

# Extracto polifenólico de hojas de mango (*Mangifera indica* L.): Microencapsulación, caracterización fisicoquímica y actividad antifúngica *in vivo*

Polyphenolic extract of mango leaves (*Mangifera indica* L.):  
Microencapsulation, physicochemical characterization and *in vivo* antifungal activity

Jesús Emmanuel Domínguez-Ruvalcaba<sup>1</sup> , Montserrat Calderón-Santoyo<sup>1</sup> , Katia Nayely González-Gutiérrez<sup>1</sup>   
y Juan Arturo Ragazzo-Sánchez<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Laboratorio Integral de Investigación en Alimentos, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tepic, Av. Tecnológico 2595, Tepic, Nayarit, C.P. 63175, México.

## RESUMEN

El objetivo de este estudio fue proteger un extracto de hojas de mango rico en polifenoles mediante la microencapsulación por secado por aspersión para conservar su actividad antifúngica *in vivo*. Se preparó una disolución polimérica (DP) de goma arábica y alginato de sodio; adicionada con extracto de hoja de mango. Se evaluó la temperatura de transición vítrea de la DP y se procesó en un secador por aspersión. A las cápsulas se le evaluaron parámetros fisicoquímicos, fotoestabilidad, termoestabilidad, FTIR y actividad antifúngica *in vivo* frente a *Penicillium digitatum* en naranjas y *Botrytis cinerea* en arándanos. Los parámetros fisicoquímicos de los encapsulados fueron adecuados para estabilizar un extracto orgánico obtenido mediante secado por aspersión. El análisis FTIR evidenció la presencia del extracto en las cápsulas y la ausencia de interacciones fuertes del extracto con los biopolímeros. El extracto microencapsulado mostró alta estabilidad a la temperatura y a la radiación UV. Las cápsulas demostraron buena actividad antifúngica reduciendo la severidad de *P. digitatum* en un 70 % y la incidencia de *B. cinerea* en un 100 %. Las cápsulas presentaron características deseables que les permite proteger los polifenoles, adicionalmente, al ser altamente solubles liberan los compuestos sobre el epicarpio de los frutos, lo que representa una alternativa natural para la conservación de frutos.

**Palabras clave:** Microencapsulados, polifenoles, fotoestabilidad, termoestabilidad, fitopatógeno.

## ABSTRACT

This study aimed to protect a polyphenol-rich mango leaf extract by spray-drying microencapsulation to preserve its *in vivo* antifungal activity. A polymeric solution (PS) of gum arabic and sodium alginate was prepared; added with mango leaf extract. The glass transition temperature of the PS was evaluated and it was processed in a spray dryer. The capsules were evaluated for physicochemical parameters, photostability, thermostability, FTIR, and *in vivo* antifungal activity against *Penicillium digitatum* in oranges and *Botrytis cinerea* in blueberries. The physicochemical parameters of the encapsulates were adequate to stabilize an organic extract obtained by spraydrying. The FTIR analysis showed

the presence of the extract in the capsules and the absence of strong interactions of the extract with the biopolymers. The microencapsulated extract showed high stability to temperature and UV radiation. The capsules demonstrated good antifungal activity, reducing the severity of *P. digitatum* by 70 % and the incidence of *B. cinerea* by 100 %. The capsules presented desirable characteristics that allow them to protect the polyphenols. Additionally, being highly soluble, they release the compounds on the fruit epicarp, which represents a natural alternative for the conservation of fruits.

**Keywords:** Microencapsulates, polyphenols, photostability, thermostability, phytopathogen.

## INTRODUCCIÓN

Los compuestos fenólicos, son metabolitos secundarios presentes en las plantas, frutas, hortalizas, raíces y cereales (Klepacka *et al.*, 2011). Los compuestos fenólicos pertenecen a los compuestos de alto valor biológico (CAVB) que incluyen enzimas, microorganismos y metabolitos secundarios con actividad biológica benéfica para los seres vivos (Ramos-Hernández *et al.*, 2018). Se ha reportado que las hojas de mango son una fuente importante de compuestos fenólicos tales como benzofenonas, flavonoides, terpenoides y xantonas (Guamán-Balcázar *et al.*, 2017; Kumar *et al.*, 2021). Además, se han atribuido a estos compuestos diversas actividades biológicas, tales como, antioxidante, antimicrobiana y antifúngica (Albuquerque *et al.*, 2021). Sin embargo, estas propiedades pueden perderse debido a factores medioambientales, como exposición a la luz, la humedad y oxígeno (Ballesteros *et al.*, 2017). Por lo que se buscan alternativas de protección, en este sentido, la encapsulación provee una barrera física entre el medio circundante y los compuestos encapsulados brindándoles estabilidad (Ribeiro *et al.*, 2019). Una de las técnicas de encapsulación más utilizadas en la industria es el secado por aspersión debido a que es un proceso continuo, económico y de fácil escalabilidad (Yazdi *et al.*, 2021).

El secado por aspersión requiere materiales de pared para encapsular el compuesto de interés y obtener un producto en polvo (Ziaee *et al.*, 2019). Por lo que debe haber compatibilidad del material de pared con el compuesto de interés, para asegurar una encapsulación eficiente (Nedović

\*Author for correspondence: Juan Arturo Ragazzo-Sanchez  
e-mail: jragsazo@tepic.tecnm.mx

*et al.*, 2013). Los materiales de pared deben ser económicos, no reaccionan con el núcleo y se identifican como GRAS, entre los más utilizados debido a su alta solubilidad, baja viscosidad, gelificación y formación de películas son las proteínas y polisacáridos (Safeer-Abbas *et al.*, 2023); más específicamente la maltodextrina, alginato, almidones y gomas (Macías-Cortés *et al.*, 2020; Díaz-Montes, 2023). Se ha reportado que la mezcla de dos o más materiales de pared incrementa la eficiencia de encapsulación, así como la estabilidad térmica conservando sus propiedades biológicas (Tao *et al.*, 2019; Dierings de Souza *et al.*, 2021). Por estas razones el objetivo de la investigación fue obtener y caracterizar las cápsulas de extracto de hojas de mango, obtenidas por secado por aspersión con alginato de sodio y goma arábiga para su aplicación en frutos de interés comercial.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Encapsulación del extracto mediante secado por aspersión

Se preparó una solución utilizando la metodología propuesta por Calderón-Santoyo *et al.* (2022) con algunas modificaciones. Una solución de 250 mL (p/v) conformada por alginato de sodio 0.03 % el cual se disolvió en agua destilada por agitación magnética con una placa Fisher Scientific a 350 rpm durante 24 h a  $25 \pm 1$  °C. Pasadas las 24 h, a la solución de alginato de sodio se le añadió goma arábiga (7.5 % m/v) y 3 % (m/v) del extracto óptimo de las hojas de mango, la cual se homogenizó y después se encapsuló usando un equipo de escala laboratorio de secado por aspersión mini Spray Dryer (Modelo B-290, Büchi, Flawil, Suiza), con una boquilla de alimentación de 7 mm de diámetro bajo caudal constante y presión de aire ( $35 \text{ m}^3/\text{h}$  y 0.7 MPa, respectivamente), se mantuvo bajo una agitación constante a temperatura ambiente y 350 rpm, se alimentó por una bomba peristáltica a un caudal de 5 mL/min, la temperatura del aire de entrada y de salida fue de 105 y 63 °C, respectivamente.

