva                           | SD                            | GA-polidextrosa (1:1)                            | 10 %          | -   | T in = 140 °C                             | -            | 38.06 | 46.28 | -7.42 | Kuck y Noreña, 2016                  |   |       |       |      |  |
|  |                               | GA   | 10 %          | -   |   | -            | 40.17 | 46.29 | -9.57 |                                      |   |       |       |      |  |
|  | FD                            | GA-polidextrosa (1:1)                            | 10 %          | -   | T = -57 °C;<br>t = 48 h;<br>P = 20 µmHg   | -            | 22.46 | 27.11 | -0.44 |                                      |   |       |       |      |  |
|  |                               | GA   | 10 %          | -   |   | -            | 22.28 | 28.36 | -2.44 |                                      |   |       |       |      |  |
|  | SD                            | GG parcialmente hidrolizada - polidextrosa (1:1) | 10 %          | -   | T in = 140 °C                             | -            | 37.89 | 46.03 | -5.91 |                                      |   |       |       |      |  |
|  |                               | GG parcialmente hidrolizada                      | 10 %          | -   |   | -            | 40.33 | 46.22 | -6.33 |                                      |   |       |       |      |  |
|  | FD                            | GG parcialmente hidrolizada - polidextrosa (1:1) | 10 %          | -   | T = -57 °C; t = 48 h;<br>P = 20 µmHg      | -            | 20.63 | 25.36 | -1.02 |                                      |   |       |       |      |  |
|  |                               | GG parcialmente hidrolizada                      | 10 %          | -   |   | -            | 22.6  | 29.08 | -0.46 |                                      |   |       |       |      |  |
| <b>Betalainas</b>                        |                               |  |               |     |   |              |       |       |       |                                      |   |       |       |      |  |
| Jugo de betabel ( <i>Beta vulgaris</i> ) | SD                            | GA (solución, 30 %)                              | 1:3           | -   | T in = 180 °C; T out = 85 °C              | -            | 6.56  | 4.86  | 0.18  | Pitalua <i>et al.</i> , 2010         |   |       |       |      |  |
| Betabel                                  | SD                            | GA-MDX 20ED (1:19)                               | 20 %          | -   | T in = 90 - 102 °C                        | -            | 86.3  | 12.1  | -2.01 | Ravichandran <i>et al.</i> , 2014    |   |       |       |      |  |
|  |                               | GX-MDX 20ED (1:19)                               | 20 %          | -   |   | -            | 86.1  | 11.4  | -1.57 |                                      |   |       |       |      |  |

**Tabla I.** Secado por atomización y liofilización como métodos de microencapsulación de pigmentos naturales (continuación)

| Fuentes  | Método de secado <sup>a</sup>      | Agente encapsulante <sup>b</sup>                 | Concentración          |     | Condiciones de encapsulación <sup>c</sup> | Eficiencia % | L*    | a*    | b*    | Referencia                         |
|--|------------------------------------|--|------------------------|-----|---|--------------|-------|-------|-------|------------------------------------|
| Betabel  | FD                                 | GA-MDX 20ED (1:19)                               | 20 %                   | -   | T = °C; t = 72 h                          | -            | 75    | 16.2  | 2.69  | Ravichandran <i>et al.</i> , 2014  |
|  |                                    | GX-MDX 20ED (1:19)                               | 20 %                   | -   |   | -            | 71.3  | 21.2  | -1.11 |                                    |
|  |                                    | GX-MDX 20ED (0.5:19.5)                           | 20 %                   | -   |   | -            | 75.4  | 19    | -1.09 |                                    |
|  |                                    | GG-MDX 20ED (1:19)                               | 20 %                   | -   |   | -            | 72    | 21    | -0.4  |                                    |
|  |                                    | GG-MDX 20ED (0.5:19.5)                           | 20 %                   | -   |   | -            | 68.5  | 21.6  | -1.28 |                                    |
|  | FD                                 | GA (solución, 15 %)                              | 15 %                   | -   | T = - 57 °C; t = 48 h; P = 0.017 mbar     | -            | 64.64 | 35.27 | -2.91 | Chranioti <i>et al.</i> , 2015     |
|  |                                    | GA-almidón modificado (1:1, solución 15 %)       | relación 0.33          | w/w |   | -            | 60.48 | 34.13 | -3.57 |                                    |
|  | SD                                 | GX-MDX (solución, 0.5:99.5)                      | 30 %                   | w/w | T in = 150 °C; T out = 90 °C              | -            | -     | -     | -     | Antigo <i>et al.</i> , 2017        |
|  | FD                                 | GX-MDX (solución, 0.5:99.5)                      | 30 %                   | w/w | T = - 36 °C; t = 48 h; P = 1.09 Pa        | -            | -     | -     | -     |                                    |
|  | SD (atomizador de disco rotatorio) | GA   | 25 % (sólidos totales) | w/w | T in = 160 °C                             | -            | -     | -     | -     | Janiszewska, 2014                  |
| GA-MDX (1:1)   |                                    | 25 % (sólidos totales)                           | w/w                    | -   |   | -            | -     | -     |       |                                    |
| <b>Carotenoides</b>                                    |                                    |  |                        |     |   |              |       |       |       |                                    |
| Jugo de cereza brasileña ( <i>Eugenia uniflora</i> L.) | FD                                 | GX   | 1:1                    | -   | -   | 91.52        | -     | -     | -     | Rutz <i>et al.</i> , 2013          |
|  |                                    | GT   | 1:1                    | -   | -   | 92.67        | -     | -     | -     |                                    |
|  |                                    | GX-GT (1:1, soluciones al 5 %)                   | 1:1                    | -   | -   | 74.06        | -     | -     | -     |                                    |
| Azafrán ( <i>Crocus sativus</i> )                      | FD                                 | GA (solución, 15 %)                              | 15 %                   | -   | T = - 57 °C; t = 48 h; P = 0.017 mbar     | -            | 89.79 | -2.49 | 41.71 | Chranioti <i>et al.</i> , 2015     |
|  |                                    | GA-almidón modificado (1:1, solución 15 %)       | relación 0.33          | w/w |   | -            | 90.98 | -6.6  | 44.71 |                                    |
| Luteína  | SD                                 | GA (solución, 11 %)                              | -                      | -   | T in = 185 °C; T out = 100 °C             | 91.94        | -     | -     | -     | Álvarez-Henao <i>et al.</i> , 2018 |
|  |                                    | GA-MDX (1:1, solución 11 %)                      | -                      | -   |   | 38.82        | -     | -     | -     |                                    |
|  | SD                                 | GA-almidón modificado (1:1, solución 11 %)       | -                      | -   |   | 36.77        | -     | -     | -     |                                    |
|  |                                    | GA-MDX-almidón modificado (1:1:1, solución 11 %) | -                      | -   |   | 65.72        | -     | -     | -     |                                    |

**Tabla I.** Secado por atomización y liofilización como métodos de microencapsulación de pigmentos naturales (continuación)

| Fuentes  | Método de secado <sup>a</sup> | Agente encapsulante <sup>b</sup> | Concentración        |      | Condiciones de encapsulación <sup>c</sup> | Eficiencia % | L*    | a*    | b*    | Referencia                   |
|--|-------------------------------|----------------------------------|----------------------|------|---|--------------|-------|-------|-------|------------------------------|
| Algas  | SD                            | GA-MDX (4:6)                     | 20 %                 | w/w  | T in = 110 °C;<br>T out = 50 °C           | -            | -     | -     | -     | Bonilla-Ahumada et al., 2018 |
|  |                               |                                  |                      |      | T in = 130 °C;<br>T out = 55 °C           | -            | -     | -     | -     |                              |
|  |                               |                                  |                      |      | T in = 150 °C;<br>T out = 60 °C           | -            | -     | -     | -     |                              |
| Astaxantinas de <i>Haematococcus pluvialis</i>       | SD                            | GA                               | 10 %                 | w/w  | T in = 120 °C;<br>T out = 70 °C           | -            | 53    | 32    | 35.7  | Bustos-Garza et al., 2013    |
|  |                               | GA-inulina (1:1)                 | 10 %                 | w/w  |   | -            | 52.7  | 35.8  | 34.3  |                              |
|  |                               | GA-MDX (1:1)                     | 10 %                 | w/w  |   | -            | 57.9  | 17.9  | 49.7  |                              |
|  |                               | GA-WPC (1:1)                     | 10 %                 | w/w  |   | -            | 60.5  | 28.4  | 24.8  |                              |
|  |                               | GA-inulina (0.25:0.75)           | 10 %                 | w/w  |   | -            | 33.1  | 29.9  | 27.3  |                              |
|  |                               | GA-MDX (0.25:0.75)               | 10 %                 | w/w  |   | -            | 54.2  | 17.9  | 32.4  |                              |
| GA-WPC (0.25:0.75)                                   | 10 %                          | w/w                              | -                    | 54.2 | 35.1                                      | 36.8         |       |       |       |                              |
| Achiote (bixina)                                     | SD                            | GA-MDX (1:1)                     | 1:4                  | v/v  | T in = 180 °C;<br>T out = 130 °C          | 75.69        | -     | -     | -     | De Marco et al., 2013        |
| Maracuyá ( <i>Passiflora edulis</i> )                | SD                            | GA-Gmez-MDX 10ED (17:17:66 %)    | 30 % sólidos totales | -    | T in = 135 °C;<br>T out = 80 °C           | -            | -     | -     | -     | Carrillo-Navas et al., 2011  |
|  |                               | GA-Gmez-MDX 10ED (17:66:17 %)    | 30 % sólidos totales | -    |   | -            | -     | -     |       |                              |
| <i>Cantaxantina</i> de <i>Dietzia natronolimnaea</i> | SD                            | GA (solución, 10 %)              | 1:4                  | -    | T in = 170 °C;<br>T out = 90 °C           | 86.9         | -     | -     | -     | Hojjati et al., 2014         |
| Fucoxantina de alga ( <i>Eisenia bicyclis</i> )      | FD                            | GA-gelatina de pescado (1:1)     | 1.50 %               | -    | T = 10 °C; t = 30 h;<br>P = 37 Pa         | -            | -     | -     | -     | Quan et al., 2013            |
| Paprika  | SD                            | GA (0.03 %)                      | 1:4                  | -    | T in = 160 °C;<br>T out = 100 °C          | -            | -     | -     | -     | Rascón et al., 2011          |
|  |                               |                                  |                      | -    | T in = 180 °C;<br>T out = 100 °C          | -            | -     | -     | -     |                              |
|  |                               |                                  |                      | -    | T in = 200 °C;<br>T out = 100 °C          | -            | -     | -     | -     |                              |
| β-caroteno   | FD                            | GG                               | 0.05 %               | w/v  | P = 0.0098 mbar                           | 57.05        | -     | -     | -     | Thakur et al., 2017          |
|  |                               |                                  | 0.10 %               | w/v  |   | 62.6         | -     | -     | -     |                              |
|  |                               |                                  | 0.25 %               | w/v  |   | 63.16        | -     | -     | -     |                              |
|  |                               |                                  | 0.50 %               | w/v  |   | 65.95        | -     | -     | -     |                              |
| Sea buckthorn ( <i>Hippophae rhamnoides</i> L.)      | FD                            | GA (solución 1 %)                | 1:1                  | -    | T = -42°C; t = 48 h;<br>P = 0.1 mbar      | 56.16        | 81.03 | 10.74 | 75.98 | Ursache et al., 2018         |

<sup>a</sup> SD, secado por atomización (*spray drying*); FD, liofilización (*freeze drying*); <sup>b</sup> GA, goma arábica; Gmez, goma de mezquite; GG, goma guar; GX, goma xantana; GT, goma tara; MDX, maltodextrina; WPC, concentrado de proteína de suero de leche; SPI, aislado de proteína de soja; CMC, carboximetilcelulosa; <sup>c</sup> T, temperatura de liofilización; T in, temperatura de entrada en el secado por atomización; T out, temperatura de salida en el secado por atomización; t, tiempo en horas; P, presión.

