



## MUCÍLAGO DE NOPAL (*Opuntia* spp.) Y SU APLICACIÓN COMO ADITIVO ALIMENTARIO: UNA VISIÓN GENERAL

## CACTUS PEAR (*Opuntia* spp.) MUCILAGE AND ITS APPLICATION AS FOOD ADDITIVE: AN OVERVIEW

Edén A. Luna-Zapién<sup>1</sup>, Jorge A. Zegbe<sup>2\*</sup>,  
Jorge Armando Meza-Velázquez<sup>3</sup> y Rafael Minjares-Fuentes<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zona Áridas, Bermejillo, Durango, México, <sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Zacatecas, Calera de Víctor Rosales, Zacatecas, México, <sup>3</sup>Universidad Juárez del Estado de Durango-Facultad de Ciencias Químicas, Gómez Palacio, Durango, México.

\*Autor de correspondencia (zegbe.jorge@inifap.gob.mx)

### RESUMEN

En los últimos años, el mucílago extraído de cladodios de diferentes especies de *Opuntia* ha recibido considerable atención por ser un material orgánico de fácil obtención y purificación para usarse en múltiples sectores industriales. Es un hidrocoloide natural soluble en agua y un compuesto prometedor como aditivo agroindustrial debido a que puede actuar como agente espesante, gelificante, estabilizante, antioxidante y como película de recubrimiento para frutas y verduras frescas o mínimamente procesadas. Actualmente, rendimientos altos de mucílago pueden ser extraídos con métodos más eficientes en términos de tiempo, energía y amigables con el medio ambiente. Por lo tanto, esta revisión destaca, no sólo la composición y métodos de extracción, sino también, enfatiza en las aplicaciones de este hidrocoloide como aditivo alimenticio.

**Palabras clave:** *Opuntia* spp., composición del mucílago, hidrocoloide, métodos de extracción.

### SUMMARY

In recent years, mucilage extracted from cladodes of different species of *Opuntia* has received considerable attention as an organic material that is easy to obtain and purify for use in multiple industrial sectors. It is a natural water-soluble hydrocolloid and a promising compound as an agroindustrial additive, because it can act as a thickening, gelling, stabilizer, antioxidant agent, and as a coating film for fresh or minimally processed fruits and vegetables. Currently, high mucilage yields can be extracted with more time-efficient, energy-efficient, and environmentally friendly methods. Therefore, this review highlights not only its composition and extraction methods, but also emphasizes the applications of this hydrocolloid as a food additive.

**Index words:** *Opuntia* spp., extraction methods, hydrocolloid, mucilage composition.

### INTRODUCCIÓN

El nopal (*Opuntia* spp.) es una planta de la familia Cactaceae, caracterizada por ser de un color verde, presencia de espinas y una estructura formada por cladodios. En el mundo existen más de 300 especies de

este género (Galicia-Villanueva *et al.*, 2017). Estas plantas presentan un sistema de fijación de CO<sub>2</sub> denominado metabolismo ácido de las crasuláceas (MAC), por el cual, la apertura estomática –y por tanto la fijación del carbono– es nocturna, cuando la temperatura del aire es menor y la humedad relativa mayor que en el día, lo que redundaría en mayor eficiencia en el uso del agua (Nobel y Bobich, 2002). Esto último, además de los cambios anatómicos y morfológicos, ha contribuido a la adaptación de estas plantas a condiciones de sequía en las regiones áridas y semiáridas de todo el mundo (Franco-Salazar y Véliz, 2008). Desde tiempos prehispánicos, varias especies del género *Opuntia* han sido consumidas por el ser humano como hortaliza, fruta, y otros usos como el terapéutico, nutracéutico, funcional e industrial (Méndez y García, 2006). En la actualidad, uno de los aspectos que más ha llamado la atención son los hidrocoloides, conocidos como mucílagos, que tienen notables aplicaciones industriales y funcionales como agentes espesantes, estabilizantes y emulsificantes (León-Martínez *et al.*, 2010; Medina-Torres *et al.*, 2000); además, a este compuesto se le atribuyen beneficios para la salud humana, tales como efecto antidiabético, antiinflamatorio y citoprotector en la mucosa gástrica (Galati *et al.*, 2007; Trombetta *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2008).

Por otra parte, se tiene evidencia de que el método y las condiciones de extracción influyen en la composición y en el rendimiento del mucílago (Monrroy *et al.*, 2017); así, alternativas que permiten una reducción en los costos de extracción del mucílago han sido investigadas (Sepúlveda *et al.*, 2007). Si bien, el mucílago de *Opuntia* ha sido recientemente revisado por su uso en la industria de alimentos mínimamente procesados (Gheribi y Khwaldia, 2019; Solano-Doblado *et al.*, 2018), esta revisión tuvo como objetivo enfatizar la composición y los métodos de

extracción, e indicar algunas de sus aplicaciones como aditivo alimentario.

### Composición del mucílago

El mucílago es un heteropolisacárido complejo de origen vegetal de alto peso molecular (Kalegowda *et al.*, 2017); por lo general, exhibe masas moleculares de entre  $2.3 \times 10^4$  y  $4.3 \times 10^6$  Da (Medina-Torres *et al.*, 2000). El mucílago de nopal se comporta como un polielectrolito de cadena larga debido a que posee grupos funcionales cargados negativamente en toda la molécula, los cuales se repelen, dando como resultado la viscosidad (Trachtenberg y Mayer, 1980).

Los polisacáridos mucilaginosos están compuestos principalmente por arabinosa (10.1-44.0 %), xilosa (5.1-22.1 %), galactosa (20.4-33.0 %), ácido galacturónico (0.18-18.5 %) y ramnosa (4.5-15.70 %) (Stintzing *et al.*, 2005). El mucílago presenta una cadena lineal principal con réplicas de ácido  $\beta$ -(1-4)-D-galacturónico y  $\alpha$ -(1-2)-L-ramnosa, unidas con cadenas laterales de oligosacáridos  $\beta$ -(1-6)-D-galactosa unida a O-(4) de L-ramnosa más residuos (Espino-Díaz *et al.*, 2010).

### Localización y función del mucílago en la planta

El mucílago se encuentra en las células mucilaginosas de raíces, cladodios, flores y frutos de las plantas del género *Opuntia*. El mayor número de células mucilaginosas se encuentra en los cladodios, específicamente en el parénquima o hidrénquima (almacén de agua) y menos en el clorénquima (tejido fotosintético) (Terrazas y Mauseth, 2002). En la célula, el mucílago se sintetiza en el aparato de Golgi (Trachtenberg y Mayer, 1980); es producido por los dictiosomas y se encuentra empaquetado en vesículas, que son transportadas fuera del protoplasto y depositadas fuera de la célula, donde las vesículas se fusionan con la membrana plasmática (secreción granulocrina). La célula de mucílago tiene una pared primaria única que se adelgaza y compacta para evitar que el material mucilaginoso se filtre hacia los espacios intercelulares. A medida que el mucílago se acumula en la célula, el protoplasto se contrae y colapsa; finalmente, todo el volumen celular es ocupado con el polímero (Mauseth, 2008).