### Caracterización fisicoquímica

#### Determinación de la higroscopicidad

Se llevó a cabo de acuerdo a la metodología descrita por Arepally *et al.* (2020). Se colocó 1 g de muestra en cajas Petri de 9 cm de diámetro (previamente a peso constante obtenido una vez que la caja de Petri perdió por completo su humedad a 105 °C y la diferencia de peso entre dos mediciones sucesivas no excedió los 0.0003 g), se colocaron en un desecador a 21 °C y 76 % de humedad relativa (HR) (solución de 36 g NaCl en 100 g de agua). Se registró el incremento del peso después de 7 días, la higroscopicidad fue calculada de acuerdo a la ecuación 1.

$$\text{Higroscopicidad (g agua/g de muestra)} = ((M_f - M_i)/M_i) * 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde  $M_f$  es el peso de las cajas con muestra después de 7 días y  $M_i$  el peso de las cajas al inicio de la prueba.

### Distribución del tamaño de partícula

La distribución del tamaño de partícula se determinó de acuerdo a la metodología propuesta por Calderón-Santoyo *et al.* (2022). Se utilizó un difractómetro láser Mastersizer (Modelo 3000, Malvern instruments, Malvern, Reino Unido). Las mediciones se realizaron a 25 °C y se colocaron 3 g de polvo manualmente en la tolva. Las condiciones de operación fueron: suministro de aire y el sistema de extracción de vacío conectados al 30 % de vibración, abertura de salida de 1 mm y aire comprimido a 2 bar de presión. Luego, la muestra pasó al Mastersizer con un valor oscurecimiento del 15 % y un índice de refracción de 1.432.

### Determinación de la solubilidad

Se utilizó la metodología propuesta por Jiménez-Sánchez *et al.* (2017), brevemente, se colocó 1 g de polvo en 100 mL de agua destilada, se agitó manualmente hasta que se solubilizó toda la muestra, y se centrifugaron 15 mL (Modelo X4R PRO-MD, Thermo Fisher Scientific Inc., Osterode am Harz, Alemania) a 5260 rpm durante 5 min. Se tomó una muestra de 2 mL del sobrenadante y se colocó en cajas Petri (previamente a peso constante obtenido una vez que la caja de Petri perdió por completo su humedad a 105 °C y la diferencia de peso entre dos mediciones sucesivas no excedió los 0.0003 g). Finalmente, se secó en una estufa a 105 °C por 5 h. La solubilidad (%) fue calculada por diferencia de peso mediante la ecuación 2.

$$\text{Solubilidad (\%)} = \left( \frac{M_f}{M_o} \right) * 100 \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:  $M_f$ : masa final y  $M_o$ = masa inicial.  
Determinación de la densidad aparente

La densidad aparente se realizó mediante la metodología propuesta por Jiménez-Sánchez *et al.* (2020), 5 g de cápsulas se transfirieron a una probeta graduada de 50 mL, después se movió verticalmente 10 veces. La densidad aparente se calculó dividiendo la masa entre el volumen, y se expresó como g/mL.

### Determinación de humedad

La humedad se determinó de acuerdo a la metodología propuesta por Ruiz-Montañez *et al.* (2019). Se utilizó un método termogravimétrico con equipo (TGA 550, TA instrumentos, New Castle, USA). Se colocaron 5 mg de muestra en una charola de platino HT, la velocidad de calentamiento fue de 10 °C/min en un rango de 25 a 800 °C bajo una atmósfera de nitrógeno.

### Eficiencia de encapsulación

La eficiencia de encapsulación fue calculada mediante la metodología propuesta por Navarro-Flores *et al.* (2020), con algunas modificaciones. La eficiencia de encapsulación se determinó para la actividad antioxidante total. Para ello, a 200 mg de cápsulas se les añadió 2 mL de una solución



compuesta por metanol y agua (1/1). La muestra se agitó en un vórtex por 1 min y se sonicó en un baño de ultrasonido (Modelo CD4820, Kendal, Eaton Sacon, Reino Unido) a 42 kHz, por 20 min a 25 °C. Finalmente, la muestra se centrifugó a 4000 rpm por 5 min. La actividad antioxidante se calculó utilizando una curva de calibración con ABTS<sup>+</sup>, como estándar se utilizó Trolox y la absorbancia se midió a 734 nm en un espectrofotómetro (Modelo Varian Cary 50 UV-VIS, Sídney, Australia). Para determinar los compuestos en la superficie de las cápsulas, 200 mg de las cápsulas se combinó con 2 mL de la solución de metanol/ agua y se agitó en un vórtex por 1 min. La muestra fue centrifugada a 4000 rpm por 5 min. La eficiencia se calculó con la ecuación 3.

$$EE (\%) = \frac{Aa \text{ total} - Aa \text{ superficie}}{Aa \text{ total}} * 100 \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde: Aa total es la actividad antioxidante total y Aa superficie es la actividad antioxidante en la superficie.

### Evaluación de la termoestabilidad del extracto crudo y encapsulado

Se realizó el análisis termogravimétrico (TGA) con un analizador termogravimétrico (Modelo TGA 550, TA instrumentos, New Castle, USA). Se colocaron 5 mg de muestra en una charola de platino HT, la velocidad de calentamiento fue de 10 °C/min en un rango de 25 a 800 °C bajo una atmósfera de nitrógeno. La pérdida de peso con respecto a la temperatura se expresó de acuerdo con la curva termogravimétrica (TG) y la curva termogravimétrica derivada de primer orden (TGD) mediante el software TRIOS. Las transiciones térmicas fueron analizadas por calorimetría diferencial de barrido en un equipo de calorimetría diferencial de barrido (DSC) (Modelo DSC 250, TA Instruments, New Castle, USA). Para ello, 5 mg de muestra se sellaron herméticamente en una charola de aluminio, como referencia se usó una charola sin muestra. Las muestras se calentaron de 25 a 400 °C con una velocidad de 10 °C/min bajo una atmósfera de nitrógeno con flujo de 50 mL/min, la calibración se realizó con un estándar de indio. Los datos temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) y la temperatura de fusión ( $T_m$ ) se analizaron en el software TRIOS (Calderón-Santoyo *et al.*, 2022).

### Evaluación de la fotoestabilidad del extracto crudo y encapsulado

Se utilizó una lámpara Osram Ultra-Vitalux 300 W que simuló la radiación UV-A. El procedimiento se realizó en una cámara oscura, la distancia entre la lámpara y la muestra fue de 41 cm. La muestra se mantuvo expuesta a la luz en tiempos de 0, 24, 48, 96, 120 y 148 h, esta metodología se utilizó para evaluar el extracto encapsulado (Ramos-Hernández *et al.*, 2018). Al finalizar cada tiempo de exposición se evaluó la actividad antioxidante, para ello, a 200 mg de cápsulas se les añadió 2 mL de una disolución compuesta por metanol y agua (1/1). La muestra se agitó en un vórtex por 1 min y se sonicó en un baño de ultrasonido a 42 kHz, por 20 min a 25 °C. La muestra

se centrifugó a 4000 rpm por 5 min. La actividad antioxidante se calculó utilizando una curva de calibración con ABTS<sup>+</sup>, como estándar se utilizó trolox y la absorbancia se midió a 734 nm en un espectrofotómetro.

### Evaluación de la actividad antifúngica *in vivo* de los encapsulados

Las frutas de interés comercial (naranja y arándanos), fueron lavadas y desinfectadas con 2 % (v/v) de hipoclorito de sodio por 2 min. Se realizaron soluciones de cápsulas y extracto a las concentraciones mínimas inhibitorias y fueron asperjadas con estas soluciones. Las frutas se perforaron (3 mm de diámetro y 3 mm de profundidad) con una aguja estéril. Los frutos se inocularon con 20 µL de suspensión de esporas de *Penicillium digitatum* ( $1 \times 10^5$  esporas/mL) y *Botrytis cinerea* ( $1 \times 10^3$  esporas/mL). Los frutos se almacenaron en una cámara de incubación por 7 días a  $28 \pm 3$  °C y 80 % HR. Se utilizaron 15 frutos para cada tratamiento y se obtuvieron los datos de incidencia (Ecuación 4) y severidad (Ecuación 5) de los frutos (Ayón-Macías *et al.*, 2023).

$$\text{Incidencia (\%)} = \left( \frac{\text{Número de frutos infectados}}{\text{Número total de frutos}} \right) * 100 \quad \text{Ec. (4)}$$

$$\text{Severidad (\%)} = ((dC - dT) / dC) * 100 \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde: dC es el diámetro de la lesión producida en los frutos control y dT diámetro de la lesión producida en los frutos tratados.