No obstante, en algunos casos la combinación de más de un agente encapsulante es necesaria para obtener las propiedades de encapsulación esperadas del producto final. La mezcla GA-MDX, ha sido evaluada por diferentes autores, demostrando que la combinación tiene un efecto significativo en la retención de pigmentos, incrementando en un 13.5 % el contenido de antocianinas de jugo de arándano microencapsulado mediante secado por atomización, frente a los resultados obtenidos al utilizar GA como único agente encapsulante (Zhang *et al.*, 2020). Por el contrario, Stoll, Costa, Jablonski, Flôres y de Oliveira Rios (2016), así como Romero-González, Shun Ah-Hen, Lemus-Mondaca y Muñoz-Fariña (2020) no encontraron diferencias entre el uso de GA y GA-MDX en la encapsulación de antocianinas, usando liofilización, para el bagazo de uva y de frutos de maqui (*Aristotelia chilensis* [Mol.] Stuntz), respectivamente. En el caso de los carotenoides, Álvarez-Henao *et al.* (2018) encapsularon luteína mediante secado por atomización, encontrando que la GA presentó los valores más altos en la retención del pigmento; 53 % superior comparado con el que usó de GA-MDX, 55 % más que usando GA-almidón modificado y 26 % más que con una mezcla ternaria de GA-MDX-almidón modificado.

Otras mezclas que han sido utilizadas son GA-inulina, GA-MDX-inulina (Romero-González *et al.*, 2020), GA-gelatina (Shaddel *et al.*, 2018) y GA-polidextrosa (Kuck y Noreña, 2016), para an-

tocianinas. Santana *et al.* (2016) usaron GA-almidón modificado-WPC (concentrado de proteína de suero de leche) o SPI (aislado de proteína de soya), para la encapsulación de antocianinas, usando un diseño de mezclas para la optimización de diferentes parámetros físicos y antioxidantes, obteniendo mejores resultados en la retención del pigmento al utilizar las mezclas ternarias. De igual forma, se ha utilizado GA-almidón modificado para betalainas (Chranioti, *et al.*, 2015); GA-almidón modificado para luteína (Álvarez-Henao *et al.*, 2018), GA-inulina y GA-WPC para astaxantinas (Bustos-Garza *et al.*, 2013), y GA-gelatina de pescado para fucoxantinas (Quan *et al.*, 2013).

Se ha visto también que el método de encapsulación influye en la retención de los pigmentos. Antocianinas de rosa japonesa (*Rosa rugosa*) encapsuladas con GA-MDX (1 : 1), secadas por liofilización, presentaron 2.32 % más antocianinas en comparación con las secadas por atomización; lo cual se vio reflejado en el color de los polvos, incrementando los valores de  $a^*$  (relacionados con la presencia de antocianinas) (Yu y Lv, 2019). En otro estudio similar, Tatar Turan, Cengiz y Kahyaoglu (2015) realizaron el secado de antocianinas de mora azul (GA-MDX, 1 : 4), obteniendo aproximadamente 18 % más antocianinas microencapsuladas con liofilización que con secado por atomización y un valor de  $\Delta E$  menor (con respecto al extracto sin deshidratar) de todos los tratamientos evaluados.

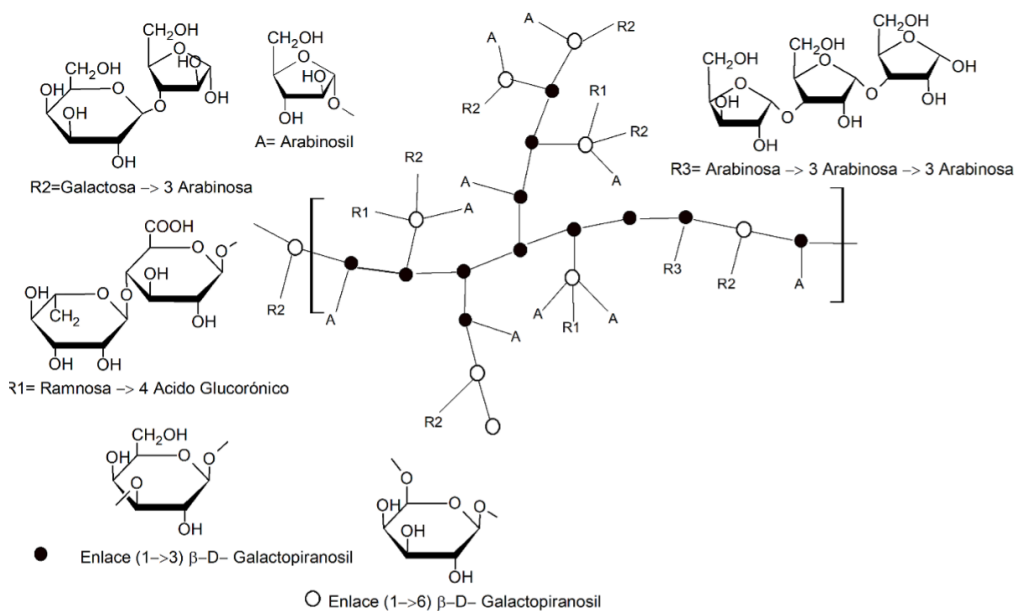


Figura 2.

Estructura molecular de goma arábiga.

**Tabla II.** Resumen de las propiedades de algunas gomas usadas en la encapsulación de pigmentos

| Nombre   | Carga     | Fuente               | Propiedades  | Unidades constituyentes  | PM (g/mol)        |
|----------|-----------|----------------------|--|--|-------------------|
| Arábica  | Aniónico  | Exudado de plantas   | Tetra-heteroglicano; emulgente, estabilizante, gelificante, formador de película y encapsulante  | $\beta$ -D-ácido glucopiranoúrico, $\alpha$ -L-rhamnopiranososa, $\beta$ -D-galactopiranososa, $\beta$ -D-4Me-ácido glucopiranoúrico, $\alpha$ -L-arabinosefuranosa, $\alpha$ -D-galactopiranososa | 250,000-820,000   |
| Mezquite | Aniónico  | Exudado de plantas   | Sal neutra de un polisacárido ramificado ácido complejo; puede sustituir a la goma arábica, emulgente, espesante, agente encapsulante para emulsiones, aromas, colores, agente espumante, capaz de formar película | Galactopiranosilo y manopiranosilo en (proporción 2:1) cadena principal enlazada con unidades de arabinosilo, ramnopiranosilo, glucuronosilo y metilglucuronosilo                                  | 2,120,864         |
| Xantana  | No iónico | Exudado de bacterias | Tri-heteroglicano; útil en la suspensión de partículas, emulgente, estabilizante, formador de película   | $\beta$ -D-glucosa, $\beta$ -d-manosa, $\alpha$ -d-manosa ácido D-glucurónico  | 300,000-8,000,000 |
| Guar     | No iónico | Semillas             | Di-heteroglicano; espesante, estabilizante, útil en la suspensión de partículas  | $\beta$ -d-manopiranososa, $\alpha$ -D-galactopiranososa   | 200,000-8,000,000 |

Adaptada de Ahmad *et al.*, 2019; Hamdani *et al.*, 2019; López-Franco *et al.*, 2009; Taheri y Jafari, 2019.

## 2.2. Goma de mezquite

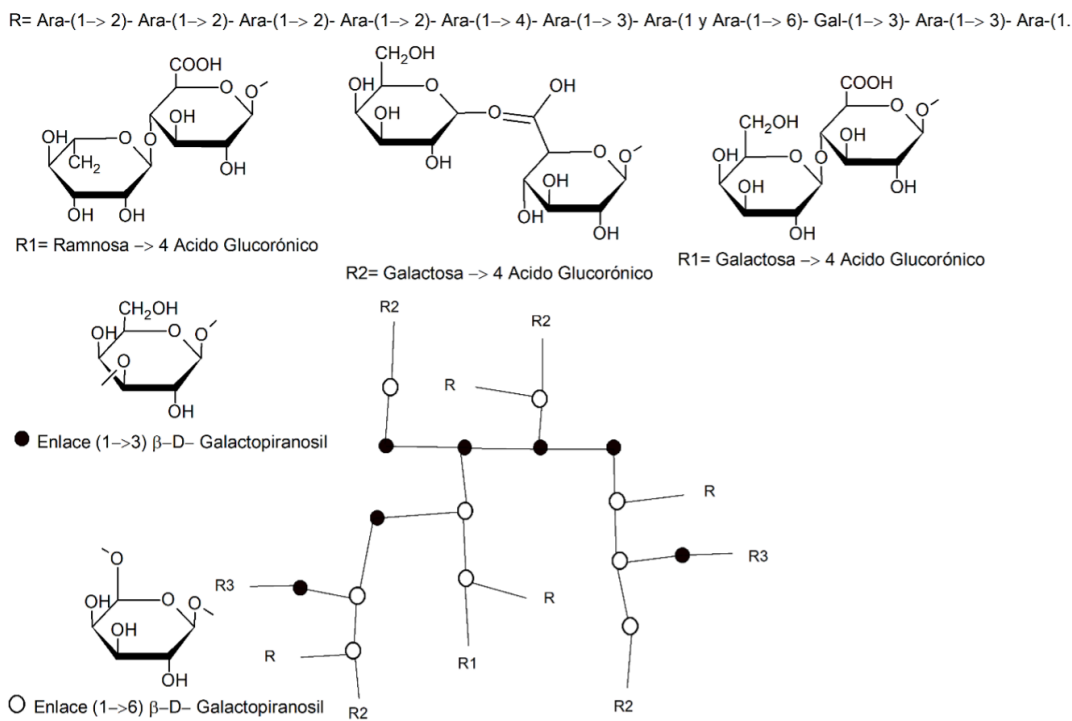
Al igual que la goma arábica, la goma de mezquite (GMez) es un exudado que proviene del árbol de mezquite, originario de México (Vernon-Carter *et al.*, 2000). Su uso en alimentos es bastante común, pues es altamente soluble en agua; incluso se le ha considerado un sustituto de la goma arábica. Se considera de menor calidad debido a que, en solución acuosa, toma una coloración café (López-Franco *et al.*, 2009; Mishra, 2015).

La GMez es la sal neutra de un polisacárido ácido complejo ramificado o un heteropolielectrolito aniónico ramificado (García-Márquez *et al.*, 2015; López-Franco *et al.*, 2009). La estructura molecular de la GMez (figura 3), consta de una cadena principal formada de residuos  $\beta$ -D-galactosa, unidos por los enlaces (1 $\rightarrow$ 3). Sus ramificaciones unidas por los enlaces 1 $\rightarrow$ 6 presentan L-arabinosa, L-ramnosa,  $\beta$ -D-glucuronato y 4-O-metil-  $\beta$ -D-glucoronato (azúcar simple u oligosacárido) (Bosquez-Molina *et al.*, 2003). Contiene una pequeña porción de proteína (entre 0.7

y 6%) unida de manera covalente a la cadena principal, la cual juega un papel importante durante la emulsión (García-Márquez *et al.*, 2015; Vernon-Carter *et al.*, 2000).

En la tabla II se presentan algunas propiedades de la GMez. Se ha utilizado en la encapsulación de sabores, como agente espumante, estabilizante y como agente ligante (Vernon-Carter *et al.*, 2000). El incremento en el uso de esta goma representaría una oportunidad para las comunidades productoras de este aditivo (Rodríguez-Rodríguez *et al.*, 2018).

Muy pocos trabajos han reportado el uso de la GMez para la encapsulación de pigmentos (tabla I). Uno de ellos es el realizado por Jiménez-Aguilar *et al.* (2011) para la encapsulación de antocianinas de mora azul (*Vaccinium corymbosum*) mediante secado por atomización. En este trabajo, la temperatura fue el factor principal que afectó la degradación de los pigmentos. Por otro lado, Ochoa-Velasco *et al.* (2017) utilizaron antocianinas de flor de Jamaica y probaron diferentes concentraciones de GMez (1, 2,



**Figura 3.**

Estructura molecular de goma de mezquite.

3, 4, 5 %), las cuales fueron deshidratadas por atomización. Los resultados obtenidos muestran que incrementar la cantidad de Gmez en la mezcla de alimentación no tiene efecto en la humedad del producto final, pero incrementa el rendimiento. No obstante, los autores argumentan que la adición excesiva de goma al extracto genera polvos con baja calidad nutricional. Además, el incremento en la concentración de Gmez afecta el color del producto, disminuyendo los valores del parámetro de color  $a^*$ . No obstante, gracias al uso de la Gmez, el contenido de antocianinas y el color pueden mantenerse, con ligeras variaciones, hasta por un año en condiciones de refrigeración (4 °C).