El mucílago es sintetizado con fines de almacenamiento de agua mediante la secreción de polisacáridos en los espacios extracelulares (Archana *et al.*, 2013). El agua almacenada se utiliza durante episodios deficitarios de humedad en el suelo (Nobel y Bobich, 2002); también, el mucílago juega un papel importante en el mantenimiento del equilibrio iónico de las células vegetales, tolerancia a las heladas, transporte de agua, respuesta a las heridas

en el tejido vegetal, en la interacción planta-hospedero-patógeno y las reservas de carbohidratos (Bhurat *et al.*, 2011). Además de almacenar agua, el mucílago juega un papel importante en la dispersión de las semillas, éstas se adhieren al suelo, minimizando la remoción por el agua y los depredadores (Sun *et al.*, 2012). La hidratación de la semilla aumenta el contacto con el sustrato y, en algunas especies contribuye a la germinación, especialmente durante la sequía (Soukoulis *et al.*, 2018).

### Factores que afectan el rendimiento del mucílago

El rendimiento y la composición del mucílago pueden variar como respuesta a diversos factores, tales como la especie de *Opuntia*, edad del cladodio, temperatura del aire, tipo y pH del suelo donde las plantas se desarrollan (Ribeiro *et al.*, 2010; Saag *et al.*, 1975); por ejemplo, a medida que los cladodios maduran, el rendimiento del mucílago disminuye, ya que éste llega a formar parte de la fibra soluble; en contraste, cuando el cladodio madura, paralelamente disminuye la concentración de fibra soluble (Conteras-Padilla *et al.*, 2016). También, en algunas especies de *Opuntia*, el mucílago contenido en los cladodios aumentó en 24 % cuando la temperatura del aire pasó de 30/20 °C a 10/0 °C (ciclos diurno y nocturno, respectivamente) (Sáenz-Hernández *et al.*, 2002). Un comportamiento similar ha sido observado cuando las plantas son crecidas a ciclos diurnos y nocturnos de 25/15 °C, para después ser transferidas a ciclos de 5/5°C de temperaturas del aire por siete semanas (Sáenz-Hernández *et al.*, 2002).

Por otra parte, Goldstein y Nobel (1991) encontraron que el contenido de mucílago en los cladodios aumenta en respuesta a la sequía; esto puede ser atribuido a una reacción protectora de la misma planta a factores abióticos debido a un proceso de concentración de solutos, lo cual altera algunas propiedades químicas y físicas del mucílago, como la viscosidad. La viscosidad del mucílago de cladodios de nopal varía en función de la cantidad de agua que la planta recibe; así, Roberts (1945) observó que la viscosidad del mucílago contenido en los cladodios del nopal aumentó cuando las plantas fueron cultivadas en zonas con precipitación escasa. Esta propiedad física aumentó desde 70 hasta más de 500 centipoises (cP) por efecto del déficit hídrico en el suelo (Du Toit *et al.*, 2019).

### Métodos de extracción del mucílago

El mucílago es extraído comúnmente por maceración, seguido por procesos de filtración y precipitación en presencia de agua, siendo ésta el solvente más utilizado (Cuadro 1). Otros solventes como etanol, alcohol isopropílico y acetona, también han sido utilizados en la precipitación del mucílago (McGarvie y Parolis, 1979;

Medina-Torres *et al.*, 2000). Sepúlveda *et al.* (2007) obtuvieron rendimientos similares al usar etanol y alcohol isopropílico, por lo que recomendaron el uso de este último solvente debido al alto costo del etanol.

Un factor importante para optimizar la extracción de mucílago es la relación sólido-líquido. Una relación estrecha sólido-líquido conduce a obtener un bajo rendimiento de extracción de polisacáridos; por lo tanto, es imperativo conocer la proporción adecuada de materia prima y agua para extraer el mayor contenido de polisacáridos (Samavati, 2013); así, un aumento en la proporción de agua puede incrementar la difusividad del solvente en las células, mejorando la desorción de sus polisacáridos (Volpi, 2004). En otro estudio, diferentes proporciones de agua-materia prima fueron probadas hasta que el rendimiento del mucílago extraído se hizo constante (Bendahou *et al.*, 2007).

En la extracción del mucílago, los altos rendimientos de éste están asociados con la neutralización del pH de extracción; esto puede ser atribuido a la disociación inducida del grupo ácido (-COOH) de los polisacáridos y la repulsión entre cargas negativas (-OH). Este fenómeno también podría aumentar la solubilidad de los polisacáridos en agua y, en consecuencia, mejorar el rendimiento de mucílago (Liu y Fang, 2002). Por otro lado, el rendimiento de mucílago tiende a disminuir cuando la extracción se realiza a pH alcalino, ya que afecta la solubilidad de los polisacáridos (Yang *et al.*, 2015). Por su parte, Monrroy *et al.* (2017) indicaron que la temperatura de extracción no influyó en el rendimiento del mucílago, mientras que la hidratación, y por ende el rendimiento del mucílago, se incrementaron cuando las muestras de cladodios fueron troceadas en cubos.

### Extracción de mucílago por tecnologías emergentes

La extracción del mucílago ha cobrado importancia en la última década; por lo tanto, las tecnologías emergentes se consideran alternativas de extracción que pueden ayudar a desarrollar procedimientos industrialmente viables, a bajos costos operativos, que redunden en la producción de mucílagos de alta calidad (Farahnaky *et al.*, 2019); una de ellas es la extracción asistida de mucílago de *Opuntia* por microondas (Felkai-Haddache *et al.*, 2016; Han *et al.*, 2016); en particular, Thirugnanasambandham *et al.* (2015) informaron que un aumento en la potencia de microondas mejoró significativamente la solubilidad de la muestra en favor de una mayor eficiencia de extracción. Las microondas proporcionan una rápida transferencia de energía, tanto al disolvente como al tejido vegetal,

para lograr la disolución de los componentes a extraer, reflejándose en un incremento en el rendimiento de mucílago (Yan *et al.*, 2010). Por otra parte, la extracción de polisacáridos asistida por ultrasonido revela no sólo una mejora en la extracción de los compuestos, sino que también conserva la estructura y las propiedades moleculares del compuesto (Zhang *et al.*, 2007).