### Análisis estadístico

Los resultados se expresaron como media  $\pm$  desviación estándar. Cada experimento se repitió tres veces con tres réplicas por tratamiento. Las variables de respuesta se evaluaron con un análisis de varianza de una vía. Para determinar las diferencias significativas entre tratamientos se aplicó una prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95 % ( $P < 0.05$ ). Los datos se procesaron con el programa MINITAB.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Evaluación de la disolución polimérica por DSC

Con el fin de determinar la temperatura de entrada para el secado por aspersión de la disolución polimérica conformada por goma arábiga y alginato de sodio, con y sin extracto, se realizó un análisis por DSC. Es importante comentar que la miscibilidad de los componentes es un factor importante en la determinación de la  $T_g$ , ya que, si los polímeros no están integrados completamente en la disolución, el análisis de DSC mostraría el valor de  $T_g$  del compuesto mayoritario. La  $T_g$  de la disolución con y sin extracto fue de  $112.5 \pm 0.5$  °C. Este comportamiento indica que no existen interacciones fuertes entre el extracto y los polímeros (Iñiguez-Moreno *et al.*, 2021). En este estudio, en base a la  $T_g$  obtenida de la disolución polimérica, se decidió utilizar 105 °C como temperatura de entrada de aire al secado por aspersión. Lo

anterior de acuerdo a Islam *et al.* (2010), quienes comentan que la temperatura de secado por aspersión se define con una diferencia menor a 10 °C respecto de la  $T_g$  para evitar el cambio amorfo de los polímeros.

### Caracterización de las cápsulas

#### Actividad de agua

La actividad de agua ( $a_w$ ) de las cápsulas con extracto fue de  $0.275 \pm 0.01$ . Este resultado es un indicativo de la estabilidad de las cápsulas, ya que existe una menor cantidad de agua disponible que pueda ser usada para la proliferación de microorganismos (Ferrari *et al.*, 2013). Este resultado fue comparable al obtenido por Ferrari *et al.* (2013) quienes utilizaron individualmente goma arábiga y alginato de sodio para encapsular ácido ascórbico, obteniendo  $a_w$  de 0.34 y 0.26, respectivamente. Los valores de  $a_w$  bajos son atribuidos a la alta tasa de transferencia de energía del aire caliente del secado por aspersión, en función de la viscosidad de la solución polimérica, lo que determina la velocidad de evaporación del agua contenida en la disolución alimentada para convertirla en polvo (Islam *et al.*, 2010). Al tener las cápsulas una  $a_w$  mayor a 0.4, el agua libre puede crear reacciones negativas en los compuestos encapsulados, en general son de tres tipos oxidación, hidrólisis y polimerización de las moléculas (Chiou y Langrish, 2007; Kuck *et al.*, 2017).

#### Distribución de tamaño de partícula

El tamaño promedio de las partículas obtenidas por secado por aspersión fue de  $D [4,3] = 6.53 \mu\text{m}$ . Este diámetro indicó la estabilidad de las cápsulas, ya que, a medida que se reduce su tamaño se tiene una mayor superficie de contacto, lo que facilita la liberación del compuesto activo de la cápsula (Shimanovich *et al.*, 2014). Este resultado es mejor a los obtenidos por Chew *et al.* (2018), quienes al emplear goma arábiga y caseína de sodio en una proporción de 4:1 a una temperatura de aire de entrada de 160 °C, obtuvieron partículas con diámetro promedio de  $D [4,3] = 25 \mu\text{m}$ . Esto puede deberse a que el uso de una mayor temperatura de aire de entrada facilitó la formación de partículas más grandes, causadas por la rápida evaporación del agua, ya que el vapor de agua puede quedar atrapado en la coraza de la cápsula, incrementado su tamaño (Chegini y Ghobadian, 2005; Tonon *et al.*, 2011). De igual manera, el aumento de temperatura acelera la migración de los materiales que forman dicha coraza (Aghbashlo *et al.*, 2013).

#### Eficiencia de encapsulación

La eficiencia de encapsulación es un parámetro importante, ya que además de evaluar la rentabilidad del proceso, evalúa la calidad de las cápsulas, debido a que refleja la cantidad de extracto en el núcleo (Karagozlu *et al.*, 2021). Se obtuvo una eficiencia de encapsulación del 80 % para las cápsulas compuestas de goma arábiga, alginato de sodio y extracto de hoja de mango. Este valor clasifica al proceso como de alta eficiencia de encapsulación, la cual se asocia con la combinación de los materiales de pared utilizados. La respuesta obtenida es comparable y superior a lo reportado por Gon-

zález *et al.* (2019), quienes encapsularon extracto de hojas de olivo con alginato de sodio y obtuvieron 60 % de eficiencia de encapsulación. De acuerdo con Al-Maqtari *et al.* (2021) la combinación de los materiales encapsulantes tiene un papel importante en la eficiencia de encapsulación, ya que, un sólo material de pared no presenta todas las propiedades necesarias para una encapsulación eficiente. La diferencia en la eficiencia de encapsulación se asocia fuertemente con la compatibilidad de los materiales encapsulantes utilizados, condiciones y el tipo de proceso, entre otras (Nedović *et al.*, 2013).

#### Hidrosolubilidad de las cápsulas

La solubilidad en agua es uno de los factores más importantes en las propiedades de los encapsulados, puesto que, de esta propiedad dependen sus aplicaciones e incorporación en diversos sistemas (Tomsone *et al.*, 2020). La solubilidad de las cápsulas con extracto de hoja de mango presentó un valor de  $95 \pm 2 \%$ . La solubilidad presentada fue comparable con lo reportado por Navarro *et al.* (2020) quienes utilizaron diferentes proporciones de maltodextrina con otros polímeros (goma arábiga, proteína de soya, goma de semillas de cajanus, y pectina de cáscara de cacao). Estos autores reportan solubilidades entre 82.15 y 86.54 %. La solubilidad es un factor que afecta la liberación del material del núcleo en el medio líquido (Bhattachar *et al.*, 2006). Además, los polisacáridos como la goma arábiga tienen fuerte afinidad a las moléculas de agua debido al exceso de grupos hidroxilo (Savjani *et al.*, 2012). Las diferencias existentes para esta propiedad se pueden atribuir a la característica individual de cada material encapsulante. Stanisavljević *et al.* (2018) mencionan que la goma arábiga se caracteriza por una alta solubilidad y una baja viscosidad la cual es apropiada para el proceso de secado por aspersión. Adicionalmente, Al-Maqtari *et al.* (2021) describe que la goma arábiga consiste en cadenas proteicas hidrofóbicas y polisacáridos hidrofílicos, lo que le confiere una alta solubilidad. Por su parte, el alginato de sodio es un copolímero binario lineal de residuos de ácido manurónico y gulurónico que es menos anfílico que la goma arábiga (Li *et al.*, 2021). Por lo anterior, la alta solubilidad de las cápsulas se puede atribuir a la alta concentración de goma arábiga en la formulación.