Al igual que la GA, el uso de la Gmez resulta en partículas con rugosidades sobre la superficie de la esfera (Ochoa-Velasco *et al.*, 2017), esto puede deberse a las similitudes entre ambas gomas (López-Franco *et al.*, 2009; Vernon-Carter *et al.*, 2000), ocasionando la formación de una costra y el secado desigual de la partícula (Zhang *et al.*, 2020).

La Gmez, en combinación con GA y MDX, ha sido utilizada para la encapsulación de jugo de maracuyá. Los resultados obtenidos por Carrillo-Navas *et al.* (2011) demostraron que la combinación de los tres agentes encapsulantes genera polvos altamente higroscópicos por el gran número de grupos hidrofílicos presentes en los tres agentes. De las dos formulaciones probadas (mayor concentración de Gmez o mayor concentración de MDX), los polvos donde la Gmez se encontraba en mayor proporción presentaron mejores características de rehidratación, retención de vitamina C y color (determinación visual) en el producto reconstituido.

La encapsulación de aceite de cardamomo (Beristain *et al.*, 2001) y aceite de naranja (Beristain *et al.*, 2002; Beristain y Vernon-Carter, 1994) ha demostrado que compuestos liposolubles como los carotenoides pueden ser estabilizados utilizando Gmez y secado por atomización. Hasta el momento no se encontraron reportes del uso de la Gmez en la encapsulación de betalainas, o su uso en el secado por liofilización de cualquiera de los pigmentos.

### 2.3. Goma xantana

La goma xantana (GX) es un polisacárido soluble en agua obtenido de la fermentación por *Xanthomonas campestris*. Se utiliza glucosa o sacarosa como fuente de carbono; una alternativa para su obtención es el uso de residuos agroindustriales (Palaniraj y Jayaraman, 2011).

La estructura molecular de la GX (figura 4) consta de una cadena primaria compuesta de  $\beta$ -D-glucosa unida por los carbonos 1 $\rightarrow$ 4 y cadenas laterales con ácido glucurónico entre dos moléculas de manosa como residuo (Habibi y Khosravi-Darani, 2017). Algunas de sus características funcionales se encuentran en la tabla II. La GX es ampliamente usada en alimentos; como espesante (altamente viscosa a bajas concentraciones) presenta un comportamiento pseudoplástico en soluciones acuosas en un amplio intervalo de pH (2-12) y es estable a altas temperaturas (Kumar *et al.*, 2018). Tiene la capacidad de estabilizar emulsiones evitando la floculación (Fu *et al.*, 2019). Asimismo, la GX puede generar estructuras en forma de red mediante el entrecruzamiento intramolecular y contracción de sus mismas cadenas laterales (Kumar *et al.*, 2018).

Debido a esas mismas características, se ha utilizado en la encapsulación de pigmentos (antocianinas, betalainas y carotenoides) (tabla I). Sin embargo, este agente encapsulante debe usarse en concentraciones muy bajas (Antigo *et al.*, 2017; Ravichandran *et al.*, 2014; Rutz *et al.*, 2013).

Para la encapsulación de antocianinas de mora azul mediante liofilización, Cai *et al.* (2019) probaron distintas concentraciones de carboximetilcelulosa y GX (30 : 1, 60 : 1, 90 : 1, 120 : 1, 150 : 1, w/w). Los resultados de ese trabajo demostraron que la eficiencia de encapsulación no depende de la relación entre los agentes encapsulantes, ya que todos se encontraron entre 96 y 97 %. Los autores destacan que la combinación de ambos agentes de encapsulación tiene un efecto sinérgico en la absorción de antocianinas y genera la formación de una película debido a las propiedades fisicoquímicas de ambas moléculas. Los autores también indican que las cargas negativas de la carboximetilcelulosa se repelen unas con otras, adsorbiendo agua y, dada la naturaleza hidrofílica de la GX, se une a la carboximetilcelulosa formando una red o película que protege a las antocianinas de la degradación durante el secado. Este efecto se confirmó mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

Por otro lado, Ravichandran *et al.* (2014) y Antigo *et al.* (2017) reportan investigaciones enfocadas en la encapsulación de betalainas con GX-MDX en betabel, comparando el efecto del método de encapsulación (secado por atomización contra liofilización). Los resultados obtenidos por Ravichandran *et al.* (2014) sugieren que el método ideal para la encapsulación es la liofilización, ya que se retuvo 1.3 veces más betalainas que con el secado por atomización. El color de los polvos obtenidos mediante secado por atomización resultó más claro (valores de  $L^*$  más altos). Los valores de  $a^*$  disminuyeron cerca de la mitad, en comparación con los obtenidos por liofilización; haciendo evidente el efecto de la temperatura como un factor determinante en la obtención de los pigmentos microencapsulados.

### 2.4. Goma guar

La goma guar (GG) proviene del endospermo de la semilla de *Cyamopsis tetragonolobus*. Es un galactomanano cuya ausencia de ácido urónico la distingue del resto de las gomas provenientes de semillas (Cano-Barrita y León-Martínez, 2016; George *et al.*, 2019).

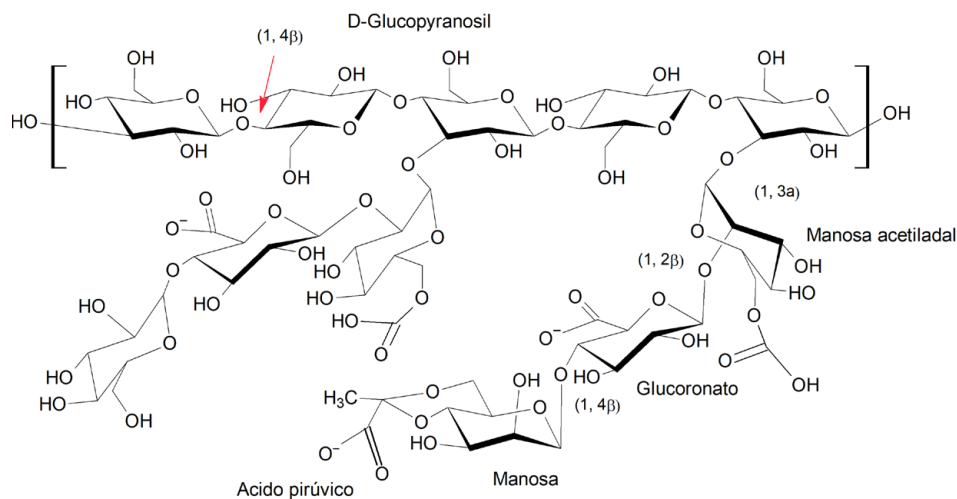
La estructura molecular (figura 5) consiste en una cadena principal constituida por unidades de  $\alpha$ -D-galactosa unidas por los carbonos 1 $\rightarrow$ 4. La estructura tiene múltiples ramificaciones al azar de manosa/galactosa, las cuales se encuentran en proporción 2 : 1 (Hasan y Abdel-Raouf, 2018). De las gomas presentadas en este trabajo, la GG tiene el peso molecular más alto (tabla II).

La GG presenta propiedades similares a la GX, sin embargo, se caracteriza por su capacidad de absorber agua. Cuando la GG interactúa con el agua, la galactosa en las ramificaciones de la molécula unida a la cadena principal de manosa forma entrelazamientos intermoleculares, lo cual puede incrementar la viscosidad de la solución, incluso a bajas concentraciones (1 % w/v, solución acuosa, 10,000 cP) (Sharma *et al.*, 2018).

La microencapsulación por el método de liofilización de pigmentos con GG es más conveniente que el secado por atomización. Para este último es necesario llevar a cabo la hidrólisis de la goma, debido a que las propiedades de rehidratación y de entrecruzamiento incrementan la viscosidad, lo que impide el paso a través de la tobera (Kuck y Noreña, 2016; Ravichandran *et al.*, 2014). De acuerdo con Kuck y Noreña (2016), la encapsu-

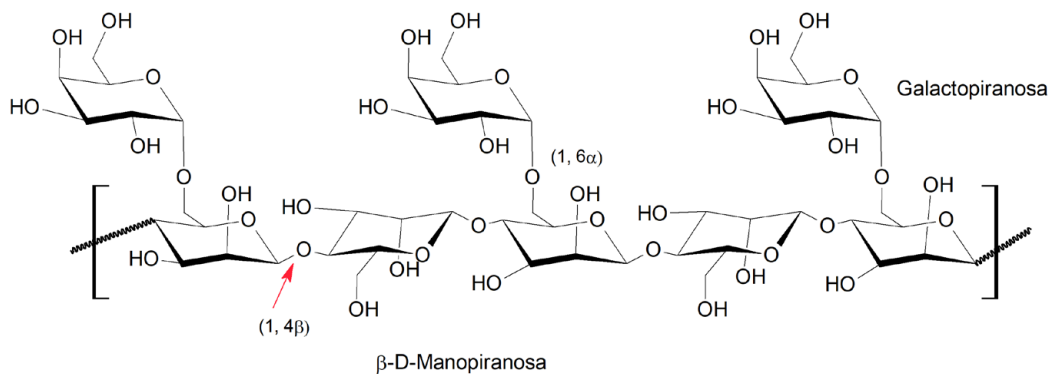
solución de antocianinas usando GG parcialmente hidrolizada y secado por atomización resultó en los valores más altos en la retención de antocianinas (combinada con povidona sola), con valores similares a los presentes al extracto sin deshidratar. Por el contrario, la liofilización fue capaz de retener parte de las antocianinas, pero los valores fueron menores a los obtenidos mediante secado por atomización, por lo que la GG

hidrolizada no protege a las antocianinas durante la liofilización. En lo que respecta a la retención del color, se registró el mismo comportamiento que en el contenido de antocianinas, siendo que el secado por atomización presentó los valores de  $a^*$  más altos, alrededor de 41 % más retención del color rojo en comparación con la liofilización.



**Figura 4.**

Estructura molecular de la goma xantana.



**Figura 5.**

Estructura molecular de la goma guar.

### 3. Estabilidad de los pigmentos

Durante la preparación de alimentos, los ingredientes se someten a diferentes procesos. Estos pueden involucrar cambios en la temperatura; incrementándose debido a la pasteurización, escaldado, esterilización, o bien disminuyendo debido a las condiciones de almacenamiento en refrigeración o congelación, de igual forma pueden presentarse cambios químicos (pH, oxígeno) (Başlar *et al.*, 2014; Ling *et al.*, 2015).

#### 3.1. Efecto de las condiciones de almacenamiento

Algunos autores hacen uso de herramientas estadísticas y probabilísticas para observar el comportamiento de los materiales de encapsulación y el compuesto activo bajo diferentes condiciones de almacenamiento (Yu y Lv, 2019). La cinética de reacción de la mayoría de los procesos estudiados en la degradación de pigmentos microencapsulados corresponde a un comportamiento de primer orden  $C_t = C_0 e^{-kt}$ , donde  $C_0$  es la concentración inicial;  $C_t$ , la concentración al tiempo ( $t$ ); y  $k$  es la constante de degradación, la cual se utiliza para el cálculo de la vida media ( $t_{1/2} = \log(2)/k$ ). En la tabla III se muestra un resumen de los datos cinéticos de degradación de antocianinas, betalaínas y carotenoides microencapsulados bajo diferentes condiciones de almacenamiento. En los siguientes apartados se explican a detalle los efectos de diversos factores durante el almacenamiento de los pigmentos microencapsulados y la degradación de algunas de sus propiedades.