En este sentido, se ha documentado que el mucílago de la cáscara de tuna extraído por ultrasonido es menos aglomerado, con una matriz porosa y fibrillas más organizadas; esto último ha resultado en mayor capacidad de retención de agua que el extraído por métodos convencionales (Hernández-Carranza *et al.*, 2019); asimismo, Adjeroud-Abdellatif *et al.* (2020) obtuvieron mejores rendimientos de mucílago de *Opuntia* mediante extracción asistida por ultrasonido en comparación con la extracción convencional. El incremento en el rendimiento de mucílago mediante ultrasonido es atribuido principalmente al efecto de las cavitaciones acústicas producidas en el solvente por el paso de una onda de ultrasonido; esto último induce una alteración en la estructura de la pared celular que acelera la difusión del mucílago a través de las membranas celulares (Benito-Román *et al.*, 2013). También, Loretta *et al.* (2019) demostraron que la extracción de mucílago de cladodios por ultrasonido fue más efectiva, permitiendo así mayor recuperación del producto en menor tiempo, comparada con la extracción por microondas; sin embargo, el mucílago extraído por este último método exhibió pérdida de viscosidad, aunque con un mayor contenido de proteínas y ácidos urónicos en comparación con la extracción convencional o con ultrasonido.

### Mucílago como aditivo alimentario

Los polisacáridos mucilaginosos son utilizados ampliamente para gelificar, espesar o estabilizar productos alimenticios, pero además mejoran la textura y sus propiedades sensoriales (Li y Nie, 2016; Seisun y Zalesny, 2021). Los principales hidrocoloideos utilizados en la industria alimentaria son: agar, alginatos, goma acacia, carragenina, metilcelulosa, carboximetilcelulosa, hidroximetilcelulosa, goma gelana (utilizada como estabilizante, espesante y gelificante), goma guar o guaran (utilizada como fuente de fibra, espesante y gelificante), goma de algarrobo, pectina y almidones (Seisun y Zalesny, 2021). El mucílago de nopal ha sido estudiado ampliamente en las últimas décadas, y sus principales aplicaciones en productos alimenticios se enlistan en el Cuadro 2, mientras que los usos y propiedades del mucílago de nopal usado como aditivo alimentario se describen a continuación:

**Cuadro 1. Métodos de extracción, rendimiento y composición del mucílago de diferentes especies de *Opuntia*.**

Especie	Método de extracción	Rendimiento (%, base seca)	Composición	Referencia
<i>O. ficus-indica</i>	Maceración Centrifugación Decantación Precipitación con acetona (1:2) Lavado con isopropanol (1:1) Secado	-	Arabinosa (44.04 %) Galactosa (20.43 %) Xilosa (22.13 %) Ramnosa (7.92 %) Ácido galacturónico (6.38 %)	(Medina-Torres et al., 2000)
<i>O. tomentosa</i> (1) <i>O. atropes</i> (2) <i>O. hyptiacantha</i> (3) <i>O. joconostle</i> (4) <i>O. streptacantha</i> (5) <i>O. ficus-indica</i> (6)	Mezclado con etanol 50 % Maceración 22 °C Centrifugación Precipitación con etanol (1:4) Centrifugación Secado		Arabinosa: 30.50 % (1), 34.36 % (2), 32.82 % (3), 26.83 % (4), 30.43 % (5), 35.36 % (6) Galactosa: 21.59 % (1), 26.75 % (2), 30.83 % (3), 45.48 % (4), 31.83 % (5), 27.26 % (6) Xilosa: 16.02 % (1), 16.62 % (2), 17.05 % (3), 12.23 % (4), 14.04 % (5), 16.32 % (6) Glucosa: 16.21 % (1), 9.05 % (2), 6.03 % (3), 7.13 % (4), 11.81 % (5), 5.18 % (6) Ramnosa: 2.58 % (1), 1.44 % (2), 1.41 % (3), 4.09 % (4), 5.40 % (5), 1.93 % (6) Ácidos urónicos: 11.80 % (1), 11.76 % (2), 11.84 % (3), 5.59 % (4), 8.26 % (5), 13.91 % (6)	(Rodríguez-González et al., 2014)
<i>O. ficus-indica</i>	Mezclado y agitación en agua (25 °C) Agitación Centrifugación Precipitación con isopropanol (1:2) Lavado con etanol absoluto Secado 50 °C	10.24	-	(Bayar et al., 2016)
<i>O. ficus-indica</i>	Extracción asistida por microondas Enfriamiento del mucílago (4 °C) Filtración Precipitación con etanol (1:3) Lavado con etanol (75 %) Liofilización	25.60	-	(Felkai-Haddache et al., 2016)
<i>O. dillenii</i>	Mezclado y agitación en agua (45 °C) Filtración Concentración en rotaevaporador Precipitación con etanol (1:4) 95 % Lavado con etanol anhidro Purificación por diálisis Liofilización	6.20	Arabinosa (38.80 %) Galactosa (33.00 %) Xilosa (5.10 %) Ramnosa (15.70 %) Glucosa (5.10 %) Ácido urónico (2.50 %)	(Kalegowda et al., 2017)

Cuadro 1. Continúa.

Especie	Método de extracción	Rendimiento (% base seca)	Composición	Referencia
<i>O. spp.</i>	Homogenización en agua con licuadora (1:3) Centrifugación Filtración Precipitación con etanol (1:3) 95 % Lavado con etanol 95 % y con acetona Purificación por diálisis Liofilización	3.86	Arabinosa (10.1 %) Galactosa (25.6 %) Xilosa (8.4 %) Ramnosa (9.8 %) Ácido galacturónico (18.5 %) Glucosa (5.2 %) Manosa (12.1 %)	(Manhivi <i>et al.</i> , 2018)
<i>O. monacantha</i>	Mezclado y agitación en agua (80 °C) Filtración Centrifugación Precipitación con etanol (1:3) 95 % Enfriamiento a 4 °C Filtración a vacío Secado en horno (45 °C) Molienda y tamizaje	14	Arabinosa (11.60 %) Galactosa (20.84 %) Xilosa (6.64 %) Ramnosa (4.50 %) Ácido galacturónico (0.18 %) Glucosa (4.85 %) Ácido glucurónico (15.22 %)	(Dick <i>et al.</i> , 2019)
<i>O. ficus-indica</i>	Homogenización y agua con licuadora Refrigeración Filtración  Se evaluaron tres métodos de extracción: Filtrado simple (1): Filtración en papel filtro (3 veces)  Filtración y concentración (2): Filtración en papel filtro (3 veces) Concentración en rotaevaporador  Filtración, clarificación y concentración (3): Filtración en papel filtro (3 veces) Concentración en rotaevaporador Clarificación con carbón activado y filtración con diatomita. Secado por aspersion	1.17 0.72 0.40	Arabinosa: 12.54 % (1), 8.84 % (2), 9.09 % (3)  Fucosa (1.60 (1), 0.80 (2), 0.96 (3) %)  Galactosa: 8.89 % (1), 4.98 % (2), 4.20 % (3)  Ácido galacturónico: 13.27 % (1), 6.18 % (2), 7.08 % (3)  Glucosa (12.24 (1), 7.31 (2), 9.62 (3) %)  Manosa: 8.31 % (1), 4.05 % (2), 5.16 % (3)  Ramnosa: 20.26 % (1), 10.90 % (2), 10.93 % (3)  Xilosa: 6.85 % (1), 6.25 % (2), 6.21 % (3)	(Reyes-Ocampo <i>et al.</i> , 2019)