#### Densidad aparente

La densidad aparente es un factor importante para el manejo, transporte y envasado de polvos, es por esto que, una mayor densidad aparente, indica que el polvo es más deseable debido a la menor ocupación de volumen (Zhang *et al.*, 2020). Las cápsulas con extracto de hoja de mango mostraron una densidad aparente de  $0.32 \pm 0.02 \text{ g/mL}$ . Al aumentar el valor de la densidad aparente, Rodríguez-Ramírez *et al.* (2012), mencionan que las partículas no forman aglomerados, tienen un tamaño de partícula uniforme y las partículas son de menor tamaño, lo cual favorece el manejo y envasado del polvo. Este dato es superior a lo obtenido por George *et al.* (2021), quienes elaboraron cápsulas de goma arábiga con



una densidad aparente de 0.177 g/mL. La diferencia puede atribuirse a la viscosidad de la solución polimérica, ya que el incremento de viscosidad incrementa el tamaño de las partículas. Como consecuencia hay una mayor ocupación del volumen en las capsulas con extracto y la densidad aparente disminuye (Sarabandi *et al.*, 2019).

### Higroscopicidad

La higroscopicidad de las cápsulas fue de 1.15 g H<sub>2</sub>O/100 g de muestra. La baja higroscopicidad confirma la alta solubilidad obtenida. Adicionalmente, mejora la estabilidad física, el transporte y almacenaje de los polvos (Fujimori *et al.*, 2016). Los resultados obtenidos fueron mejores a los reportados por Karrar *et al.* (2021), quienes al utilizar aislado de proteína de suero y la combinación de goma arábiga con maltodextrina para encapsular el aceite de semilla de gurum, obtuvieron 6.95 y 8.76 g H<sub>2</sub>O/100 g de muestra, respectivamente. Las diferencias en las higroscopicidades de los materiales se deben a la estructura química, su composición y la existencia de grupos funcionales (Juárez-Enríquez *et al.*, 2017). De igual manera, los grupos hidroxilo de los polisacáridos pueden formar enlaces con el hidrógeno de las moléculas de agua, lo que incrementa esta propiedad (Chew *et al.*, 2018; Tao *et al.*, 2019).

### Evaluación de la termoestabilidad del extracto encapsulado

Las cápsulas con y sin extracto mostraron una primer pérdida de masa de 8 y 8.91 %, respectivamente a temperaturas de 52-54 °C (Tabla 1). La segunda pérdida de masa se registró a la temperatura de descomposición de las cápsulas de 290.82 °C (con extracto) y 295.9 °C (vacías), con pérdidas de masa de 71.11 y 67.53 %, respectivamente. Estos porcentajes máxicos, indican la presencia del extracto en las cápsulas correspondientes. En lo que respecta al extracto, la temperatura de descomposición fue de 233.59 °C. Al comparar con la temperatura de descomposición de las cápsulas con extracto (290.82 °C)

se evidenció que existió una termo protección en la encapsulación sobre el extracto. Además, en base a la bibliografía se encontró la temperatura de máxima descomposición de los compuestos identificados: mangiferina de 275.3 °C (Taiwo *et al.*, 2024), ácido clorogénico de 283 °C (Owusu-Ware *et al.*, 2013), ácido hidroxobenzoico de 215.03 °C (Rzokee y Ahmad, 2014), ácido cafeico de 230.3 °C (Liudvinaviciute *et al.*, 2019) y el ácido cumárico de 275 °C (Lonashiro *et al.*, 2012). Lo que permitió asumir que la temperatura de descomposición del extracto (233.59 °C) ha sido correctamente determinada. Adicionalmente, al comparar la temperatura de descomposición de las cápsulas con extracto y la de los componentes presentes en el extracto, se puede confirmar el incremento de la temperatura de descomposición, lo que evidencia la termoprotección para los componentes encapsulados.

El análisis DSC mostró que las cápsulas con y sin extracto, presentaron temperaturas de transición vítrea de 129 ± 0.5 y 130 ± 0.3 °C, respectivamente (Tabla 2). Los valores de T<sub>g</sub> fueron estadísticamente iguales, lo que indica que no existen interacciones entre el extracto y los polímeros (Iñiguez-Moreno *et al.*, 2021). La temperatura de transición vítrea es aquella donde los materiales amorfos pasan a un estado gomoso, este se ve afectado por la estructura química y el peso molecular del material de pared utilizado (Karrar *et al.*, 2021).

**Tabla 2.** Temperatura de transición vítrea de biopolímeros, cápsulas sin extracto y extracto encapsulado.

**Table 2.** Glass transition temperature of biopolymers, capsules without extract, and encapsulated extract.

Biopolímero/cápsula	T <sub>g</sub> (°C)
Goma arábiga	135.22 ± 0.3 <sup>a</sup>
Alginato de sodio	120.65 ± 0.4 <sup>c</sup>
Cápsulas sin extracto	130.87 ± 0.3 <sup>a</sup>
Cápsulas con extracto	129.45 ± 0.5 <sup>a</sup>

Los resultados expresan la media ± desviación estándar. Las letras diferentes significan diferencia significativa (P < 0.05).

**Tabla 1.** Análisis térmico de cápsulas de goma arábiga, alginato de sodio y extracto de hojas de mango.

**Table 1.** Thermal analysis of arabic gum, sodium alginate, and mango leaf extract capsules.

Muestra	Eventos térmicos por TGA						
	Rango (°C)	Inicio (°C)	Punto medio (°C)	Final (°C)	T <sub>d</sub> (°C)	Pérdida de peso (%)	Atribución de la pérdida de peso
Extracto	25-110	52.05	76.38	101.07	233.59	4.18	Pérdida de agua libre y ligada
	110-410	175.5	233.59	285.30		47.57	Descomposición del extracto
	410-800	450.08	518.08	583.64		25.4	Minerales
Cápsulas vacías	25-190	29.03	52.60	69.18	295.90	8.91	Pérdida de agua libre y ligada
	190-372	273.98	295.90	319.20		67.35	Descomposición de goma arábiga y alginato de sodio
	373-800	384.80	321.07	792.69		12.66	Minerales
						11.07	Masa residual
Cápsulas + extracto	25-130	29.76	54.26	72.09	290.82	8.02	Pérdida de agua libre y ligada
	130-563	255.92	290.82	326.33		71.10	Descomposición de goma arábiga, alginato de sodio y extracto de hoja de mango
	563-800	647.54	713.59	785.83		6.47	Minerales
						14.39	Masa residual

Td: temperatura de descomposición.

### Evaluación de los enlaces producidos en las cápsulas por FTIR

El análisis FTIR de las cápsulas reveló los enlaces característicos de la goma arábica y el alginato de sodio (Tabla 3). Estos enlaces estuvieron presentes en ambas cápsulas. El primero de los enlaces encontrados en las cápsulas sin extracto fue un grupo hidroxilo, siendo el primero de estos a 3300-3280  $\text{cm}^{-1}$ . Además, se observó un enlace C-O, correspondiente a un anillo de piranosa a 1075 - 1000  $\text{cm}^{-1}$  (Tabla 3). En cuanto al alginato de sodio Nair *et al.* (2020) reportaron un grupo hidroxilo a longitud de onda de 3281  $\text{cm}^{-1}$  y el anillo de piranosa característico del alginato de sodio a 1023  $\text{cm}^{-1}$ . Así mismo, los enlaces que no están presentes en las cápsulas sin extracto, son característicos del extracto de las hojas de mango, siendo el enlace C=O reportado por Bello *et al.* (2014), el grupo característico en el extracto de hoja de mango. Este enlace está presente en una gran proporción de los compuestos ya anteriormente identificado en las hojas de mango, entre los más representativos son las xantonas, los ácidos fenólicos y flavonol (Kumar *et al.*, 2021). Por otra parte, el enlace N-O reportado por Adelaja *et al.* (2019) representa el grupo de los nitroderivados en el extracto (Tabla 3). Este grupo puede ser utilizado para su conversión a grupos carbonilos utilizando la reacción de Nef (Ballini y Petrini, 2004).