##### 3.1.1. Efecto de la temperatura

De forma general, los autores que han evaluado el efecto de la temperatura sobre la constante de degradación observaron que, al incrementar la temperatura durante el almacenamiento, también lo hace  $k$ , lo cual se refleja en la pérdida de pigmentos y una  $t_{1/2}$  más corta (Akhavan Mahdavi *et al.*, 2016; Bustos-Garza

*et al.*, 2013; Hojjati *et al.*, 2014; Jiménez-Aguilar *et al.*, 2011; Yu y Lv, 2019; Zhang *et al.*, 2020). Por el contrario, temperaturas de refrigeración disminuyen el valor de  $k$ , ya que limitan la movilidad de las moléculas de agua que pueden estar presentes en el producto (pigmentos microencapsulados), además, temperaturas por debajo de la  $T_g$ , hacen menos probable que sucedan las reacciones. No obstante, la reducción de la temperatura por debajo de la  $T_g$  no es el único parámetro del cual depende la estabilidad de los pigmentos microencapsulados (Pitalua *et al.*, 2010).

##### 3.1.2. Influencia del agente encapsulante

Chranioti *et al.* (2015) observaron la influencia de diferentes agentes de encapsulación (GA y GA-almidón modificado) a condiciones fijas de almacenamiento ( $T = 40^\circ\text{C}$ , HR = 20 % y ausencia de luz) sobre la degradación de betalaínas y carotenoides. Ellos reportan que el uso exclusivo de MDX protege mejor a ambos pigmentos en comparación con GA y GA-almidón modificado. También indican que, al agregar GA a la mezcla, incrementaba la estabilidad en comparación con almidón modificado y quitosano. En otro estudio, Zhang *et al.* (2020) evaluaron GA y GA-MDX a las mismas condiciones de almacenamiento ( $T = 40^\circ\text{C}$ , HR = 40 %, sin luz); observaron que la adición de MDX incrementó el valor de  $k$  aproximadamente dos veces más que solo GA, lo cual disminuye el valor de  $t_{1/2}$  de almacenamiento, de 495 a 25 días. Lo anterior puede estar relacionado con la compatibilidad del compuesto activo con el agente encapsulante y la formación de moléculas más estables (Jimenez-Gonzalez *et al.*, 2018; Moser *et al.*, 2017).

##### 3.1.3. Influencia de la humedad relativa

Rascón, Beristain, García y Salgado (2011) evaluaron el efecto de la humedad relativa (HR) en pigmentos de paprika microencapsulados con GA mediante secado por atomización,

mientras que Pitalua *et al.* (2010) hicieron lo propio en betalainas de betabel y GA. Ambos estudios concluyen que las mejores condiciones de almacenamiento son por debajo del 52 % de humedad relativa (HR), ya que valores más altos provocan un colapso en la estructura de la cápsula y degradación de los compuestos encapsulados (Pitalua *et al.*, 2010). Además, por encima del 70 % de HR se produce absorción de agua y cambios de estado físico (Rascón *et al.*, 2011); si bien, los autores reportan que este cambio de estado generó a una especie de masa que actuó como una barrera protectora contra el oxígeno y mantuvo los pigmentos durante más tiempo, el cambio de estado dificulta su adición cuando se utiliza como colorante en alimentos.

### 3.1.4. Influencia por exposición a la luz

El efecto de la luz es otro de los parámetros que más se ha estudiado. Jiménez-Aguilar *et al.* (2011), Rutz *et al.* (2013), Hojjati *et al.* (2014) y De Marco *et al.* (2013) observaron antocianinas de mora azul (*Vaccinium corymbosum*) encapsuladas con GMEZ, carotenoides de jugo de cereza brasileña (*Eugenia uniflora* L.) encapsuladas con GX, cantaxantinas de *Dietzia natronolimnaea* encapsuladas con GA, y bixina de achiote (*Bixa orellana*) encapsulada con GA-MDX, respectivamente. En todos los casos se concluyó que se degradaban a mayor velocidad (mayor valor de  $k$ , menor valor de  $t_{1/2}$ ) por la exposición de la luz durante el almacenamiento. En el caso de las antocianinas encapsuladas, Jiménez-Aguilar *et al.* (2011) reportaron una reducción de 717 a 70 días en los valores de vida media ( $t_{1/2}$ ) por la exposición de los microencapsulados a la luz (3000 lx / 25 °C). Mientras que De Marco *et al.* (2013) agregaron los pigmentos de bixina encapsulados a una solución acuosa, almacenada por 450 horas, al exponerlos a luz fluorescente (15 W / 25 °C), observaron una disminución de 231 a 44 días en el  $t_{1/2}$ .

### 3.1.5. Influencia de la morfología e interacción con el oxígeno

Como se mencionó previamente, la estructura de la microcápsula puede dictar la estabilidad de los pigmentos debido a las rugosidades, tamaño de partícula, grietas, entre otros. Al incrementar el área superficial, los compuestos activos pueden estar más expuestos a la interacción con el oxígeno (Zhang *et al.*, 2020), dando como resultado una degradación de los pigmentos. Este fenómeno ha sido reportado por Haas *et al.* (2019), quienes encapsularon concentrado de zanahoria mediante secado por atomización y liofilización, obteniendo diferentes tamaños de partícula (área superficial). Los pigmentos encapsulados mediante secado por atomización con mayor área superficial fueron más estables después de 91 días de almacenamiento, con aproximadamente un 20 % más carotenoides al finalizar el experimento. Por otro lado, el polvo obtenido mediante liofilización en dos morfologías (polvo fino, y polvo más grande y amorfo), las partículas más grandes retuvieron cerca de un 10 % más carotenoides que el polvo fino.

Además, el método de encapsulación afecta a la retención, ya que las partículas más uniformes, como las obtenidas mediante secado por atomización, protegen mejor a los pigmentos que las obtenidas por liofilización (Haas *et al.*, 2019); pues la molienda del producto puede ser manual, generando partículas grandes e irregulares. Asimismo, el contenido de humedad en la microcápsula, el espesor de la pared, la porosidad, higroscopicidad, entre otros, estarán en función del método de encapsulación y pueden ser factores importantes en la degradación de los pigmentos debido a la interacción con el oxígeno.

### 3.1.6. Efecto del pH

Debido a que la adición de los pigmentos se hace en matrices de diferente composición (lácteos, cárnicos, jugos, dul-

ces, entre otros), los valores de pH son diferentes. La evaluación de la estabilidad bajo diferentes valores de pH ha sido estudiada por Bustos-Garza *et al.* (2013), quienes observaron que la estabilidad depende del agente encapsulante en microencapsulados de astaxantina con GA, GA-inulina, GA-MDX y GA-WPC, adicionados a soluciones con valores de pH entre 3 y 7, almacenados durante 96 horas. Los microencapsulados de GA-WPC (1 : 1) y GA-inulina (1 : 3) fueron más estables

en soluciones con pH 6. Mientras que betalaínas de betabel encapsuladas con GX no mostraron dependencia al pH, pero sí al método de encapsulación. Los polvos obtenidos mediante secado por atomización y adicionados a una solución con pH 6 fueron menos estables que los obtenidos por liofilización, con una degradación al final del periodo de almacenamiento (7 días) del 44.9 % y 19.6 %, respectivamente (Antigo *et al.*, 2017).

**Tabla III.** Cinéticas de degradación de los pigmentos microencapsulados

| Fuente   | Goma <sup>a</sup> | Método de secado <sup>b</sup> | Condiciones de almacenamiento <sup>c</sup>                 | $k \times 10^3$<br>(días <sup>-1</sup> ) | $t_{1/2}$<br>(días) | Referencias                             |
|--|-------------------|-------------------------------|--|--|---------------------|---|
| Jugo de arándanos<br>( <i>Vaccinium corymbosum</i> ) | GA                | SD                            | T(°C) = 4; O <sub>2</sub> = libre;<br>Luz = no; RH % = 40  | -  | -                   | Zhang<br><i>et al.</i> , 2020           |
|  |                   |                               | T(°C) = 25; O <sub>2</sub> = libre;<br>Luz = no; RH % = 40 | -  | -                   |   |
|  |                   |                               | T(°C) = 45; O <sub>2</sub> = libre;<br>Luz = no; RH % = 40 | 1.4                                      | 495                 |   |
|  | GA-MDX (1:1)      | SD                            | T(°C) = 4; O <sub>2</sub> = libre;<br>Luz = no; RH % = 40  | -  | -                   |   |
|  |                   |                               | T(°C) = 25; O <sub>2</sub> = libre;<br>Luz = no; RH % = 40 | -  | -                   |   |
|  |                   |                               | T(°C) = 45; O <sub>2</sub> = libre;<br>Luz = no; RH % = 40 | 2.77                                     | 25                  |   |
| Rosa japonesa<br>( <i>Rosa rugosa</i> )              | GA-MDX (1:1)      | SD                            | T(°C) = 70   | 2088                                     | 0.33                | Yu y Lv, 2019                           |
|  |                   |                               | T(°C) = 80   | 3283                                     | 0.21                |   |
|  |                   |                               | T(°C) = 90   | 5860                                     | 0.12                |   |
|  | GA-MDX (1:1)      | FD                            | T(°C) = 70   | 1713                                     | 0.4                 |   |
|  |                   |                               | T(°C) = 80   | 2491                                     | 0.28                |   |
|  |                   |                               | T(°C) = 90   | 3974                                     | 0.17                |   |
| Jamaica ( <i>Hibiscus sabdariffa</i> )               | GA-MDX (1:3)      | SD                            | T(°C) = 4; Luz = no  | 3.3                                      | 213.5               | Akhavan Mahdavi<br><i>et al.</i> , 2016 |
|  |                   |                               | T(°C) = 25; Luz = no                                       | 4.6                                      | 153.11              |   |
|  |                   |                               | T(°C) = 35; Luz = no                                       | 7.5                                      | 93.94               |   |
|  |                   |                               | T(°C) = 42; Luz = no                                       | 11.3                                     | 62.22               |   |
| Mora azul<br>( <i>Vaccinium myrtillus</i> )          | GMez              | SD                            | T(°C) = 4; Luz = no  | 0.1295                                   | 259                 | Jiménez-Aguilar<br><i>et al.</i> , 2011 |
|  |                   |                               | T(°C) = 25; Luz = sí                                       | 0.4767                                   | 70                  |   |
|  |                   |                               | T(°C) = 25; Luz = no                                       | 0.2905                                   | 717                 |   |
| Jugo de betabel                                      | GA (30 %)         | SD                            | T(°C) = 30; RH % = 11                                      | -  | -                   | Pitalua<br><i>et al.</i> , 2010         |
|  |                   |                               | T(°C) = 30; RH % = 32.6                                    | -  | -                   |   |
|  |                   |                               | T(°C) = 30; RH % = 52.1                                    | -  | -                   |   |
|  |                   |                               | T(°C) = 30; RH % = 74.8                                    | -  | -                   |   |
|  |                   |                               | T(°C) = 30; RH % = 89.8                                    | -  | -                   |   |