### Estabilizante

El objetivo de los estabilizantes es reducir la tensión interfacial para lograr una emulsión con estabilidad coloidal mejorada. Los emulsificantes absorben rápidamente la interfase agua-aceite y permiten la estabilización a corto plazo, también evitan la precipitación de partículas dispersas y proporcionan una barrera contra la coalescencia de las gotas de aceite (Manzoor *et al.*, 2020); por ejemplo, Iturriaga *et al.* (2007) evaluaron la estabilidad a la coalescencia en emulsiones preparadas con mucílago y las compararon

con emulsiones de hidrocoloides comerciales. El mucílago de nopal y la goma xantana mantuvieron la estabilidad de la emulsión al 100 %; además, Quinzio *et al.* (2018) mostraron que las emulsiones adicionadas con mucílago tuvieron una distribución de tamaño de partícula, diámetro de gota, comportamiento viscoelástico y una estabilidad a la emulsión similar a las emulsiones preparadas con goma guar; así, el mucílago ha sido agregado exitosamente a diversos productos alimenticios como estabilizante y sustituto de grasa (Bernardino-Nicanor *et al.*, 2015; Du Toit *et al.*, 2016; 2017).

**Cuadro 2. Uso del mucílago de diferentes especies de *Opuntia* como aditivo alimentario.**

Uso	Especie	Producto adicionado	Resultados principales	Referencia
Estabilizante	<i>O. robusta</i>	Mayonesa	La adición de mucílago a la formulación logró un producto similar a la mayonesa, con características similares al producto comercial.	(Bernardino-Nicanor <i>et al.</i> , 2015)
	<i>O. ficus-indica</i>	Malvaviscos	Sustitución de gelatina por mucílago. Buenas características de consistencia, textura y suavidad del gel fueron alcanzadas.	(Du Toit <i>et al.</i> , 2016)
	<i>O. ficus-indica</i>	Huevo deshidratado	El polvo de huevo deshidratado por aspersion en solución de mucílago mostró estabilidad térmica y mecánica, y morfología uniforme y definida	(Medina-Torres <i>et al.</i> , 2017)
	<i>O. robusta</i>	Mayonesa	El mucílago se aplicó con éxito en productos de mayonesa para reemplazar hasta un 50 % la yema de huevo y 30 % del aceite. Aceptación sensorial favorable	(Du Toit <i>et al.</i> , 2019)
Material de encapsulación	<i>O. monacantha</i>	Zeaxantina de Goji berry	El mucílago conservó el contenido de zeaxantina durante el período de almacenamiento.	(De Campo <i>et al.</i> , 2018)
	<i>O. ficus-indica</i>	Antocianinas de berenjena	La relación entre porcentaje de eliminación de radicales y concentración de antocianinas se conservó en un 64 % en las muestras tratadas con mucílago y secadas por aspersion.	(Chávez-Gutiérrez <i>et al.</i> , 2018)
	<i>O. ficus-indica</i>	Pulpa de tuna amarilla-naranja	Las micropartículas de pulpa de tuna de color amarillo anaranjado, con una mezcla de mucílago y maltodextrina, mantuvieron su color después de 28 días en almacenamiento.	(Carmona <i>et al.</i> , 2021)
	<i>O. ficus-indica</i>	Betalainas de los frutos <i>Escontria chiotilla</i> y <i>Stenocereus queretaroensis</i>	Microcápsulas de mucílago suaves y esféricas fueron obtenidas, logrando la retención de betalainas en más de 90 % después de tres meses de almacenamiento.	(Soto-Castro <i>et al.</i> , 2019)
Nutracéutico	<i>O. monacantha</i>	Galleta libre de gluten tipo cracker	La adición de mucílago a las galletas mejoró el contenido fenólico total y la actividad antioxidante. Obtuvo la mayor aceptación por parte del consumidor.	(Dick <i>et al.</i> , 2020)
	<i>O. ficus-indica</i>	Pan	La adición de mucílago mejoró la concentración de compuestos bioactivos en el pan.	(Liguori <i>et al.</i> , 2020)

**Cuadro 2. Continúa.**

Uso	Especie	Producto adicionado	Resultados principales	Referencia
Material de recubrimiento	<i>O. ficus-indica</i>	Nopal verdura	Disminuyó la tasa de respiración	(González-González, 2011)
	<i>O. ficus-indica</i>	Guayaba	Conservación del color, firmeza y sólidos solubles.	(Zegbe <i>et al.</i> , 2013)
	<i>O. ficus-indica</i>	Manzana mínimamente procesada	Disminución en la tasa de respiración Disminución en la actividad de pectin metil esterasa y polifenol oxidasa Se mantuvo la firmeza	(Zambrano-Zaragoza <i>et al.</i> , 2014)
	<i>O. ficus-indica</i>	Higo	El peso fresco, la firmeza, el contenido de carotenoides y las características sensoriales fueron mantenidas.	(Allegra <i>et al.</i> , 2017)
	<i>O. heliabravoana</i>	Moras	Disminuyó la carga microbiana	(Nájera-García <i>et al.</i> , 2018)
	<i>O. ficus-indica</i>	Tomate	Efecto antifúngico contra <i>Rhizopus stolonifer</i> El fruto aumentó su vida útil.	(Olicón-Hernández <i>et al.</i> , 2019)
Otros usos	<i>O. ficus-indica</i> <i>O. atropes</i>	Leche cruda	Los recuentos bacterianos de mesófilos aeróbicos y coliformes totales fueron reducidos.	(Ortiz-Rodríguez <i>et al.</i> , 2016)
	<i>O. ficus-indica</i> <i>O. megacantha</i>	Sopa de elote tipo crema	Igualeó características físicas, como pH, color y viscosidad de la sopa espesada con almidón comercial.	(Reyes-Buendía <i>et al.</i> , 2020)

### Material de encapsulación

La microencapsulación es el proceso en que gotas de líquido, partículas sólidas o compuestos gaseosos quedan atrapados en películas delgadas con una matriz, sea homogénea o heterogénea. El objetivo de esta alternativa es proteger estos compuestos de factores externos (e.g. temperatura del aire, pH, humedad) para mantener la estabilidad y viabilidad de los compuestos encapsulados. Los lípidos, proteínas y polisacáridos son los materiales mayormente utilizados como encapsulantes (Hernández-Torres *et al.*, 2016).

Diversos estudios han mencionado el uso de mucílago de nopal como material encapsulante de diferentes agentes bioactivos (Cortés-Camargo *et al.*, 2017; Medina-Torres *et al.*, 2013; Otálora *et al.*, 2015), se ha indicado que con la adición del mucílago al ácido gálico, betalainas y aceites esenciales los agentes bioactivos tuvieron mayor estabilidad y mantuvieron su morfometría (esfericidad y uniformidad de tamaño).