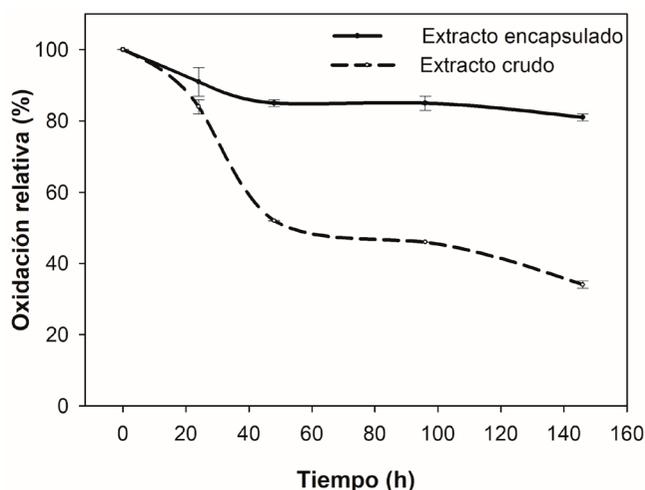
### Fotoestabilidad de las cápsulas

La elección de un material de pared es un punto crítico para la encapsulación. Según Tang *et al.* (2020), la goma arábica posee excelentes capacidades para proveer protección efectiva. Esta propiedad se demuestra en la Figura 1, en la que se observa como la combinación de los materiales de pared utilizados proveen foto protección efectiva del 80 % al extracto, respecto al extracto expuesto a radiación UV sin encapsular (32 % de oxidación relativa) después de 148 h de exposición. Los datos obtenidos son similares a los reportados por Ramos-Hernández *et al.* (2018) quienes obtuvieron una fotoprotección del 88 % en la encapsulación de  $\beta$ -caroteno utilizando fructanos de agave. La fotoprotección se debió a que los polisacáridos por su estructura tienen la capacidad de absorber y reflejar la radiación UV a través de los grupos carbonilo que funcionan como cromóforos, evitando que las radiaciones penetren al interior de las cápsulas (Wondraczek *et al.*, 2011).

**Tabla 3.** Tipos de enlaces producidos en las cápsulas de goma arábica y alginato de sodio con y sin extracto.

**Table 3.** Types of bonds produced in arabic gum and sodium alginate capsules with and without extract.

Enlaces obtenidos por FTIR	Número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Modo del enlace	Tipo de enlace reportado
OH	3300-3280	Estiramiento	Hidroxilo
C-O	1075-1000	Estiramiento	Anillo de piranosa
C=O	1700-1600	Estiramiento	Carbonilo
N-O	950-920	Estiramiento	Nitroderivado



**Figura 1.** Fotoestabilidad del extracto encapsulado y extracto crudo de hojas de mango. Los puntos representan el valor medio y las líneas verticales la desviación estándar.

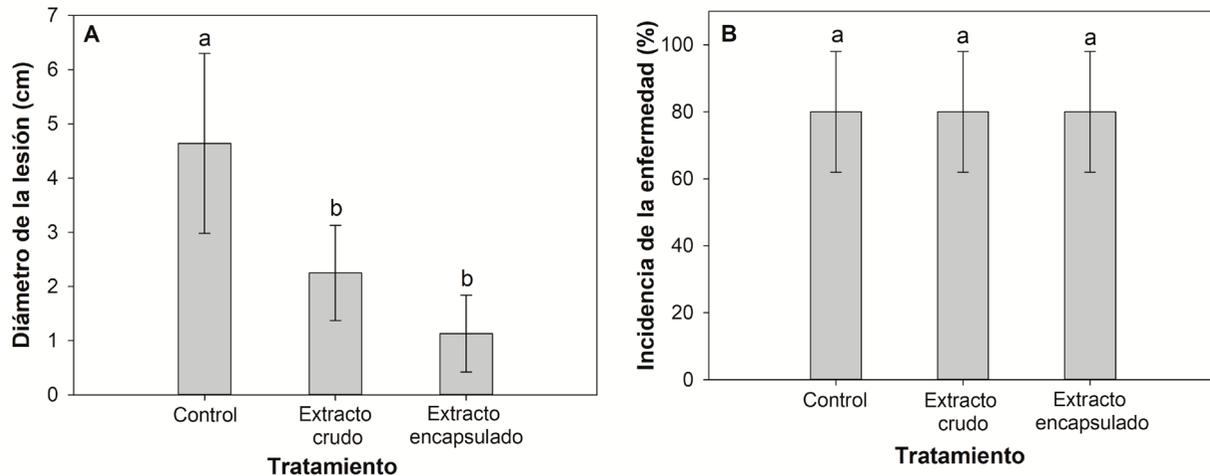
**Figure 1.** Photostability of encapsulated extract and crude extract of mango leaves. The points represent the mean value and the vertical lines the standard deviation.

### Inhibición *in vivo* de los hongos de interés comercial

La efectividad de las cápsulas obtenidas se evaluó mediante pruebas de inhibición *in vivo* en diferentes frutas de interés comercial, tales como naranja y arándano. La prueba de severidad de *P. digitatum* en naranjas mostró diferencia significativa ( $P > 0.05$ ) entre los controles y el tratamiento con las cápsulas. Se observó que las cápsulas con extracto de hoja de mango redujeron en un 70 % la lesión causada por *P. digitatum* (Figura 2A). Sin embargo, no existieron diferencias significativas respecto a la incidencia (80 %) (Figura 2B). Los resultados obtenidos superan a los presentados por Pérez-Alfonso *et al.* (2012), quienes utilizaron por separado carvacrol y timol, logrando reducir la severidad de *P. digitatum* en un 40 % después de 72 h en naranjas utilizando concentraciones de 50 a 250  $\mu\text{L/L}$ .

De acuerdo a la composición fitoquímica del extracto, según Martínez *et al.* (2017) el ácido clorogénico puede aumentar la permeabilidad de la membrana celular de los fitopatógenos. Por otra parte, el ácido cafeico induce a la desorganización de la membrana celular (Santiago *et al.*, 2010). Los efectos que puede producir el ácido cafeico son malformaciones de las hifas, desorganización de la membrana celular y fuga de líquido citoplasmático (Gatto *et al.*, 2011). Además, el ácido cumárico produce una alteración de la membrana debido a los grupos hidroxilos (Hernández *et al.*, 2021). Por otra parte, la alta reducción de la severidad se puede atribuir a que los materiales utilizados para la encapsulación pueden formar películas en el epicarpio del fruto, facilitando la adherencia y liberación de los compuestos encapsulados (Felton, 2013; Chaumon *et al.*, 2022).

Adicionalmente, los arándanos empleados como control mostraron un 100 % de incidencia de *B. cinerea*, mientras que los arándanos tratados con las cápsulas mostraron un 0 % de incidencia (Figura 3). Este resultado indicó que las cápsulas con extracto de hoja de mango pueden emplearse como



**Figura 2.** Actividad antifúngica del extracto de hoja de mango crudo y encapsulado contra *P. digitatum* en naranjas. En cada gráfica los valores con la misma letra no son estadísticamente diferentes ( $P < 0.05$ ). Las barras representan la media y las líneas verticales la desviación estándar. A) diámetro de la lesión y B) incidencia de la enfermedad.

**Figure 2.** Antifungal activity of crude and encapsulated mango leaf extract against *P. digitatum* in oranges. In each graph, the values with the same letter are not statistically different ( $P < 0.05$ ). The bars represent the mean and the vertical lines the standard deviation. A) lesion diameter and B) incidence of the disease.

método preventivo en estos frutos. Los resultados obtenidos son similares a los reportados por Romeo *et al.* (2015) quienes al utilizar una concentración de 10 mg/mL de extracto fenólico de hojas de zumaque redujeron la incidencia en un 92 %.

En lo que respecta a *B. cinerea*, el efecto del ácido clorogénico podría causar lisis celular y cambios en la permeabilidad de la membrana (Ma *et al.*, 2018). Los compuestos fenólicos como el ácido cafeico pueden causar cambios en

la morfología celular y en la membrana (Rao *et al.*, 2010). Asimismo, el ácido cumárico puede desestabilizar la membrana celular afectando con ello su polaridad (Morales *et al.*, 2017).