**Tabla III.** Cinéticas de degradación de los pigmentos microencapsulados (continuación)

| Fuente   | Goma <sup>a</sup>           | Método de secado <sup>b</sup> | Condiciones de almacenamiento <sup>c</sup> | $k \times 10^3$ (días <sup>-1</sup> ) | $t_{1/2}$ (días) | Referencias               |
|--|-----------------------------|-------------------------------|--|---------------------------------------|------------------|---------------------------|
| Betabel ( <i>Beta vulgaris</i> )                       | GA (15 %)                   | FD                            | T(°C) = 40; Luz = no; RH % = 20            | 0.574                                 | 350.84           | Chranioti et al., 2015    |
|  | GA-almidón modificado (1:1) | FD                            | T(°C) = 40; Luz = no; RH % = 20            | 0.637                                 | 312.62           |                           |
|  | GX-MDX (0.5:99.5)           | SD                            | pH = 3; T(°C) = 30; O <sub>2</sub> = no    | 127.3                                 | 5.4              | Antigo et al., 2017       |
|  |                             |                               | pH = 4; T(°C) = 30; O <sub>2</sub> = no    | 119.1                                 | 5.8              |                           |
|  |                             |                               | pH = 5; T(°C) = 30; O <sub>2</sub> = no    | 108.4                                 | 6.3              |                           |
|  |                             |                               | pH = 6; T(°C) = 30; O <sub>2</sub> = no    | 118.8                                 | 5.8              |                           |
|  | GX-MDX (0.5:99.5)           | FD                            | pH = 3; T(°C) = 30; O <sub>2</sub> = no    | 91.3                                  | 7.6              |                           |
|  |                             |                               | pH = 4; T(°C) = 30; O <sub>2</sub> = no    | 91.8                                  | 7.5              |                           |
|  |                             |                               | pH = 5; T(°C) = 30; O <sub>2</sub> = no    | 105.7                                 | 6.5              |                           |
|  |                             |                               | pH = 6; T(°C) = 30; O <sub>2</sub> = no    | 101.4                                 | 6.8              |                           |
| Jugo de cereza brasileña ( <i>Eugenia uniflora</i> L.) | GX                          | FD                            | Luz = sí                                   | -                                     | -                | Rutz et al., 2013         |
|  | GT                          |                               | Luz = sí                                   | -                                     | -                |                           |
|  | GX-GT (1:1)                 |                               | Luz = sí                                   | -                                     | -                |                           |
| Azafrán ( <i>Crocus sativus</i> )                      | GA                          | FD                            | T(°C) = 40; Luz = no; RH % = 20            | 0.819                                 | 242.13           | Chranioti et al., 2015    |
|  | GA-almidón modificado (1:1) |                               | T(°C) = 40; Luz = no; RH % = 20            | 0.602                                 | 329.84           |                           |
| Astaxantinas de <i>Haematococcus pluvialis</i>         | GA                          | SD                            | T(°C) = 30                                 | -                                     | -                | Bustos-Garza et al., 2013 |
|  | GA-inulina (1:1)            |                               | T(°C) = 40                                 | -                                     | -                |                           |
|  | GA-MDX (1:1)                |                               | T(°C) = 50                                 | -                                     | -                |                           |
|  | GA-WPC (1:1)                |                               | pH = 3; T(°C) = 25                         | -                                     | -                |                           |
|  | GA-inulina (0.25:0.75)      |                               | pH = 4; T(°C) = 25                         | -                                     | -                |                           |
|  | GA-MDX (0.25:0.75)          |                               | pH = 5; T(°C) = 25                         | -                                     | -                |                           |
|  | GA-WPC (0.25:0.75)          |                               | pH = 6; T(°C) = 25                         | -                                     | -                |                           |
| Achiote (bixina) ( <i>Bixa orellana</i> )              | GA-MDX (1:1)                | SD                            | Luz = sí                                   | 15.7                                  | 44.15            | De Marco et al., 2013     |
|  |                             |                               | Luz = no                                   | 3                                     | 231.05           |                           |

**Tabla III.** Cinéticas de degradación de los pigmentos microencapsulados (continuación)

| Fuente  | Goma <sup>a</sup> | Método de secado <sup>b</sup> | Condiciones de almacenamiento <sup>c</sup> | $k \times 10^3$<br>(días <sup>-1</sup> ) | $t_{1/2}$<br>(días) | Referencias                  |
|---|-------------------|-------------------------------|--|--|---------------------|------------------------------|
| Cantaxantinas de <i>Dietzia natronol imnaea</i> | GA                | SD                            | T(°C) = 4; Luz = sí                        | -  | -                   | Hojjati <i>et al.</i> , 2014 |
|   |                   |                               | T(°C) = 25; Luz = sí                       | -  | -                   |                              |
|   |                   |                               | T(°C) = 45; Luz = sí                       | -  | -                   |                              |
|   |                   |                               | T(°C) = 4; Luz = no                        | -  | -                   |                              |
|   |                   |                               | T(°C) = 25; Luz = no                       | -  | -                   |                              |
|   |                   |                               | T(°C) = 45; Luz = no                       | -  | -                   |                              |
| Paprika ( <i>Capsicum annuum</i> )              | GA (0.03 %)       | SD                            | T(°C) = 35; RH % = 10.8                    | 33.09                                    | 20.947              | Rascón <i>et al.</i> , 2011  |
|   |                   |                               | T(°C) = 35; RH % = 31.8                    | 55.73                                    | 12.438              |                              |
|   |                   |                               | T(°C) = 35; RH % = 51.5                    | 123.89                                   | 5.595               |                              |
|   |                   |                               | T(°C) = 35; RH % = 74.3                    | 31.6                                     | 21.935              |                              |
|   |                   |                               | T(°C) = 35; RH % = 10.8                    | 37.33                                    | 18.568              |                              |
|   |                   |                               | T(°C) = 35; RH % = 31.8                    | 55.41                                    | 12.509              |                              |
|   |                   |                               | T(°C) = 35; RH % = 51.5                    | 130.17                                   | 5.325               |                              |
|   |                   |                               | T(°C) = 35; RH % = 74.3                    | 31.6                                     | 21.935              |                              |

<sup>a</sup> GA, goma arábica; GMez, goma de mezquite; GX, goma xantana; GT, goma tara; MDX, maltodextrina; WPC, concentrado de proteína de suero de leche SP; <sup>b</sup> secado por atomización (*spray drying*); FD, liofilización (*freeze drying*); <sup>c</sup> T (°C), temperatura en grados centígrados; O<sub>2</sub>, oxígeno; RH %, humedad relativa.

#### 4. Aplicación de pigmentos microencapsulados en matrices alimenticias

Es importante evaluar la estabilidad de los pigmentos en matrices alimenticias, ya que aún son pocos los estudios que han reportado los efectos de la incorporación de pigmentos en alimentos (tabla IV).

Xu, Cheng, Liu y Zhu (2019) incorporaron extractos de morera (*Morus alba*) como antioxidantes y colorantes en jamón y observaron que la adición de los microencapsulados inhibía la oxidación de lípidos y proteínas durante la preparación y el almacenamiento del producto.

Los pigmentos microencapsulados también se utilizan en golosinas. La incorporación de antocianinas de la piel de berenjena (*Solanum melongena*) para la elaboración de gomitas ha reportado mejoras en el color y buena aceptabilidad sensorial cuando se agrega del 1 al 1.5 % de polvo (Sarabandi *et al.*, 2019).

Otros trabajos han evaluado los resultados de su uso con goma de mascar como matriz alimenticia, incorporando betalaínas de betabel (*Beta vulgaris*) (Chranioti *et al.*, 2015), carotenoides de azafrán (*Crocus sativus*) (Chranioti *et al.*, 2015) o de microalgas (*Nannochloropsis oculata*; *Isochrysis galbana*) (Palabiyik *et al.*, 2018). En todos los casos, se observó que la incorporación de los pigmentos microencapsulados incrementó el color e hizo más agradables los productos. De igual forma, carotenoides de zanahoria (*Daucus carota*) han sido incorporados en caramelos macizos, donde las características físicas de la matriz alimenticia minimizaron el contacto con el ambiente, manteniendo los pigmentos adicionados (Shaaruddin *et al.*, 2019).

La incorporación de pigmentos microencapsulados a productos que sufren cambios de temperatura, específicamente el proceso de cocción en la elaboración de pan, también ha sido evaluada. Tatar Turan *et al.* (2015) observaron la incorporación

de antocianinas de mora azul con GG, mientras que Papillo *et al.* (2018) examinaron la de arroz negro con GA (*Oryza sativa* L., var. Artemide). Se ha notado que, si bien existe una reducción en las antocianinas debido al calor, la microencapsulación protege los pigmentos de la degradación térmica. Sin un cambio de color aparente, los resultados son favorables, ya que a altas temperaturas los compuestos polifenoles, como las antocianinas, generan *O*-quinonas con tonalidades cafés (Sant’Anna *et al.*, 2013). Asimismo, se han evaluado los efectos del uso de carotenoides en pan y se observa que al adicionar licopeno encapsulado con almidón modificado, la encapsulación protegió a los pigmentos durante el horneado (Rocha *et al.*, 2012). Por su parte, Ursache *et al.* (2018) incorporaron carotenoides encapsulados con GA en *muffins* (panecillos); los panelistas prefirieron aquellos que contenían carotenoides debido a que el color amarillo resultaba más agradable. Los autores mencionan que, además del color, la adición de los carotenoides tuvo un efecto antimicrobiano, ya que durante el almacenamiento de los panecillos no se observó el crecimiento de hongos ni levaduras.

Otros productos en los que se ha analizado los efectos de la adición de pigmentos microencapsulados son las bebidas sin alcohol adicionadas con bixina de achiote sabor mandarina (Tupuna *et al.*, 2018) y con betalainas de tuna roja (*Opuntia stricta*) (Obón *et al.*, 2009); gelatinas con antocianinas de pulpa de jussara (*Euterpe edulis Martius*) (Bernardes *et al.*, 2019); helado con antocianinas de mora azul (Tatar Turan *et al.*, 2015); y yogur con betalainas de pitaya (*Stenocereus pruinosus*) (Vargas-Campos *et al.*, 2018) y tuna roja (Obón *et al.*, 2009). En todos los casos se reportaron mejoras tanto en el color como en las propiedades antioxidantes debido a la presencia de los pigmentos. Vemos entonces que los pigmentos microencapsulados son una fuente importante de antioxidantes que puede incorporarse a la dieta a través del consumo de alimentos comunes.

## CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Los métodos de encapsulación mediante secado por atomización y liofilización son eficaces en la protección de los pigmentos, incrementando su estabilidad y ayudando a obtener polvos de fácil incorporación a diferentes productos. Con base en los

**Tabla IV.** Incorporación de pigmentos microencapsulados a matrices alimenticias

| Fuente  | Adición a alimentos                                      | Referencias                        |
|---|--|------------------------------------|
| <i>Antocianinas</i>   |  |                                    |
| Pulpa de morera ( <i>Morus alba</i> )                                     | Antioxidante y colorante en jamón de cerdo               | Xu <i>et al.</i> , 2019            |
| Extracto de mora azul ( <i>Vaccinium corymbosum</i> )                     | Helado y pan   | Tatar Turan <i>et al.</i> , 2015   |
| Extracto de bagazo de uva   | Películas activas biodegradables                         | Stoll <i>et al.</i> , 2016         |
| Extracto de piel de berenjena ( <i>Solanum melongena</i> )                | Gomitas  | Sarabandi <i>et al.</i> , 2019     |
| Arroz negro ( <i>Oryza sativa</i> L.)                                     | Biscochos  | Papillo <i>et al.</i> , 2018       |
| Jussara ( <i>Euterpe edulis Marius</i> )                                  | Gelatinas  | Bernardes <i>et al.</i> , 2019     |
| <i>Betalainas</i>   |  |                                    |
| Betabel ( <i>Beta vulgaris</i> )  | Goma de mascar   | Chranioti <i>et al.</i> , 2015     |
| Pitaya ( <i>Stenocereus pruinosus</i> )                                   | Yogur  | Vargas-Campos <i>et al.</i> , 2018 |
| Tuna roja ( <i>Opuntia stricta</i> )                                      | Yogur y bebidas  | Obón <i>et al.</i> , 2009          |
| <i>Carotenoides</i>   |  |                                    |
| Azafrán ( <i>Crocus sativus</i> )   | Goma de mascar   | Chranioti <i>et al.</i> , 2015     |
| Zanahoria ( <i>Daucus carota</i> )  | Caramelo macizo  | Shaaruddin <i>et al.</i> , 2019    |
| Semillas de achiote ( <i>Bixa orellana</i> )                              | Bebida isotónica sabor mandarina                         | Tupuna <i>et al.</i> , 2018        |
| Sea buckthorn ( <i>Hippophae rhamnoides</i> L.)                           | <i>Muffins</i> (sustitución del 6 % del total de harina) | Ursache <i>et al.</i> , 2018       |
| Microalgas ( <i>Nannochloropsis oculata</i> ; <i>Isochrysis galbana</i> ) | Goma de mascar   | Palabiyik <i>et al.</i> , 2018     |
| Licopeno comercial  | Pastel   | Rocha <i>et al.</i> , 2012         |

estudios presentados en esta revisión, las gomas muestran una excelente protección de los pigmentos con ambos métodos de encapsulación. La goma arábica, la goma de mezquite, la goma xantana y la goma guar pueden ser utilizadas para la encapsulación de pigmentos (antocianinas, betalainas y carotenoides), pero es necesario seleccionar las condiciones óptimas de encapsulación, así como tener en cuenta la interacción entre el agente encapsulante y el compuesto activo, el método de encapsulación, y las condiciones de operación. En particular, debido a las propiedades físicas de las soluciones, vemos que la goma arábica y la de mezquite son más adecuadas para el secado por atomización, mientras que la goma xantana y la guar lo son para la liofilización.