### Nutracéutico

Los nutraceuticos son compuestos que proporcionan beneficios para la salud de los consumidores, presentan numerosas propiedades terapéuticas como antidiabéticos, antihipertensivos e hipocolesterolémicos, antioxidantes, antimicrobianos, y muchos más que son atribuidos principalmente a la composición química del mucílago.

Estudios tanto *in vitro* como *in vivo* han informado de la actividad biológica de algunos hidrocoloides (Manzoor *et al.*, 2020); por ejemplo, Guevara-Arauz *et al.* (2012) evaluaron el efecto prebiótico del mucílago de *O. ficus-indica* y encontraron que el tratamiento con mucílago mejoró el crecimiento de lactobacilos, mientras que el recuento de enterococos, enterobacterias, estafilococos y clostridios disminuyó; al mismo tiempo, el tratamiento con mucílago al colon humano mejoró la síntesis de ácidos grasos (propiónico y butanoico); así, los autores concluyeron que el mucílago podría utilizarse como prebiótico.

Cruz-Rubio *et al.* (2021) analizaron el mucílago de *O. ficus-indica* y *O. joconostle* (xoconostle) y encontraron que estos mucílagos están compuestos por un conjunto de supramoleculares formados por polisacáridos neutros y ácidos con estructura compleja, conjugadas y no covalentes; además, demostraron que estas moléculas, permiten la inclusión de mono, di y oligosacáridos, los cuales podrían coadyuvar al desarrollo de nuevos productos para la estimulación de microorganismos específicos en la microbiota intestinal. Un ejemplo es la industria de la panificación, donde el mucílago de nopal ha sido adicionado exitosamente como compuesto funcional (Dick *et al.*, 2020; Liguori *et al.*, 2020).

### Material de recubrimiento

Los recubrimientos naturales y comestibles aumentan la vida útil de los productos frescos o de aquellos mínimamente procesados, pero además mantienen, hasta cierto punto, las características sensoriales y organolépticas de estos productos durante un periodo en almacenamiento. El mucílago de nopal ha sido utilizado también con éxito como material de recubrimiento en diversos productos alimenticios. Estos recubrimientos han logrado disminuir la tasa de transpiración, respiración, actividad enzimática y la carga microbiana en favor del mantenimiento de la firmeza, color, compuestos bioactivos y características sensoriales en frutas y verduras (Allegra *et al.*, 2017; González-González, 2011; Nájera-García *et al.*, 2018; Zambrano-Zaragoza *et al.*, 2014; Zegbe *et al.*, 2013).

### CONCLUSIONES, PERSPECTIVAS Y TENDENCIAS DE USO DEL MUCÍLAGO

El mucílago que abunda en los cladodios del nopal solía considerarse como desecho orgánico; sin embargo, éste ha sido convertido en un material novedoso debido a sus propiedades hidrocoloidales y a su mayor contenido en nutrientes con útiles propiedades funcionales. El mucílago ha sido utilizado con éxito como aditivo en la industria alimentaria, como emulsionante, estabilizador, espesante, formador de gel, material de encapsulación de diversos compuestos bioactivos y material de recubrimiento para hortalizas, así como inhibidor de pardeamiento enzimático y agente antimicrobiano. El mucílago de *Opuntia* es reconocido por sus propiedades benéficas como antiulceroso, antiinflamatorio y citoprotector en productos farmacéuticos; además, el mucílago es un material vegetal amigable con el medio ambiente y biodegradable. Así, la demanda de mucílagos podría reorientar el cultivo comercial de nopal hacia una alternativa de doble propósito, como producto fresco y para uso agroindustrial en regiones áridas y semiáridas con limitaciones de agua para las actividades agropecuarias. Se pronostica que

para la próxima década el mercado del mucílago sea diversificado hacia una amplia gama de aplicaciones industriales, aprovechando la amplia base genética de *Opuntia*, condiciones de desarrollo, estado fenológico y manejo agronómico que influyen en el rendimiento, composición, características fisicoquímicas y funcionales del mucílago.

### AGRADECIMIENTO

El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología financió, en parte, esta investigación a través de la beca doctoral a Edén Arellano Luna Zapién (No. Mat. 78384). El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias financió la investigación doctoral a través del proyecto SIGI: 1-1.6-8403134459-A-M.2-2 otorgado al Dr. Jorge A. Zegbe. También se agradece al Editor y los dos Revisores, quienes mejoraron la presentación de este documento.

### BIBLIOGRAFÍA

- Adjeroud-Abdellatif N., Y. Hammoui, A. Boudria, S. Agab, F. Choulak, J. P. Leclerc, ... and K. Madani (2020) Effect of a natural coagulant extract from *Opuntia ficus-indica* cladode on electrocoagulation-electroflotation water treatment process. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 102:5822-5846, <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1804889>
- Allegra A., G. Sortino, P. Inglese, L. Settanni, A. Todaro and A. Gallotta (2017) The effectiveness of *Opuntia ficus-indica* mucilage edible coating on post-harvest maintenance of 'Dottato' fig (*Ficus carica* L.) fruit. *Food Packaging and Shelf Life* 12:135-141, <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2017.04.010>
- Aquino L. V., J. Rodríguez, L. L. Méndez y K. F. Torres (2009) Inhibición del oscurecimiento con mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) en el secado de plátano Roatán. *Información Tecnológica* 20:15-20, <https://doi.org/10.4067/S0718-07642009000400003>
- Archana G., K. Sabina, S. Babuskin, K. Radhakrishnan, M. A. Fayidh, P. A. S. Babu, ... and M. Sukumar (2013) Preparation and characterization of mucilage polysaccharide for biomedical applications. *Carbohydrate Polymers* 98:89-94, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.04.062>
- Bayar N., M. Kriaa and R. Kammoun (2016) Extraction and characterization of three polysaccharides extracted from *Opuntia ficus indica* cladodes. *International Journal of Biological Macromolecules* 92:441-450, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.07.042>
- Bendahou A., A. Dufresne, H. Kaddami and Y. Habibi (2007) Isolation and structural characterization of hemicelluloses from palm of *Phoenix dactylifera* L. *Carbohydrate Polymers* 68:601-608, <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2006.10.016>
- Benito-Román Ó., E. Alonso and M. J. Cocero (2013) Ultrasound-assisted extraction of  $\beta$ -glucans from barley. *LWT - Food Science and Technology* 50:57-63, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.07.006>
- Bernardino-Nicanor A., E. N. Hinojosa-Hernández, J. M. S. Juárez-Goiz, J. L. Montañez-Soto, M. E. Ramírez-Ortiz and L. González-Cruz (2015) Quality of *Opuntia robusta* and its use in development of mayonnaise-like product. *Journal of Food Science and Technology* 52:343-350, <https://doi.org/10.1007/s13197-013-0989-8>
- Bhurat M. R., P. S. Kawatikwar, R. S. Sanghavi, A. R. Umkar and P. A. Salunkhe (2011) Isolation and characterization of *Remusatia vivipara* tubers mucilage. *International Journal of Pharmacy and Biological Sciences* 1:457-461.
- Carmona J. C., P. Robert, C. Vergara and C. Sáenz (2021) Microparticles of yellow-orange cactus pear pulp (*Opuntia ficus-indica*) with cladode mucilage and maltodextrin as a food coloring in yogurt.