## CONCLUSIONES

El secado por aspersión, con el uso de materiales de pared adecuados, es una tecnología eficiente para la encapsulación, con la que se obtienen partículas con características fisicoquímicas deseables que permiten la estabilización de los CAVB. Las cápsulas permitieron una liberación adecuada del extracto para el control de los hongos fitopatógenos, reduciendo la incidencia de *P. digitatum* en naranjas y severidad de *B. cinerea* en arándanos. Se demostraron las excelentes capacidades de la goma arábiga y alginato de sodio para crear una coraza alrededor de los compuestos de alto valor biológico con efecto termo y fotoprotector. Las microcápsulas de extracto polifenólico de hoja de mango se presentan como una alternativa viable y efectiva para el control de frutos de interés comercial como naranjas y arándanos.

## AGRADECIMIENTOS

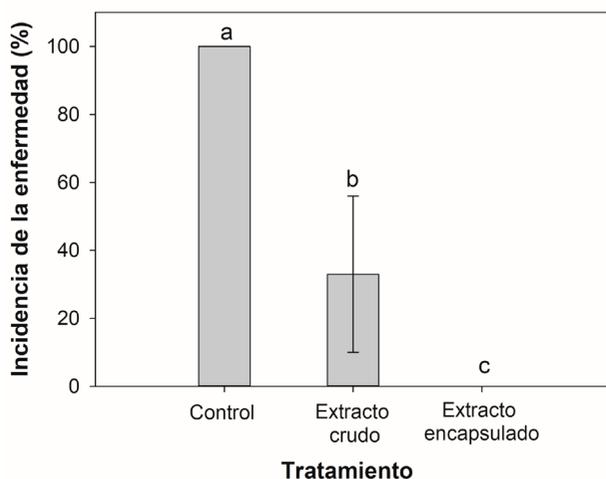
El primer autor agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada para los estudios de posgrado dentro del Programa de Maestría en Ciencias en Alimentos del Instituto Tecnológico de Tepic. Los autores agradecen al TecNM por el soporte financiero del proyecto 19433-24P.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

## REFERENCIAS

Adelaja, O.A., Bankole, A.C., Oladipo, M.E. y Lene, D. B. 2019. Biosorption of Hg (II) ions, Congo red and their binary



**Figura 3.** Incidencia de *B. cinerea* en frutos de arándano tratados con extracto de hoja de mango crudo y encapsulado. Los valores con la misma letra no son estadísticamente diferentes ( $P < 0.05$ ). Las barras representan la media y las líneas verticales la desviación estándar.

**Figure 3.** Incidence of *B. cinerea* in blueberry fruits treated with crude and encapsulated mango leaf extract. Values with the same letter are not statistically different ( $P < 0.05$ ). Bars represent the mean and vertical lines the standard deviation.

- mixture using raw and chemically activated mango leaves. *International Journal of Energy and Water Resources* 3(1): 1-12. <https://doi.org/10.1007/s42108-019-00012-0>
- Aghbashlo, M., Mobli, H., Madadlou, A. y Rafiee, S. 2013. Influence of wall material and inlet drying air temperature on the microencapsulation of fish oil by spray drying. *Food and Bioprocess Technology*. 6(6): 1561-1569. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0796-7>
- Albuquerque, B.R., Heleno, S.A., Oliveira, M.B.P.P., Barros, L. y Ferreira, I.C.F.R. 2021. Phenolic compounds: Current industrial applications, limitations and future challenges. *Food & Function*. 12(1): 14-29. <https://doi.org/10.1039/D0FO02324H>
- Al-Maqtari, Q.A., Mohammed, J.K., Mahdi, A.A., Al-Ansi, W., Zhang, M., Al-Adeeb, A., Wei, M., Phyo, H.M. y Yao, W. 2021. Physicochemical properties, microstructure, and storage stability of *Pulicaria jaubertii* extract microencapsulated with different protein biopolymers and gum arabic as wall materials. *International Journal of Biological Macromolecules*. 187: 939-954. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.180>
- Arepally, D., Reddy, R.S., y Goswami, T.K. 2020. Studies on survivability, storage stability of encapsulated spray dried probiotic powder. In *Current Research in Food Science* 3: 235-242. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2020.09.001>
- Ayón-Macías, K.D., Castañeda-Andrade, A.J., Ragazzo-Sánchez, J.A. y Calderón-Santoyo, M. 2023. Application of nanofibers with jackfruit leaf extract via electrospinning to control phytopathogens in *Averrhoa carambola* L. *Polymer Bulletin*. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-04815-4>
- Ballesteros, L.F., Ramirez, M.J., Orrego, C.E., Teixeira, J.A. y Mussatto, S.I. 2017. Encapsulation of antioxidant phenolic compounds extracted from spent coffee grounds by freeze-drying and spray-drying using different coating materials. *Food Chemistry*. 237: 623-631. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.142>
- Ballini, R. y Petrini, M. 2004. Recent synthetic developments in the nitro to carbonyl conversion (Nef reaction). *Tetrahedron*. 60(5): 1017-1047. <https://doi.org/10.1016/j.tet.2003.11.016>
- Bello, O.S., Bello, O.U. y Lateef, I.O. 2014. Adsorption characteristics of mango leaf (*Mangifera indica*) powder as adsorbent for malachite green dye removal from aqueous solution. *Covenant Journal of Physical and Life Sciences* 2(1).
- Bhattachar, S.N., Deschenes, L.A. y Wesley, J.A. 2006. Solubility: it's not just for physical chemists. *Drug Discovery Today*. 11(21-22): 1012-1018. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2006.09.002>
- Calderón-Santoyo, M., González-Cruz, E.M., Iñiguez-Moreno, M., Ramos-Martínez, O., Burgos-Hernández, A. y Ragazzo-Sánchez, J.A. 2022. Microencapsulation of phenolic extract from sea grape (*Coccoloba uvifera* L.) with antimutagenic activity. *Chemistry & Biodiversity*. 19(11). <https://doi.org/10.1002/cbdv.202200806>
- Chaumon, M., Goëlo, V., Ribeiro, A.M., Rocha, F. y Estevinho, B.N. 2020. *In vitro* evaluation of microparticles with *Laurus nobilis* L. extract prepared by spray-drying for application in food and pharmaceutical products. *Food and Bioprocess Technology*. 122: 124-135. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.04.011>
- Cheginí, G.R. y Ghobadian, B. 2005. Effect of spray-drying conditions on physical properties of orange juice powder. *Drying Technology*. 23(3): 657-668. <https://doi.org/10.1081/DRT-200054161>
- Chew, S.C., Tan, C.P. y Nyam, K.L. 2018. Microencapsulation of refined kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) seed oil by spray drying using  $\beta$ -cyclodextrin/gum arabic/sodium caseinate. *Journal of Food Engineering*. 237: 78-85. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.016>
- Chiou, D. y Langrish, T.A.G. 2007. Crystallization of amorphous components in spray-dried powders. *Drying Technology*. 25(9): 1427-1435. <https://doi.org/10.1080/07373930701536718>
- Díaz-Montes, E. 2023. Wall materials for encapsulating bioactive compounds via spray-drying: A review. *Polymers*. 15(12): 2659. <https://doi.org/10.3390/polym15122659>
- Dierings de Souza, E.J., Kringel, D.H., Guerra Dias, A.R. y da Rosa Zavareze, E. 2021. Polysaccharides as wall material for the encapsulation of essential oils by electrospun technique. *Carbohydrate Polymers*. 265: 118068. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118068>
- Felton, L.A. 2013. Mechanisms of polymeric film formation. *International Journal of Pharmaceutics*. 457(2): 423-427. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2012.12.027>
- Ferrari, C.C., Marconi Germer, S.P., Alvim, I.D. y de Aguirre, J.M. 2013. Storage stability of spray-dried blackberry powder produced with maltodextrin or gum arabic. *Drying Technology*. 31(4): 470-478. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.742103>
- Fujimori, M., Kadota, K., Kato, K., Seto, Y., Onoue, S., Sato, H., Ueda, H. y Tozuka, Y. 2016. Low hygroscopic spray-dried powders with trans-glycosylated food additives enhance the solubility and oral bioavailability of ipriflavone. *Food Chemistry*. 190: 1050-1055. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.06.081>
- Gatto, M.A., Ippolito, A., Linsalata, V., Cascarano, N.A., Nigro, F., Vanadia, S. y Di Venere, D. 2011. Activity of extracts from wild edible herbs against postharvest fungal diseases of fruit and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*. 61(1): 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.02.005>
- George, T.T., Oyenihi, A.B., Rautenbach, F. y Obilana, A.O. 2021. Characterization of *Moringa oleifera* leaf powder extract encapsulated in maltodextrin and/or gum arabic coatings. *Foods*. 10(12): 3044. <https://doi.org/10.3390/foods10123044>
- González, E., Gómez-Caravaca, A.M., Giménez, B., Cebrián, R., Maqueda, M., Martínez-Férez, A., Segura-Carretero, A. y Robert, P. 2019. Evolution of the phenolic compounds profile of olive leaf extract encapsulated by spray-drying during *in vitro* gastrointestinal digestion. *Food Chemistry*. 279: 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.127>
- Guamán-Balcázar, M.C., Montes, A., Pereyra, C. y de la Ossa, E.M. 2017. Precipitation of mango leaves antioxidants by supercritical antisolvent process. *Journal of Supercritical Fluids*, 128: 218-226. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.05.031>
- Hernández, A., Ruiz-Moyano, S., Galván, A.I., Merchán, A.V., Pérez Nevado, F., Aranda, E., Serradilla, M.J., Córdoba, M. de G. y Martín, A. 2021. Anti-fungal activity of phenolic sweet orange peel extract for controlling fungi responsible for post-harvest fruit decay. *Fungal Biology*. 125(2): 143-152. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2020.05.005>
- Iñiguez-Moreno, M., Ragazzo-Sánchez, J.A., Barros-Castillo, J.C., Solís-Pacheco, J.R. y Calderón-Santoyo, M. 2021.