Se debe agregar que, si bien la estabilidad de los pigmentos mejora después de la microencapsulación, factores como la temperatura, la exposición a la luz, el oxígeno, el tiempo, y los niveles de pH, son los más importantes durante el almacenamiento e incorporación. A pesar de ello, se observa que, sin importar el pigmento microencapsulado, el agente encapsulante o el método de encapsulación, la adición de los pigmentos mejora los productos tanto visual como nutricionalmente.

Finalmente, vale la pena notar que aún es necesario el estudio de la degradación sobre condiciones reales de incorporación, así como del consumo de estos productos después de la adición de los pigmentos microencapsulados con los diferentes agentes encapsulantes mencionados en la revisión. Ambos son campos de investigación importantes para futuros trabajos.

## AGRADECIMIENTOS

El autor Jiménez-González, O. agradecen a la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP) y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) —hoy Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)—, por el apoyo para la realización de sus estudios doctorales en Ciencia de Alimentos.

## REFERENCIAS

- Aguiar, J., Estevinho, B. N. y Santos, L. (2016). Microencapsulation of natural antioxidants for food application - The specific case of coffee antioxidants - A review. *Trends in Food Science & Technology*, 58, 21-39. doi: 10.1016/j.tifs.2016.10.012
- Ahmad, S., Ahmad, M., Manzoor, K., Purwar, R. y Ikram, S. (2019). A review on latest innovations in natural gums based hydrogels: preparations & applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 136, 870-890. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.06.113
- Akhavan Mahdavi, S., Jafari, S. M., Assadpour, E., & Ghorbani, M. (2016). Storage stability of encapsulated barberry's anthocyanin and its application in jelly formulation. *Journal of Food Engineering*, 181, 59-66. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2016.03.003
- Álvarez-Henao, M. V., Saavedra, N., Medina, S., Jiménez Cartagena, C., Alzate, L. M. y Londoño-Londoño, J. (2018). Microencapsulation of lutein by spray-drying: characterization and stability analyses to promote its use as a functional ingredient. *Food Chemistry*, 256, 181-187. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.02.059
- Antigo, J. L. D., Bergamasco, R. de C. y Madrona, G. S. (2017). Effect of pH on the stability of red beet extract (*Beta vulgaris* L.) microcapsules produced by spray drying or freeze drying. *Food Science and Technology*, 38(1), 72-77. doi: 10.1590/1678-457X.34316
- Bakry, A. M., Abbas, S., Ali, B., Majeed, H., Abouelwafa, M. Y., Mousa, A. y Liang, L. (2016). Microencapsulation of oils: a comprehensive review of benefits, techniques, and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(1), 143-182. doi: 10.1111/1541-4337.12179
- Başlar, M., Karasu, S., Kiliçli, M., Us, A. A. y Sağdıç, O. (2014). Degradation kinetics of bioactive compounds and antioxidant activity of pomegranate arils during the drying process. *International Journal of Food Engineering*, 10(4), 839-848. doi: 10.1515/ijfe-2014-0080
- Beristain, C. I., Azuara, E. y Vernon-Carter, E. J. (2002). Effect of water activity on the stability to oxidation of spray-dried encapsulated orange peel oil using mesquite gum (*Prosopis juliflora*) as wall material. *Journal of Food Science*, 67(1), 206-211. doi: 10.1111/j.1365-2621.2002.tb11385.x
- Beristain, C. I., García, H. S. y Vernon-Carter, E. J. (2001). Spray-dried encapsula-

- tion of cardamom (*Elettaria Cardamomum*) essential oil with mesquite (*Prosopis Juliflora*) gum. *LWT - Food Science and Technology*, 34(6), 398-401. doi: 10.1006/fstl.2001.0779
- Beristain, C. I. y Vernon-Carter, E. J. (1994). Utilization of mesquite (*Prosopis juliflora*) gum as emulsion stabilizing agent for spray drying encapsulated orange peel oil. *Drying Technology*, 12(7), 1727-1733. doi: 10.1080/07373939408962195
- Bernardes, A. L., Moreira, J. A., Tostes, M. das G. V., Costa, N. M. B., Silva, P. I. y Costa, A. G. V. (2019). In vitro bioaccessibility of microencapsulated phenolic compounds of jussara (*Euterpe edulis Martius*) fruit and application in gelatine model-system. *LWT*, 102, 173-180. doi: 10.1016/j.lwt.2018.12.009
- Bhandari, B. R. y Howes, T. (1999). Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods. *Journal of Food Engineering*, 40(1-2), 71-79. doi: 10.1016/S0260-8774(99)00039-4
- Bhandari, B. R., Senoussi, A., Dumoulin, E. D. y Lebert, A. (1993). Spray drying of concentrated fruit juices. *Drying Technology*, 11(5), 1081-1092. doi: 10.1080/07373939308916884
- Bonilla-Ahumada, F. de J., Khandual, S. y Lugo-Cervantes, E. del C. (2018). Microencapsulation of algal biomass (*Tetraselmis chuii*) by spray-drying using different encapsulation materials for better preservation of beta-carotene and antioxidant compounds. *Algal Research*, 36, 229-238. doi: 10.1016/j.algal.2018.10.006
- Bosquez-Molina, E., Guerrero-Legarreta, I. y Vernon-Carter, E. J. (2003). Moisture barrier properties and morphology of mesquite gum-candelilla wax based edible emulsion coatings. *Food Research International*, 36(9-10), 885-893. doi: 10.1016/S0963-9969(03)00097-8
- Bustos-Garza, C., Yáñez-Fernández, J. y Barragán-Huerta, B. E. (2013). Thermal and pH stability of spray-dried encapsulated astaxanthin oleoresin from *Haematococcus pluvialis* using several encapsulation wall materials. *Food Research International*, 54(1), 641-649. doi: 10.1016/j.foodres.2013.07.061
- Cai, X., Du, X., Cui, D., Wang, X., Yang, Z. y Zhu, G. (2019). Improvement of stability of blueberry anthocyanins by carboxymethyl starch/xanthan gum combinations microencapsulation. *Food Hydrocolloids*, 91, 238-245. doi: 10.1016/j.foodhyd.2019.01.034
- Çam, M., İçyer, N. C. y Erdoğan, F. (2014). Pomegranate peel phenolics: microencapsulation, storage stability and potential ingredient for functional food development. *LWT - Food Science and Technology*, 55(1), 117-123. doi: 10.1016/j.lwt.2013.09.011
- Cano-Barrita, P. F. de J. y León-Martínez, F. M. (2016). Biopolymers with viscosity-enhancing properties for concrete. En F. Pacheco-Torgal, et al. (Eds.), *Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials* (pp. 221-252). doi: 10.1016/B978-0-08-100214-8.00011-7
- Carrillo-Navas, H., González-Rodea, D. A., Cruz-Olivares, J., Barrera-Pichardo, J. F., Román-Guerrero, A. y Pérez-Alonso, C. (2011). Storage stability and physicochemical properties of passion fruit juice microcapsules by spray-drying. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(3), 421-430.
- Castro-Enríquez, D. D., Montaña-Leyva, B., Del Toro-Sánchez, C. L., Juaréz-Onofre, J. E., Carvajal-Millan, E., Burrueal-Ibarra, S. E., Tapia-Hernández, J. A., Barreras-Urbina, C. G. y Rodríguez-Félix, F. (2019). Stabilization of betalains by encapsulation—a review. *Journal of Food Science and Technology*, 57(5), 1587-1600. doi: 10.1007/s13197-019-04120-x
- Chawla, H., Parle, M., Sharma, K. y Yadav, M. (2016). Beetroot: a health promoting functional food. *Inventi Rapid: Nutraceuticals*, 1(1), 8-12.
- Chranioti, C., Nikoloudaki, A. y Tzia, C. (2015). Saffron and beetroot extracts encapsulated in maltodextrin, gum Arabic, modified starch and chitosan: incorporation in a chewing gum system. *Carbohydrate Polymers*, 127, 252-263. doi: 10.1016/j.carbpol.2015.03.049
- Clark, J. P. (2009). Freeze Drying. En J. P. Clark (Ed.), *Case Studies in Food Engineering* (pp. 67-73). doi: 10.1007/978-1-4419-0420-1\_8
- Clydesdale, F. M. (1993). Color as a factor in food choice. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 33(1), 83-101. doi: 10.1080/10408399309527614
- Corrêa, R. C. G., Garcia, J. A. A., Correa, V. G., Vieira, T. F., Bracht, A. y Peralta, R. M. (2019). Pigments and vitamins from plants as functional ingredients: current trends and perspectives. *Advances in Food and Nutrition Research*, 90, 259-303. doi: 10.1016/bs.afnr.2019.02.003
- De Marco, R., Vieira, A. M. S., Ugri, M. C. A., Monteiro, A. y Bergamasco, R. de C. (2013). Microencapsulation of annatto seed extract: stability and application. *Chemical Engineering Transactions*, 32, 1777-1782. doi: 10.3303/CET1332297
- Dolinsky, A. A. (2001). High-temperature spray drying. *Drying Technology*, 19(5), 785-806. doi: 10.1081/DRT-100103770
- Ephrem, E., Najjar, A., Charcosset, C. y Greige-Gerges, H. (2018). Encapsulation of natural active compounds, enzymes, and probiotics for fruit juice fortification,