- LWT – *Food Science and Technology* 138:110672, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110672>
- Chávez-Gutiérrez M., R. G. Utrilla-Coello and D. Soto-Castro (2018) Effect of *Opuntia ficus indica* mucilage in the ecological extraction, drying, and storage of eggplant anthocyanins. *Journal of Food Processing and Preservation* 42:e13439, <https://doi.org/10.1111/jfpp.13439>
- Contreras-Padilla M., M. E. Rodríguez-García, E. Gutiérrez-Cortez, M. C. Valderrama-Bravo, J. I. Rojas-Molina and E. M. Rivera-Muñoz (2016) Physicochemical and rheological characterization of *Opuntia ficus* mucilage at three different maturity stages of cladode. *European Polymer Journal* 78:226-234, <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.03.024>
- Cortés-Camargo S., J. Cruz-Olivares, B. E. Barragán-Huerta, O. Dublán-García, A. Román-Guerrero and C. Pérez-Alonso (2017) Microencapsulation by spray drying of lemon essential oil: evaluation of mixtures of mesquite gum–nopal mucilage as new wall materials. *Journal of Microencapsulation* 34:395-407, <https://doi.org/10.1080/02652048.2017.1338772>
- Cruz-Rubio J. M., M. Mueller, H. Viernstein, R. Loeppert and W. Praznik (2021) Prebiotic potential and chemical characterization of the poly and oligosaccharides present in the mucilage of *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia joconostle*. *Food Chemistry* 362:130167, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130167>
- De Campo C., M. Dick, P. P. dos Santos, T. M. H. Costa, K. Paese, S. S. Guterres, ... and S. H. Flôres (2018) Zeaxanthin nanoencapsulation with *Opuntia monacantha* mucilage as structuring material: characterization and stability evaluation under different temperatures. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 558:410-421, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.09.009>
- Dick M., L. Dal Magro, R. C. Rodrigues, A. O. Rios and S. H. Flôres (2019) Valorization of *Opuntia monacantha* (Willd.) Haw. cladodes to obtain a mucilage with hydrocolloid features: physicochemical and functional performance. *International Journal of Biological Macromolecules* 123:900-909, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.126>
- Dick M., C. Limberger, R. C. S. Thys, A. O. Rios and S. H. Flôres (2020) Mucilage and cladode flour from cactus (*Opuntia monacantha*) as alternative ingredients in gluten-free crackers. *Food Chemistry* 314:126178, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126178>
- Du Toit A., M. De Wit, H. J. Fouché, M. Taljaard, S. L. Venter and A. Hugo (2019) Mucilage powder from cactus pears as functional ingredient: influence of cultivar and harvest month on the physicochemical and technological properties. *Journal of Food Science and Technology* 56:2404-2416, <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03706-9>
- Du Toit A., M. De Wit, S. Naudé, M. Taljaard, H. J. Fouché, A. Hugo and S. L. Venter (2017) Functional properties and sensory evaluation of mucilage from South-African cactus pear cladodes. *Acta Horticulturae* 1247:251-260, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1247.34>
- Du Toit L., C. Bothma, M. De Wit and A. Hugo (2016) Replacement of gelatin with liquid *Opuntia ficus-indica* mucilage in marshmallows. Part 1: physical parameters. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 18:25-39, <https://doi.org/10.56890/jpacd.v18i.51>
- Du Toit A., M. De Wit, H. J. Fouché, M. Taljaard, S. L. Venter and A. Hugo (2019) Mucilage powder from cactus pears as functional ingredient: influence of cultivar and harvest month on the physicochemical and technological properties. *Journal of Food Science and Technology* 56:2404-2416, <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03706-9>
- Espino-Díaz M., J. J. Ornelas-Paz, M. A. Martínez-Téllez, C. Santillán, G. V. Barbosa-Cánovas, P. B. Zamudio-Flores and G. I. Olivas (2010) Development and characterization of edible films based on mucilage of *Opuntia ficus indica* (L.). *Journal of Food Science* 75:E347-E352, <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01661.x>
- Farahnaky A., M. Majzoubi and S. Bakhshizadeh-Shirazi (2019) Emerging technologies for isolation of natural hydrocolloids from mucilaginous seeds. In: *Emerging Natural Hydrocolloids: Rheology and Functions*. S. M. A. Razavi (ed.). John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey. USA. pp:451-472, <https://doi.org/10.1002/9781119418511.ch18>
- Felkai-Haddache L., F. Dahmoune, H. Remini, K. Lefsih, L. Mouni and K. Madani (2016) Microwave optimization of mucilage extraction from *Opuntia ficus indica* cladodes. *International Journal of Biological Macromolecules* 84:24-30, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.11.090>
- Franco-Salazar V. A. y J. A. Véliz (2008) Efectos de la salinidad sobre el crecimiento, acidez titulable y concentración de clorofila en *Opuntia ficus-indica* (L.) MILL. SABER. *Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente* 20:12-17.
- Galati E. M., T. Monforte, N. Miceli, M. R. Mondello, M. F. Taviano, M. Galluzzo and M. M. Tripodo (2007) *Opuntia ficus indica* (L.) Mill. mucilages show cytoprotective effect on gastric mucosa in rat. *Phytotherapy Research* 21:344-346, <https://doi.org/10.1002/ptr.2075>
- Galicía-Villanueva S., P. E. Escamilla-García, H. Alvarado-Raya, L. V. Aquino-González, H. Serna-Álvarez y L. M. Hernández-Cruz (2017) Plantación experimental de nopal para evaluación de sistemas de fertilización y extracción de mucilago. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8:1087-1099, <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i5.110>
- Gheribi R. and K. Khwaldia (2019) Cactus mucilage for food packaging applications. *Coatings* 9:655, <https://doi.org/10.3390/coatings9100655>
- Goldstein G. and P. S. Nobel (1991) Changes in osmotic pressure and mucilage during low-temperature acclimation of *Opuntia ficus-indica*. *Plant Physiology* 97:954-961, <https://doi.org/10.1104/pp.97.3.954>
- González-González L. R. (2011) Desarrollo y evaluación de una película comestible obtenida del mucilago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) utilizada para reducir la tasa de respiración de nopal verdura. *Investigación Universitaria Multidisciplinaria* 10:131-138.
- Guevara-Arauz J. C., J. J. Ornelas-Paz, D. J. Pimentel-González, S. Rosales M., R. E. Soria G. and L. M. T. Paz M. (2012) Prebiotic effect of mucilage and pectic-derived oligosaccharides from nopal (*Opuntia ficus-indica*). *Food Science Biotechnology* 21:997-1003, <https://doi.org/10.1007/s10068-012-0130-1>
- Han Y. L., J. Gao, Y. Y. Yin, Z. Y. Jin, X. M. Xu and H. Q. Chen (2016) Extraction optimization by response surface methodology of mucilage polysaccharide from the peel of *Opuntia dillenii* Haw. fruits and their physicochemical properties. *Carbohydrate Polymers* 151:381-391, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.05.085>
- Hernández-Carranza P., M. Rivadeneyra-Mata, M. E. Ramos-Cassellis, X. Aparicio-Fernández, A. R. Navarro-Cruz, R. Ávila-Sosa and C. E. Ochoa-Velasco (2019) Characterization of red prickly pear peel (*Opuntia ficus-indica* L.) and its mucilage obtained by traditional and novel methodologies. *Journal of Food Measurement and Characterization* 13:1111-1119, <https://doi.org/10.1007/s11694-018-00026-y>
- Hernández-Torres C. J., A. Iliana, J. M. Ventura-Sobrevilla, R. E. Belmares-Cerda, J. C. Contreras-Esquivel, G. M. Álvarez y J. L. Martínez-Hernández (2016) La microencapsulación de bioactivos para su aplicación en la industria. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar* 50:12-19.
- Iturriaga L., C. Quinzio, M. Corvalan and B. Mishima (2007) Study of the stability at coalescence in mucilage emulsions. *Acta Horticulturae* 811:427-430, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.811.59>
- Kalegowda P., A. S. Chauhan and S. M. N. Urs (2017) *Opuntia dillenii* (Ker-Gawl) Haw cladode mucilage: physico-chemical, rheological and functional behavior. *Carbohydrate Polymers* 157:1057-1064, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.10.070>
- León-Martínez F. M., L. L. Méndez-Lagunas and J. Rodríguez-Ramírez (2010) Spray drying of nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*): effects on powder properties and characterization. *Carbohydrate Polymers* 81:864-870, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.03.061>
- Li J. M. and S. P. Nie (2016) The functional and nutritional aspects of hydrocolloids in foods. *Food Hydrocolloids* 53:46-61, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.01.035>
- Liguori G., C. Gentile, R. Gaglio, A. Perrone, R. Guarcello, N. Francesca, ... and L. Settanni (2020) Effect of addition of *Opuntia ficus-indica*