- Characterization of sodium alginate coatings with *Meyerozyma caribbica* and impact on quality properties of avocado fruit. *Lwt- Food Science and Technology*. 152: 112346. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112346>
- Ionashiro, E.Y., Caires, F.J., Siqueira, A.B., Lima, L.S. y Carvalho, C.T. 2012. Thermal behaviour of fumaric acid, sodium fumarate and its compounds with light trivalent lanthanides in air atmosphere. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 108(3): 1183-1188. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1660-0>
- Islam, M.I.U., Sherrell, R. y Langrish, T.A.G. 2010. An investigation of the relationship between glass transition temperatures and the crystallinity of spray-dried powders. *Drying Technology*. 28(3): 361-368. <https://doi.org/10.1080/07373931003641586>
- Jimenez-Sánchez, D.E., Calderón-Santoyo, M., Herman-Lara, E., Gaston-Peña, C., Luna-Solano, G. y Ragazzo-Sánchez, J.A. 2020. Use of native agave fructans as stabilizers on physicochemical properties of spray-dried pineapple juice. *Drying Technology*. 38(3): 293-303. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1565575>
- Jimenez-Sánchez, D.E., Calderón-Santoyo, M., Picart-Palmade, L., Luna-Solano, G., Ortiz-Basurto, R.I., Bautista-Rosales, P.U. y Ragazzo-Sánchez, J.A. 2017. Effect of addition of native agave fructans on spray-dried chayote (*Sechium edule*) and pineapple (*Ananas comosus*) juices: Rheology, microstructure, and water sorption. *Food and Bioprocess Technology*. 10(11): 2069-2080. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1974-4>
- Juarez-Enriquez, E., Olivas, G.I., Zamudio-Flores, P.B., Ortega-Rivas, E., Perez-Vega, S. y Sepulveda, D.R. 2017. Effect of water content on the flowability of hygroscopic powders. *Journal of Food Engineering*. 205: 12-17. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.024>
- Karagozlu, M., Ocak, B. y Özdestan-Ocak, Ö. 2021. Effect of tannic acid concentration on the physicochemical, thermal, and antioxidant properties of gelatin/gum arabic-walled microcapsules containing *Origanum onites* L. essential Oil. *Food and Bioprocess Technology*. 14(7): 1231-1243. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02633-y>
- Karrar, E., Mahdi, A.A., Sheth, S., Mohamed-Ahmed, I.A., Manzoor, M.F., Wei, W. y Wang, X. 2021. Effect of maltodextrin combination with gum arabic and whey protein isolate on the microencapsulation of gurum seed oil using a spray-drying method. *International Journal of Biological Macromolecules*. 171: 208-216. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.045>
- Klepcka, J., Gujska, E. y Michalak, J. 2011. Phenolic compounds as cultivar- and variety-distinguishing factors in some plant products. *Plant Foods for Human Nutrition*. 66(1), 64-69. <https://doi.org/10.1007/s11130-010-0205-1>
- Kuck, L.S., Wesolowski, J.L. y Noreña, C.P.Z. 2017. Effect of temperature and relative humidity on stability following simulated gastro-intestinal digestion of microcapsules of Bordo grape skin phenolic extract produced with different carrier agents. *Food Chemistry*. 230: 257-264. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.038>
- Kumar, M., Saurabh, V., Tomar, M., Hasan, M., Changan, S., Sasi, M., Maheshwari, C., Prajapati, U., Singh, S., Prajapat, R.K., Dhumal, S., Punia, S., Amarowicz, R. y Mekhemar, M. 2021. Mango (*Mangifera indica* L.) leaves: Nutritional composition, phytochemical profile, and health-promoting bioactivities. *Antioxidants*. 10(2): 299. <https://doi.org/10.3390/antiox10020299>
- Li, J., Zhai, J., Dyett, B., Yang, Y., Drummond, C.J. y Conn, C.E. 2021. Effect of gum arabic or sodium alginate incorporation on the physicochemical and curcumin retention properties of liposomes. *Lwt- Food Science and Technology*. 139: 110571. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110571>
- Liudvinavičiute, D., Rutkaite, R., Bendoraitiene, J. y Klimavičiute, R. 2019. Thermogravimetric analysis of caffeic and rosmarinic acid containing chitosan complexes. *Carbohydrate Polymers*. 222: 115003. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115003>
- Ma, L., He, J., Liu, H. y Zhou, H. 2018. The phenylpropanoid pathway affects apple fruit resistance to *Botrytis cinerea*. *Journal of Phytopathology*. 166(3): 206-215. <https://doi.org/10.1111/jph.12677>
- Morales, J., Mendoza, L. y Cotoras, M. 2017. Alteration of oxidative phosphorylation as a possible mechanism of the antifungal action of coumaric acid against *Botrytis cinerea*. *Journal of Applied Microbiology*. 123(4): 969-976. <https://doi.org/10.1111/jam.13540>
- Macías-Cortés, E., Gallegos-Infante, J., Rocha-Guzmán, N., Moreno-Jiménez, M., Medina-Torres, L. y González-Laredo, R.F. 2020. Microencapsulation of phenolic compounds: Technologies and novel polymers. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 19(2): 491-521. <https://doi.org/10.24275/rmiq>
- Nair, R.M., Bindhu, B. y Reena, V.L. 2020. A polymer blend from gum arabic and sodium alginate - preparation and characterization. *Journal of Polymer Research*. 27(6): 154. <https://doi.org/10.1007/s10965-020-02128-y>
- Navarro-Flores, M.J., Ventura-Canseco, L.M.C., Meza-Gordillo, R., Ayora-Talavera, T. del R. y Abud-Archila, M. 2020. Spray drying encapsulation of a native plant extract rich in phenolic compounds with combinations of maltodextrin and non-conventional wall materials. *Journal of Food Science and Technology*. 57(11): 4111-4122. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04447-w>
- Nedović, V., Kalušević, A., Manojlović, V., Petrović, T. y Bugarski, B. 2013. Encapsulation systems in the food industry. En *Food Engineering Series*. V. Nedović, A. Kalušević, V. Manojlović, T. Petrović y B. Bugarski (ed.), pp 229-253. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7906-2\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7906-2_13)
- Owusu-Ware, S.K., Chowdhry, B.Z., Leharne, S.A. y Antonijević, M.D. 2013. Quantitative analysis of overlapping processes in the non-isothermal decomposition of chlorogenic acid by peak fitting. *Thermochimica Acta*. 565: 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2013.04.029>
- Pérez-Alfonso, C.O., Martínez-Romero, D., Zapata, P.J., Serrano, M., Valero, D. y Castillo, S. 2012. The effects of essential oils carvacrol and thymol on growth of *Penicillium digitatum* and *P. italicum* involved in lemon decay. *International Journal of Food Microbiology*. 158(2): 101-106. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2012.07.002>
- Ramos-Hernández, J., Ragazzo-Sánchez, J.A., Calderón-Santoyo, M., Ortiz-Basurto, R., Prieto, C. y Lagaron, J. 2018. Use of electrosprayed agave fructans as nanoencapsulating hydrocolloids for bioactives. *Nanomaterials*. 8(11): 868. <https://doi.org/10.3390/nano8110868>
- Rao, A., Zhang, Y., Muend, S. y Rao, R. 2010. Mechanism of antifungal activity of terpenoid phenols resembles calcium