- preservation, and processing: an overview. *Journal of Functional Foods*, 48, 65-84. doi: 10.1016/j.jff.2018.06.021
- Fang, Z. y Bhandari, B. (2012). Spray drying, freeze drying and related processes for food ingredient and nutraceutical encapsulation. En N. Garti y D. J. McClements (Eds.), *Encapsulation Technologies and Delivery Systems for Food Ingredients and Nutraceuticals* (pp. 73-109). doi: 10.1533/9780857095909.2.73
- Francis, F. J. (1995). Quality as influenced by color. *Food Quality and Preference*, 6(3), 149-155. doi: 10.1016/0950-3293(94)00026-R
- Fu, D., Deng, S., McClements, D. J., Zhou, L., Zou, L., Yi, J., Lui, C. y Liu, W. (2019). Encapsulation of  $\beta$ -carotene in wheat gluten nanoparticle-xanthan gum-stabilized Pickering emulsions: enhancement of carotenoid stability and bioaccessibility. *Food Hydrocolloids*, 89, 80-89. doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.10.032
- Garber, L. L., Hyatt, E. M. y Nafees, L. (2016). The effects of analogous food color on perceived flavor: a factorial investigation. *Journal of Food Products Marketing*, 22(4), 486-500. doi: 10.1080/10454446.2015.1072866
- García-Márquez, E., Román-Guerrero, A., Cruz-Sosa, F., Lobato-Calleros, C., Álvarez-Ramírez, J., Vernon-Carter, E. J. y Espinosa-Andrews, H. (2015). Effect of layer (calcium phosphate-chitosan)-by-layer (mesquite gum) matrix on carotenoids-in-water-emulsion properties. *Food Hydrocolloids*, 43, 451-458. doi: 10.1016/j.foodhyd.2014.07.005
- George, A., Shah, P. A. y Shrivastav, P. S. (2019). Guar gum: versatile natural polymer for drug delivery applications. *European Polymer Journal*, 112, 722-735. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2018.10.042
- Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A. y Saurel, R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: an overview. *Food Research International*, 40(9), 1107-1121. doi: 10.1016/j.foodres.2007.07.004
- Gomez-Estaca, J., Comunian, T. A., Montero, P., Ferro-Furtado, R. y Favaro-Trindade, C. S. (2016). Encapsulation of an astaxanthin-containing lipid extract from shrimp waste by complex coacervation using a novel gelatin-cashew gum complex. *Food Hydrocolloids*, 61, 155-162. Doi: 10.1016/j.foodhyd.2016.05.005
- Gupta, V. K., Sood, S., Agarwal, S., Saini, A. K. y Pathania, D. (2018). Antioxidant activity and controlled drug delivery potential of tragacanth gum-cl- poly (lactic acid-co-itaconic acid) hydrogel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107(B), 2534-2543. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.10.138
- Haas, K., Obernberger, J., Zehetner, E., Kiesslich, A., Volkert, M., y Jaeger, H. (2019). Impact of powder particle structure on the oxidation stability and color of encapsulated crystalline and emulsified carotenoids in carrot concentrate powders. *Journal of Food Engineering*, 263, 398-408. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2019.07.025
- Habibi, H. y Khosravi-Darani, K. (2017). Effective variables on production and structure of xanthan gum and its food applications: a review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 10, 130-140. doi: 10.1016/j.bcab.2017.02.013
- Hamdani, A. M., Wani, I. A. y Bhat, N. A. (2019). Sources, structure, properties and health benefits of plant gums: a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 135, 46-61. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.05.103
- Hasan, A. M. A. y Abdel-Raouf, M. E. (2018). Applications of guar gum and its derivatives in petroleum industry: a review. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4), 1043-1050. doi: 10.1016/j.ejpe.2018.03.005
- He, J. y Giusti, M. M. (2010). Anthocyanins: natural colorants with health-promoting properties. *Annual Review of Food Science and Technology*, 1(1), 163-187. doi: 10.1146/annurev.food.080708.100754
- Hojjati, M., Razavi, S. H., Rezaei, K. y Gilani, K. (2014). Stabilization of canthaxanthin produced by *Dietzia natronolimnaea* HS-1 with spray drying microencapsulation. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 2134-2140. doi: 10.1007/s13197-012-0713-0
- Jain, A., Thakur, D., Ghoshal, G., Katare, O. P. y Shivhare, U. S. (2016). Characterization of microcapsulated  $\beta$ -carotene formed by complex coacervation using casein and gum tragacanth. *International Journal of Biological Macromolecules*, 87, 101-113. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2016.01.117
- Janiszewska, E. (2014). Microencapsulated beetroot juice as a potential source of betalain. *Powder Technology*, 264, 190-196. doi: 10.1016/j.powtec.2014.05.032
- Jiménez-Aguilar, D. M., Ortega-Regules, A. E., Lozada-Ramírez, J. D., Pérez-Pérez, M. C. I., Vernon-Carter, E. J. y Welti-Chanes, J. (2011). Color and chemical stability of spray-dried blueberry extract using mesquite gum as wall material. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(6), 889-894. doi: 10.1016/j.jfca.2011.04.012
- Jimenez-Gonzalez, O., Ruiz-Espinosa, H., Luna-Guevara, J. J., Ochoa-Velasco, C. E., Luna Vital, D. y Luna-Guevara, M. L. (2018). A potential natural coloring agent with antioxidant properties: microencapsulates of *Renalmia alpina* (Rottb.) Maas fruit pericarp. *NFS Journal*, 13, 1-9. doi: 10.1016/j.nfs.2018.08.001
- Kuck, L. S. y Noreña, C. P. Z. (2016). Microencapsulation of grape (*Vitis labrusca* var. Bordo) skin phenolic extract using gum Arabic, polydextrose, and partially hydrolyzed guar gum as encapsulating agents. *Food Chemistry*, 194, 569-576. doi: 10.1016/j.foodchem.2015.08.066
- Kumar, A., Rao, K. M. y Han, S. S. (2018). Application of xanthan gum as polysaccharide in tissue engineering: a review. *Carbohydrate Polymers*, 180, 128-144. doi: 10.1016/j.carbpol.2017.10.009
- Kshirsagar, A. C., Yenge, V., Sarkar, A., Zamre, M. y Singhal, R. S. (2010). Evaluation of microencapsulated turmeric oleoresin for pre-extrusion coloring using response surface methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*, 34(2), 302-315. doi: 10.1111/j.1745-4549.2009.00371.x
- Labuschagne, P. (2018). Impact of wall material physicochemical characteristics on the stability of encapsulated phytochemicals: a review. *Food Research International*, 107, 227-247. doi: 10.1016/j.foodres.2018.02.026
- Lehto, S., Buchweitz, M., Klimm, A., Straßburger, R., Bechtold, C. y Ulberth, F. (2017). Comparison of food colour regulations in the EU and the US: A review of cur-

- urrent provisions. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 34(3), 335-355. doi: 10.1080/19440049.2016.1274431
- Ling, B., Tang, J., Kong, F., Mitcham, E. J. y Wang, S. (2015). Kinetics of food quality changes during thermal processing: a review. *Food and Bioprocess Technology*, 8(2), 343-358. doi: 10.1007/s11947-014-1398-3
- López-Franco, Y., Higuera-Ciajara, I., Lizardi-Mendoza, J., Goycoolea, F. M. y Wang, W. (2009). Other exudates: Tragacanth, karaya, mesquite gum and larchwood arabinogalactan. En G. O. Phillips y P. A. Williams (Eds.) *Handbook of Hydrocolloids* (pp. 495-534). doi: 10.1533/9781845695873.495
- Mahdavi, S. A., Jafari, S. M., Ghorbani, M. y Assadpoor, E. (2014). Spray-drying microencapsulation of anthocyanins by natural biopolymers: a review. *Drying Technology*, 32(5), 509-518. doi: 10.1080/07373937.2013.839562
- Mahdi Jafari, S., He, Y. y Bhandari, B. (2006). Nano-emulsion production by sonication and microfluidization—a comparison. *International Journal of Food Properties*, 9(3), 475-485. doi: 10.1080/10942910600596464
- Martins, N., Roriz, C. L., Morales, P., Barros, L. y Ferreira, I. C. F. R. (2016). Food colorants: challenges, opportunities and current desires of agro-industries to ensure consumer expectations and regulatory practices. *Trends in Food Science & Technology*, 52, 1-15. Doi: 10.1016/j.tifs.2016.03.009
- Mishra, M. (Ed.). (2015). *Handbook of Encapsulation and Controlled Release*. CRC Press. doi: 10.1201/b19038
- Morais, A. R. do V., Alencar, É. do N., Xavier Júnior, F. H., De Oliveira, C. M., Marcelino, H. R., Barratt, G., Fessi, H., Do Egito, E. S. y Elaissari, A. (2016). Freeze-drying of emulsified systems: a review. *International Journal of Pharmaceutics*, 503(1-2), 102-114. doi: 10.1016/j.ijpharm.2016.02.047
- Moser, P., Telis, V. R. N., De Andrade Neves, N., García-Romero, E., Gómez-Alonso, S. y Hermosín-Gutiérrez, I. (2017). Storage stability of phenolic compounds in powdered BRS Violeta grape juice microencapsulated with protein and maltodextrin blends. *Food Chemistry*, 214, 308-318. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.07.081
- Naik, R., Arunsandeep, G., & Chandramohan, V. (2017). Numerical simulation for freeze drying of skimmed milk with moving sublimation front using tri-diagonal matrix algorithm. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 10(3), 813-818. doi: 10.18869/acadpub.jafm.73.240.27054
- Ngamwonglumlert, L., Devahastin, S. y Chiewchan, N. (2017). Natural colorants: pigment stability and extraction yield enhancement via utilization of appropriate pretreatment and extraction methods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(15), 3243-3259. doi: 10.1080/10408398.2015.1109498
- Nie, S.-P., Wang, C., Cui, S. W., Wang, Q., Xie, M.-Y. y Phillips, G. O. (2013). A further amendment to the classical core structure of gum arabic (*Acacia senegal*). *Food Hydrocolloids*, 31(1), 42-48. doi: 10.1016/j.foodhyd.2012.09.014
- Niu, B., Shao, P., Luo, Y. y Sun, P. (2020). Recent advances of electrosprayed particles as encapsulation systems of bioactives for food application. *Food Hydrocolloids*, 99, 105376. doi: 10.1016/j.foodhyd.2019.105376
- Obón, J. M., Castellar, M. R., Alacid, M. y Fernández-López, J. A. (2009). Production of a red-purple food colorant from *Opuntia stricta* fruits by spray drying and its application in food model systems. *Journal of Food Engineering*, 90(4), 471-479. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2008.07.013
- Ochoa-Velasco, C. E., Salazar-González, C., Cid-Ortega, S. y Guerrero-Beltrán, J. A. (2017). Antioxidant characteristics of extracts of *Hibiscus sabdariffa* calyces encapsulated with mesquite gum. *Journal of Food Science and Technology*, 54(7), 1747-1756. doi: 10.1007/s13197-017-2564-1
- Ozkan, G., Franco, P., De Marco, I., Xiao, J. y Capanoglu, E. (2019). A review of microencapsulation methods for food antioxidants: Principles, advantages, drawbacks and applications. *Food Chemistry*, 272, 494-506. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.07.205
- Paakki, M., Sandell, M. y Hopia, A. (2019). Visual attractiveness depends on colorfulness and color contrasts in mixed salads. *Food Quality and Preference*, 76, 81-90. doi: 10.1016/j.foodqual.2019.04.004
- Palabiyik, I., Durmaz, Y., Öner, B., Toker, O. S., Coksari, G., Konar, N. y Tamtürk, F. (2018). Using spray-dried microalgae as a natural coloring agent in chewing gum: Effects on color, sensory, and textural properties. *Journal of Applied Phycology*, 30(2), 1031-1039. doi: 10.1007/s10811-017-1324-y
- Palaniraj, A. y Jayaraman, V. (2011). Production, recovery and applications of xanthan gum by *Xanthomonas campestris*. *Journal of Food Engineering*, 106(1), 1-12. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.03.035
- Papillo, V. A., Locatelli, M., Travaglia, F., Bordiga, M., Garino, C., Arlorio, M. y Coisson, J. D. (2018). Spray-dried polyphenolic extract from Italian black rice (*Oryza sativa* L., var. *Artemide*) as new ingredient for bakery products. *Food Chemistry*, 269, 603-609. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.07.059
- Pavón-García, L. M. A., Pérez-Alonso, C., Orozco-Villafuerte, J., Pimentel-González, D. J., Rodríguez-Huezo, M. E. y Vernon-Carter, E. J. (2011). Storage stability of the natural colourant from *Justicia spicigera* microencapsulated in protective colloids blends by spray-drying: Colour storage stability. *International Journal of Food Science & Technology*, 46(7), 1428-1437. doi: 10.1111/j.1365-2621.2011.02634.x
- Pieczkolan, E. y Kurek, M. A. (2019). Use of guar gum, gum arabic, pectin, beta-glucan and inulin for microencapsulation of anthocyanins from chokeberry. *International Journal of Biological Macromolecules*, 129, 665-671. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.02.073
- Piqueras-Fiszman, B. y Spence, C. (2014). Colour, pleasantness, and consumption behaviour within a meal. *Appetite*, 75, 165-172. doi: 10.1016/j.appet.2014.01.004
- Pitalua, E., Jimenez, M., Vernon-Carter, E. J. y Beristain, C. I. (2010). Antioxidative activity of microcapsules with beetroot juice using gum Arabic as wall material. *Food and Bioprocess Processing*, 88(2-3), 253-258. doi: 10.1016/j.fbp.2010.01.002