- mucilage on the biological leavening, physical, nutritional, antioxidant and sensory aspects of bread. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 129:184-191, <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2019.08.009>
- Liu H. and H. H. P. Fang (2002) Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges. *Journal of Biotechnology* 95:249-256, [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(02\)00025-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(02)00025-1)
- Loretta B., M. Oliviero, M. Vittorio, E. Bojórquez-Quintal, P. Franca, P. Silvia and Z. Fabio (2019) Quality by design approach to optimize cladodes soluble fiber processing extraction in *Opuntia ficus indica* (L.) Miller. *Journal of Food Science and Technology* 56:3627-3634, <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03794-7>
- Manhivi V. E., S. Venter, E. O. Amonsou and T. Kudanga (2018) Composition, thermal and rheological properties of polysaccharides from amadumbe (*Colocasia esculenta*) and cactus (*Opuntia* spp.). *Carbohydrate Polymers* 195:163-169, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.062>
- Manzoor M., J. Singh, J. D. Bandral, A. Gani and R. Shams (2020) Food hydrocolloids: functional, nutraceutical and novel applications for delivery of bioactive compounds. *International Journal of Biological Macromolecules* 165:554-567, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.182>
- Mauseth J. D. (2008) Plant Anatomy. Blackburn Press. West Caldwell, New Jersey, USA. 576 p.
- McGarvie D. and H. Parolis (1979) The mucilage of *Opuntia ficus-indica*. *Carbohydrate Research* 69:171-179, [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(00\)85762-6](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(00)85762-6)
- Medina-Torres L., E. Brito-De La Fuente, B. Torrestiana-Sanchez and R. Kattain (2000) Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*). *Food Hydrocolloids* 14:417-424, [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(00\)00015-1](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(00)00015-1)
- Medina-Torres L., E. E. García-Cruz, F. Calderas, R. F. González L., G. Sánchez-Olivares, J. A. Gallegos-Infante, ... and J. Rodríguez-Ramírez (2013) Microencapsulation by spray drying of gallic acid with nopal mucilage (*Opuntia ficus indica*). *LWT - Food Science and Technology* 50:642-650, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.07.038>
- Medina-Torres L., F. Calderas, D. N. Ramírez, E. Herrera-Valencia, M. B. Bernad and O. Manero (2017) Spray drying egg using either maltodextrin or nopal mucilage as stabilizer agents. *Journal of Food Science and Technology* 54:4427-4435, <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2919-7>
- Méndez G. S. J. y J. García H. (1870) La tuna: producción y diversidad. *Biodiversistas* 68:2-5.
- Monrroy M., E. García, K. Ríos and J. R. García (2017) Extraction and physicochemical characterization of mucilage from *Opuntia cochenillifera* (L.) Miller. *Journal of Chemistry* 2017:4301901, <https://doi.org/10.1155/2017/4301901>
- Nájera-García A. I., R. E. López-Hernández, C. A. Lucho-Constantino and G. A. Vázquez-Rodríguez (2018) Towards drylands biorefineries: valorisation of forage *Opuntia* for the production of edible coatings. *Sustainability* 10:1878, <https://doi.org/10.3390/su10061878>
- Nobel P. S. and E. G. Bobich (2002) Initial net CO<sub>2</sub> uptake responses and root growth for a CAM community placed in a closed environment. *Annals of Botany* 90:593-598, <https://doi.org/10.1093/aob/mcf229>
- Olicón-Hernández D. R., Á. Acosta-Sánchez, R. Monterrubio-López and G. Guerra-Sánchez (2019) Chitosan and *Opuntia ficus-indica* mucilage as the base of a polymeric edible film for the protection of tomatoes against *Rhizopus stolonifer*. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 22:1-9, <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2019.0.194>
- Ortiz-Rodríguez R., J. L. Aguilar-Barrera, J. J. Valdez-Alarcón, D. Val-Arreola, J. Esquivel-Córdoba, H. E. Martínez-Flores and R. E. Pérez-Sánchez (2016) Effect of adding mucilage from *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia atropes* to raw milk on mesophilic aerobic bacteria and total coliforms. *Nova Scientia* 8:106-122, <https://doi.org/10.21640/ns.v8i16.384>
- Otálora M. C., J. G. Carriazo, L. Iturriaga, M. A. Nazareno and C. Osorio (2015) Microencapsulation of betalains obtained from cactus fruit (*Opuntia ficus-indica*) by spray drying using cactus cladode mucilage and maltodextrin as encapsulating agents. *Food Chemistry* 187:174-181, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.090>
- Quinzio C., C. Ayunta, B. López de Mishima and L. Iturriaga (2018) Stability and rheology properties of oil-in-water emulsions prepared with mucilage extracted from *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. *Food Hydrocolloids* 84:154-165, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.06.002>
- Reyes-Buendía C., J. J. E. Corrales-García, C. B. Peña-Valdivia, A. Hernández Montes y M. C. Ybarra-Moncada (2020) Sopa de elote (*Zea mays*) tipo crema con mucilago de nopal (*Opuntia* spp.) como espesante, sus características físicas y aceptación sensorial. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 23:1-14, <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.257>
- Reyes-Ocampo I., M. S. Córdova-Aguilar, G. Guzmán, A. Blancas-Cabrera and G. Ascanio (2019) Solvent free mechanical extraction of *Opuntia ficus indica* mucilage. *Journal of Food Process Engineering* 42:e12954, <https://doi.org/10.1111/jfpe.12954>
- Ribeiro E. M. O., N. H. da Silva, J. L. L. Filho, J. Z. de Brito and M. P. C. da Silva (2010) Study of carbohydrates present in the cladodes of *Opuntia ficus-indica* (fodder palm), according to age and season. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* 30:933-939, <https://doi.org/10.1590/S0101-20612010000400015>
- Roberts P. B. (1945) Resilient plastic material and process for making it. US Patent 2,386, 264. United States Patents Office. Alexandria, Virginia, USA. <https://www.freepatentsonline.com/2386264.pdf> (February 2023).
- Rodríguez-González S., H. E. Martínez-Flores, C. K. Chávez-Moreno, L. I. Macías-Rodríguez, E. Zavala-Mendoza, M. G. Garnica-Romo and L. Chacón-García (2014) Extraction and characterization of mucilage from wild species of *Opuntia*. *Journal of Food Process Engineering* 37:285-292, <https://doi.org/10.1111/jfpe.12084>
- Saag L. M. K., G. R. Sanderson, P. Moyna and G. Ramos (1975) Cactaceae mucilage composition. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 26:993-1000, <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740260716>
- Sáenz-Hernández C., J. Corrales-García y G. Aquino-Pérez (2002) Nopalitos, mucilage, fiber, and cochineal. In: *Cacti: Biology and Uses*. P. Nobel (ed.). University of California Press. Oakland, California, USA. pp:211-234, <https://doi.org/10.1525/california/9780520231573.003.0013>
- Samavati V. (2013) Polysaccharide extraction from *Abelmoschus esculentus*: optimization by response surface methodology. *Carbohydrate Polymers* 95:588-597, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.02.041>
- Seisun D. and N. Zalesny (2021) Strides in food texture and hydrocolloids. *Food Hydrocolloids* 117:106575, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106575>
- Sepúlveda E., C. Sáenz, E. Aliaga and C. Aceituno (2007) Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of Arid Environments* 68:534-545, <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.08.001>
- Solano-Doblado L. G., L. Alamilla-Beltrán, y C. Jiménez-Martínez (2018) Películas y recubrimientos comestibles funcionalizados. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 21(Supl. 2):30-42, <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2018.0.153>
- Soto-Castro D., G. M. Chávez, M. León-Martínez Frank, S. G. P. Araceli, A. L. Irais and A. A. Franco (2019) Spray drying microencapsulation of betalain rich extracts from *Escontria chiotilla* and *Stenocereus queretaroensis* fruits using cactus mucilage. *Food Chemistry* 272:715-722, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.069>
- Soukoulis C., C. Gaiani and L. Hoffmann (2018) Plant seed mucilage as emerging biopolymer in food industry applications. *Current Opinion in Food Science* 22:28-42, <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.01.004>
- Stintzing F. C., K. M. Herbach, M. R. Mosshammer, R. Carle, W. Yi, S. Sellappan, ... and P. Felker (2005) Color, betalain pattern, and antioxidant properties of cactus pear (*Opuntia* spp.) clones. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53:442-451, <https://doi.org/10.1021/jf048751y>
- Sun Y., D. Y. Tan, C. C. Baskin and J. M. Baskin (2012) Role of mucilage in seed dispersal and germination of the annual ephemeral *Alyssum minus* (Brassicaceae). *Australian Journal of Botany* 60:439-449, <https://doi.org/10.1071/BT11314>
- Terrazas T. and J. Mauseth (2002) Shoot anatomy and morphology. In: *Cacti Biology and Uses*. P. S. Nobel (ed.). University of California