- stress and inhibition of the TOR Pathway. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*. 54(12): 5062-5069. <https://doi.org/10.1128/AAC.01050-10>
- Ribeiro, A.M., Estevinho, B.N. y Rocha, F. 2019. Spray drying encapsulation of elderberry extract and evaluating the release and stability of phenolic compounds in encapsulated powders. *Food and Bioprocess Technology*. 12(8): 1381-1394. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02304-z>
- Rodríguez-Ramírez, J., Méndez-Lagunas, L., López-Ortiz, A. y Torres, S.S. 2012. True density and apparent density during the drying process for vegetables and fruits: A review. *Journal of Food Science*. 77(12): R146-R154. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02990.x>
- Romeo, F., Ballistreri, G., Fabroni, S., Pangallo, S., Nicosia, M., Schena, L. y Rapisarda, P. 2015. Chemical characterization of different sumac and pomegranate extracts effective against *Botrytis cinerea* rots. *Molecules*. 20(7): 11941-11958. <https://doi.org/10.3390/molecules200711941>
- Ruiz-Montañez, G., Calderón-Santoyo, M., Chevalier-Lucia, D., Picart-Palmade, L., Jiménez-Sánchez, D.E. y Ragazzo-Sánchez, J.A. 2019. Ultrasound-assisted microencapsulation of jackfruit extract in eco-friendly powder particles: Characterization and antiproliferative activity. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 40(10): 1507-1515. <https://doi.org/10.1080/01932691.2019.1566923>
- Rzokee, A.A. y Ahmad, A. 2014. Synthesis, spectroscopic studies and thermal analysis of charge-transfer complex of 2,2'-bipyridine with 4-hydroxybenzoic acid in different polar solvents. *Journal of Molecular Structure*. 1076: 453-460. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2014.08.002>
- Safeer-Abbas, M., Afzaal, M., Saeed, F., Asghar, A., Jianfeng, L., Ahmad, A., Ullah, Q., Elahi, S., Ateeq, H., Shah, Y.A., Nouman, M. y Shah, M.A. 2023. Probiotic viability as affected by encapsulation materials: Recent updates and perspectives. *International Journal of Food Properties*. 26(1): 1324-1350. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2213408>
- Santiago, R., Blanch, M., Vicente, C. y Legaz, M.E. 2010. *In vitro* effects of caffeic acid upon growth of the fungi *Sporisorium scitamineum*. *Journal of Plant Interactions*. 5(3): 233-240. <https://doi.org/10.1080/17429141003663860>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.133>
- Savjani, K.T., Gajjar, A.K. y Savjani, J.K. 2012. Drug solubility: Importance and enhancement techniques. *ISRN Pharmaceutics*. 2012: 1-10. <https://doi.org/10.5402/2012/195727>
- Shimanovich, U., Bernardes, G.J.L., Knowles, T.P.J. y Cavaco-Paulo, A. 2014. Protein micro- and nano-capsules for biomedical applications. *Chemical Society Reviews*. 43(5): 1361-1371. <https://doi.org/10.1039/C3CS60376H>
- Stanisavljević, N., Stanisavljević, S., Šavikin, K., Kalušević, Kalušević, A., Nedović, V., Nedović, N., Bigović, Bigović, D. y Janković, T.J. 2018. Application of gum arabic in the production of spray-dried chokeberry polyphenols, microparticles characterization and *in vitro* digestion method. *Lekovite Sirovine*. 38: 1-16. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1364/leksir1838009C>
- Taiwo, B.J., Miller, A.H., Fielding, A.J., Sarker, S.D., van Heerden, F.R. y Fatokun, A.A. 2024. Ceibinin, a new positional isomer of mangiferin from the inflorescence of *Ceiba pentandra* (Bombacaceae), elicits similar antioxidant effect but no anti-inflammatory potential compared to mangiferin. *Heliyon*. 10(1): e23335. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23335>
- Tao, T., Ding, Z., Hou, D., Prakash, S., Zhao, Y., Fan, Z., Zhang, D., Wang, Z., Liu, M. y Han, J. 2019. Influence of polysaccharide as co-encapsulant on powder characteristics, survival and viability of microencapsulated *Lactobacillus paracasei* Lpc-37 by spray drying. *Journal of Food Engineering*. 252: 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.02.009>
- Tomsone, L., Galoburda, R., Kruma, Z., Durrieu, V. y Cinkmanis, I. 2020. Microencapsulation of horseradish (*Armoracia rusticana* L.) juice using spray-drying. *Foods*. 9(9): 1332. <https://doi.org/10.3390/foods9091332>
- Tonon, R.V., Freitas, S.S. y Hubinger, M.D. 2011. Spray drying of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) juice: Effect of inlet air temperature and type of carrier agent. *Journal of Food Processing and Preservation*. 35(5): 691-700. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2011.00518.x>
- Wondraczek, H., Kotiaho, A., Fardim, P. y Heinze, T. 2011. Photoactive polysaccharides. *Carbohydrate Polymers*. 83(3): 1048-1061. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.10.014>
- Yazdi, A.P.G., Barzegar, M., Sahari, M.A. y Ahmadi-Gavlighi, H. 2021. Encapsulation of pistachio green hull phenolic compounds by spray drying. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 23(1): 51-64. <https://doi.org/20.1001.1.16807073.2021.23.1.18.1>
- Zhang, C., Khoo, S.L.A., Swedlund, P., Ogawa, Y., Shan, Y. y Quek, S.Y. 2020. Fabrication of spray-dried microcapsules containing noni juice using blends of maltodextrin and gum acacia: Physicochemical properties of powders and bioaccessibility of bioactives during *in vitro* digestion. *Foods*. 9(9): 1316. <https://doi.org/10.3390/foods9091316>
- Ziaee, A., Albadarin, A.B., Padrela, L., Femmer, T., O'Reilly, E. y Walker, G. 2019. Spray drying of pharmaceuticals and biopharmaceuticals: Critical parameters and experimental process optimization approaches. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. 127: 300-318. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2018.10.026>