- Porcherot, C., Delplanque, S., Gaudreau, N. y Cayeux, I. (2013). Seeing, smelling, feeling! Is there an influence of color on subjective affective responses to perfumed fabric softeners? *Food Quality and Preference*, 27(2), 161-169. doi: 10.1016/j.foodqual.2012.06.011
- Quan, J., Kim, S.-M., Pan, C.-H. y Chung, D. (2013). Characterization of fucoxanthin-loaded microspheres composed of cetyl palmitate-based solid lipid core and fish gelatin-gum arabic coacervate shell. *Food Research International*, 50(1), 31-37. doi: 10.1016/j.foodres.2012.09.040
- Qv, X.-Y., Zeng, Z.-P. y Jiang, J.-G. (2011). Preparation of lutein microencapsulation by complex coacervation method and its physicochemical properties and stability. *Food Hydrocolloids*, 25(6), 1596-1603. doi: 10.1016/j.foodhyd.2011.01.006
- Ramakrishnan, Y., Adzahan, N. M., Yusof, Y. A. y Muhammad, K. (2018). Effect of wall materials on the spray drying efficiency, powder properties and stability of bioactive compounds in tamarillo juice microencapsulation. *Powder Technology*, 328, 406-414. doi: 10.1016/j.powtec.2017.12.018
- Rascón, M. P., Beristain, C. I., García, H. S. y Salgado, M. A. (2011). Carotenoid retention and storage stability of spray-dried encapsulated paprika oleoresin using gum Arabic and Soy protein isolate as wall materials. *LWT - Food Science and Technology*, 44(2), 549-557. doi: 10.1016/j.lwt.2010.08.021
- Ravichandran, K., Palaniraj, R., Saw, N. M. M. T., Gabr, A. M. M., Ahmed, A. R., Knorr, D. y Smetanska, I. (2014). Effects of different encapsulation agents and drying process on stability of betalains extract. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 2216-2221. doi: 10.1007/s13197-012-0728-6
- Rezende, Y. R. S., Nogueira, J. P. y Narain, N. (2018). Microencapsulation of extracts of bioactive compounds obtained from acerola (*Malpighia emarginata* DC) pulp and residue by spray and freeze drying: hchemical, morphological and chemometric characterization. *Food Chemistry*, 254, 281-291. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.02.026
- Rezvankhah, A., Emam-Djomeh, Z. y Askari, G. (2020). Encapsulation and delivery of bioactive compounds using spray and freeze-drying techniques: a review. *Drying Technology*, 38(1-2), 235-258. doi: 10.1080/07373937.2019.1653906
- Rocha, G. A., Fávoro-Trindade, C. S. y Grosso, C. R. F. (2012). Microencapsulation of lycopene by spray drying: characterization, stability and application of microcapsules. *Food and Bioprocess Processing*, 90(1), 37-42. doi: 10.1016/j.fbp.2011.01.001
- Rodríguez-Amaya, D. B. (2016). Natural food pigments and colorants. *Current Opinion in Food Science*, 7, 20-26. doi: 10.1016/j.cofs.2015.08.004
- Rodríguez-Amaya, D. B. (2019). Update on natural food pigments - A mini-review on carotenoids, anthocyanins, and betalains. *Food Research International*, 124, 200-205. doi: 10.1016/j.foodres.2018.05.028
- Rodríguez-Rodríguez, R., Espinosa-Andrews, H., Morales-Hernández, N., Lobato-Calleros, C. y Vernon-Carter, E. J. (2018). Mesquite gum/chitosan insoluble complexes: relationship between the water state and viscoelastic properties. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 40(9), 1345-1352. doi: 10.1080/01932691.2018.1513848
- Romero-González, J., Shun Ah-Hen, K., Lemus-Mondaca, R. y Muñoz-Fariña, O. (2020). Total phenolics, anthocyanin profile and antioxidant activity of maqui, *Aristotelia chilensis* (Mol.) Stuntz, berries extract in freeze-dried polysaccharides microcapsules. *Food Chemistry*, 313, 126115. doi: 10.1016/j.foodchem.2019.126115
- Rutz, J. K., Zambiasi, R. C., Borges, C. D., Krumreich, F. D., Da Luz, S. R., Hartwig, N. y Da Rosa, C. G. (2013). Microencapsulation of purple Brazilian cherry juice in xanthan, tara gums and xanthan-tara hydrogel matrixes. *Carbohydrate Polymers*, 98(2), 1256-1265. doi: 10.1016/j.carbpol.2013.07.058
- Salarbashi, D. y Tafaghodi, M. (2018). An update on physicochemical and functional properties of newly seed gums. *International Journal of Biological Macromolecules*, 119, 1240-1247. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.06.161
- Sant'Anna, V., Gurak, P. D., Ferreira Marczak, L. D. y Tessaro, I. C. (2013). Tracking bioactive compounds with colour changes in foods - A review. *Dyes and Pigments*, 98(3), 601-608. doi: 10.1016/j.dyepig.2013.04.011
- Santana, A. A., Cano-Higueta, D. M., De Oliveira, R. A. y Telis, V. R. N. (2016). Influence of different combinations of wall materials on the microencapsulation of jussara pulp (*Euterpe edulis*) by spray drying. *Food Chemistry*, 212, 1-9. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.05.148
- Santos, D., Maurício, A. C., Sencadas, V., Santos, J. D., Fernandes, M. H. y Gomes, P. S. (2018). Spray drying: an overview. En R. Pignatello y T. Musumeci (Eds.), *Biomaterials - Physics and Chemistry - New Edition*. InTech. doi: 10.5772/intechopen.72247
- Sarabandi, K., Jafari, S. M., Mahoonak, A. S. y Mohammadi, A. (2019). Application of gum Arabic and maltodextrin for encapsulation of eggplant peel extract as a natural antioxidant and color source. *International Journal of Biological Macromolecules*, 140, 59-68. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.08.133
- Scotter, M. J. (2011). Emerging and persistent issues with artificial food colours: natural colour additives as alternatives to synthetic colours in food and drink. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 3(1), 28-39. doi: 10.1111/j.1757-837X.2010.00087.x
- Shaaruddin, S., Mahmood, Z., Ismail, H., Mohd Ghazali, H., Hamzah, Mohd. Y. y Muhammad, K. (2019). Stability of  $\beta$ -carotene in carrot powder and sugar confection as affected by resistant maltodextrin and octenyl succinate anhydride (OSA) starches. *Journal of Food Science and Technology*, 56(7), 3461-3470. doi: 10.1007/s13197-019-03832-4
- Shaddel, R., Hesari, J., Azadmard-Damirchi, S., Hamishehkar, H., Fathi-Achachlouei, B. y Huang, Q. (2018). Use of gelatin and gum Arabic for encapsulation of black raspberry anthocyanins by complex coacervation. *International*

- Journal of Biological Macromolecules*, 107, 1800-1810. doi: 10.1016/j.jbiomac.2017.10.044
- Sharma, G., Sharma, S., Kumar, A., Al-Muhtaseb, A. H., Naushad, Mu., Ghfar, A. A., Mola, G. T. y Stadler, F. J. (2018). Guar gum and its composites as potential materials for diverse applications: a review. *Carbohydrate Polymers*, 199, 534-545. doi: 10.1016/j.carbpol.2018.07.053
- Spence, C. (2015). Visual contributions to taste and flavour perception. En M. J. Scotter, *Colour Additives for Foods and Beverages* (pp. 189-210). doi: 10.1016/B978-1-78242-011-8.00007-6
- Spence, C., Levitan, C. A., Shankar, M. U. y Zampini, M. (2010). Does food color influence taste and flavor perception in humans? *Chemosensory Perception*, 3(1), 68-84. doi: 10.1007/s12078-010-9067-2
- Steiner, B. M., McClements, D. J. y Davidov-Pardo, G. (2018). Encapsulation systems for lutein: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 82, 71-81. doi: 10.1016/j.tifs.2018.10.003
- Stoll, L., Costa, T. M. H., Jablonski, A., Flôres, S. H. y De Oliveira Rios, A. (2016). Microencapsulation of Anthocyanins with Different Wall Materials and Its Application in Active Biodegradable Films. *Food and Bioprocess Technology*, 9(1), 172-181. doi: 10.1007/s11947-015-1610-0
- Sukkwai, S., Kijroongrojana, K., Chonpracha, P., Pujols, K. D., Alonso-Marengo, J. R., Ardoin, R. y Prinyawiwatkul, W. (2018). Effects of colorant concentration and 'natural colour' or 'sodium content' claim on saltiness perception, consumer liking and emotion, and purchase intent of dipping sauces. *International Journal of Food Science & Technology*, 53(5), 1246-1254. doi: 10.1111/ijfs.13704
- Taheri, A. y Jafari, S. M. (2019). Gum-based nanocarriers for the protection and delivery of food bioactive compounds. *Advances in Colloid and Interface Science*, 269, 277-295. doi: 10.1016/j.cis.2019.04.009
- Tatar Turan, F., Cengiz, A. y Kahyaoglu, T. (2015). Evaluation of ultrasonic nozzle with spray-drying as a novel method for the microencapsulation of blueberry's bioactive compounds. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 32, 136-145. doi: 10.1016/j.ifset.2015.09.011
- Thakur, D., Jain, A., Ghoshal, G., Shivhare, U. S. y Katara, O. P. (2017). Microencapsulation of  $\beta$ -carotene based on casein/guar gum blend using zeta potential-yield stress phenomenon: an approach to enhance photo-stability and retention of functionality. *AAPS PharmSciTech*, 18(5), 1447-1459. doi: 10.1208/s12249-017-0806-1
- Tupuna, D. S., Paese, K., Guterres, S. S., Jablonski, A., Flôres, S. H. y De Oliveira Rios, A. (2018). Encapsulation efficiency and thermal stability of norbixin microencapsulated by spray-drying using different combinations of wall materials. *Industrial Crops and Products*, 111, 846-855. doi: 10.1016/j.indcrop.2017.12.001
- Ursache, F. M., Andronoiu, D. G., Ghinea, I. O., Barbu, V., Ioniță, E., Cotârlet, M., Dumitrașcu, L., Botez E., Râpeanu, G. y Stănciuc, N. (2018). Valorizations of carotenoids from sea buckthorn extract by microencapsulation and formulation of value-added food products. *Journal of Food Engineering*, 219, 16-24. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2017.09.015
- Vargas-Campos, L., Valle-Guadarrama, S., Martínez-Bustos, F., Salinas-Moreno, Y., Lobato-Calleros, C. y Calvo-López, A. D. (2018). Encapsulation and pigmentation potential of betalains of pitaya (*Stenocereus pruinosus*) fruit. *Journal of Food Science and Technology*, 55(7), 2436-2445. doi: 10.1007/s13197-018-3161-7
- Venil, C. K., Khasim, A. R., Aruldass, C. A. y Ahmad, W. A. (2016). Microencapsulation of flexirubin-type pigment by spray drying: Characterization and antioxidant activity. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 113, 350-356. doi: 10.1016/j.ibiod.2016.01.014
- Verma, A. y Singh, S. V. (2015). Spray drying of fruit and vegetable juices - a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(5), 701-719. doi: 10.1080/10408398.2012.672939
- Vernon-Carter, E. J., Beristain, C. I. y Pedroza-Islas, R. (2000). Mesquite gum (*Prosopis gum*). En G. Doxastakis y V. Kiosseoglou (Eds.), *Developments in Food Science Vol. 41*, (pp. 217-238). doi: 10.1016/S0167-4501(00)80011-4
- Villacrez, J. L., Carriazo, J. G. y Osorio, C. (2014). Microencapsulation of Andes berry (*Rubus glaucus* Benth.) Aqueous extract by spray drying. *Food and Bioprocess Technology*, 7(5), 1445-1456. doi: 10.1007/s11947-013-1172-y
- Wadhwa, D. y Capaldi-Phillips, E. D. (2014). A review of visual cues associated with food on food acceptance and consumption. *Eating Behaviors*, 15(1), 132-143. doi: 10.1016/j.eatbeh.2013.11.003
- Xu, L., Cheng, J.-R., Liu, X.-M. y Zhu, M.-J. (2019). Effect of microencapsulated process on stability of mulberry polyphenol and oxidation property of dried minced pork slices during heat processing and storage. *LWT*, 100, 62-68. doi: 10.1016/j.lwt.2018.10.025
- Ye, Q., Georges, N. y Selomulya, C. (2018). Microencapsulation of active ingredients in functional foods: From research stage to commercial food products. *Trends in Food Science & Technology*, 78, 167-179. doi: 10.1016/j.tifs.2018.05.025
- Yu, Y. y Lv, Y. (2019). Degradation kinetic of anthocyanins from rose (*Rosa rugosa*) as prepared by microencapsulation in freeze-drying and spray-drying. *International Journal of Food Properties*, 22(1), 2009-2021. doi: 10.1080/10942912.2019.1701011
- Zhang, J., Zhang, C., Chen, X. y Quek, S. Y. (2020). Effect of spray drying on phenolic compounds of cranberry juice and their stability during storage. *Journal of Food Engineering*, 269, 109744. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2019.109744
- Zhao, C., Zhao, Q., Zhang, Y. y Zhou, M. (2015). The effect of gum Arabic on the dispersion of cement pastes. En F. Dong (Ed.), *Proceedings of the 11th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM)* (pp. 483-494). Springer. doi: 10.1007/978-3-319-13948-7\_47