- Press. Berkeley, California, USA. pp:23-29.
- Thirugnanasambandham K., V. Sivakumar and J. P. Maran (2015)** Microwave-assisted extraction of polysaccharides from mulberry leaves. *International Journal of Biological Macromolecules* 72:1-5, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.07.031>
- Trachtenberg S. and A. M. Mayer (1980)** Biophysical properties of *Opuntia ficus-indica* mucilage. *Phytochemistry* 21:2835-2843, [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(80\)85052-7](https://doi.org/10.1016/0031-9422(80)85052-7)
- Trombetta D., C. Puglia, D. Perri, A. Licata, S. Pergolizzi, E. R. Lauriano, A... and F. P. Bonina (2006)** Effect of polysaccharides from *Opuntia ficus-indica* (L.) cladodes on the healing of dermal wounds in the rat. *Phytomedicine* 13:352-358, <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2005.06.006>
- Volpi N. (2004)** Application of high-performance capillary electrophoresis to the purification process of *Escherichia coli* K4 polysaccharide. *Journal of Chromatography B* 811:253-256, <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2004.09.004>
- Yan M.-M., W. Liu, Y.-J. Fu, Y.-G. Zu, C.-Y. Chen and M. Luo (2010)** Optimisation of the microwave-assisted extraction process for four main astragalosides in Radix Astragali. *Food Chemistry* 119:1663-1670, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.09.021>
- Yang N., M. Zhao, B. Zhu, B. Yang, C. Chen, C. Cui and Y. Jiang (2008)** Anti-diabetic effects of polysaccharides from *Opuntia monacantha* cladode in normal and streptozotocin-induced diabetic rats. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 9:570-574, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.12.003>
- Yang W., Y. Wang, X. Li and P. Yu (2015)** Purification and structural characterization of Chinese yam polysaccharide and its activities. *Carbohydrate Polymers* 117:1021-1027, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.09.082>
- Zambrano-Zaragoza M. L., E. Gutiérrez-Cortez, A. Del Real, R. M. González-Reza, M. J. Galindo-Pérez and D. Quintanar-Guerrero (2014)** Fresh-cut Red Delicious apples coating using tocopherol/mucilage nanoemulsion: effect of coating on polyphenol oxidase and pectin methylesterase activities. *Food Research International* 62:974-983, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.05.011>
- Zegbe A. J., J. Mena Covarrubias and V. S. I. Domínguez-Canales (2013)** Cactus mucilage as a coating film to enhance shelf life of unprocessed guavas (*Psidium guajava* L.). *Acta Horticulturae* 1067:423-427, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1067.58>
- Zhang S. Q., H. M. Bi and C. J. Liu (2007)** Extraction of bio-active components from *Rhodiola sachalinensis* under ultrahigh hydrostatic pressure. *Separation and Purification Technology* 57:277-282, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.04.022>