

Extracción de compuestos bioactivos a partir de los subproductos de la tuna (*Opuntia ficus-indica* spp.): Tendencias y aplicaciones recientes en alimentos

C.Y. Lazcano-Hernández¹, A.A. Hernández-Hernández¹, L. García-Curiel², E. Pérez-Escalante¹, E. Contreras-López¹ y J.G. Pérez-Flores*¹

1 Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5, Mineral de la Reforma, Hidalgo; México, C.P. 42184. **2** Área Académica de Enfermería, Instituto de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5, Mineral de la Reforma, Hidalgo; México, C.P. 42184.

*jesus.perez@uaeh.edu.mx

RESUMEN

La tuna es una fruta que se obtiene de *Opuntia ficus-indica* spp., un arbusto que pertenece a la familia de las cactáceas y que desempeña un papel de gran importancia agronómica a nivel mundial. Actualmente, la producción primaria e industrialización de la tuna genera grandes cantidades de subproductos, tales como frutos dañados mecánicamente, cáscaras, semillas y bagazo, los cuales generan problemas ambientales y pérdidas económicas debido a que no son utilizados eficientemente, de manera que sólo una mínima parte es utilizada como forraje para el ganado. Afortunadamente, en los últimos años, diversos autores han señalado a los subproductos de la tuna como una fuente potencial para la extracción de compuestos bioactivos, tales como fitoquímicos y fibras insolubles, los cuales pueden ser utilizados en el desarrollo de nuevos alimentos o aditivos naturales. Por ejemplo, se ha reportado que contiene ácidos grasos; antioxidantes como la vitamina E, los tocoferoles y la vitamina C; pigmentos (betalainas) y flavonoides como la rutina y la quercetina.

Palabras clave: *Opuntia ficus-indica*, métodos de extracción, compuestos bioactivos.

ABSTRACT

Prickly pear is a fruit produced by *Opuntia ficus-indica* spp., a shrub that belongs to the cacti family and that plays an important agronomic role worldwide. Currently, the primary production and industrialization of prickly pear generates large amounts of by-products, such as mechanically damaged fruits, shells, seeds and bagasse. These by-products generate environmental problems and economic losses because they are not used efficiently, only a minimum part is used as fodder for cattle. Fortunately, in recent years, prickly pear by-products have been pointed as a potential source for the extraction of bioactive compounds, such as phytochemicals and insoluble fibers, which can be used in the development of new foods or natural additives. Other bioactive compounds of interest that can be isolated from prickly pear by-products are fatty acids; antioxidants such as vitamin E, tocopherols, and vitamin C; pigments (betalains) and flavonoids such as rutin and quercetin.

Keywords: prickly pear, extraction methods, bioactive compounds.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la industria alimentaria produce millones de toneladas de subproductos provenientes de la limpieza, el procesamiento, la cocción y/o el envasado de productos agrícolas. Estos subproductos se han convertido en un grave problema ambiental y generan pérdidas económicas, debido a que no son utilizados eficientemente y no se cuenta con políticas adecuadas para su manejo, por lo que a menudo son utilizados como alimento para animales o como fertilizantes.

En los últimos años, diversos autores han señalado a los subproductos como una importante fuente de compuestos bioactivos los cuales pueden ser utilizados en el desarrollo de nuevos alimentos o aditivos naturales (Dueñas & García-Estévez, 2020; Silva, Benites, & Gomero, 2008). Por ejemplo, Silva et al. (2008) realizaron la extracción y caracterización de las pectinas de los frutos del níspero de la sierra (*Nespilus germánica*) y de la granadilla (*Pasiflora ligularis*). El alto grado de esterificación y peso molecular elevado, confirmaron que las pectinas obtenidas pueden ser empleadas en la elaboración de mermeladas, jaleas, confites, yogures de frutas, en bebidas de bajas calorías, alimentos probióticos, entre otros.

La tuna es una fruta que se obtiene de *Opuntia ficus-indica* spp., un arbusto que pertenece a la familia de las cactáceas, la cual es también conocida como nopal. Las distintas partes de la planta contienen una cantidad considerable de compuestos bioactivos tales como fenoles, flavonoides, antocianinas, betaxantina y betacianina, vitamina C, carotenoides, vitamina E y otros antioxidantes, como ligninas, esteroides, ésteres, saponinas y alcaloides.

Durante su producción primaria e industrialización, la tuna genera grandes cantidades de subproductos, tales como frutos dañados mecánicamente, cáscaras, semillas y bagazo. Estos subproductos, como ya se ha mencionado anteriormente, son generalmente desechados o utilizados como forraje, sin embargo, su alto contenido de compuestos bioactivos le confiere un uso potencial en la formulación, enriquecimiento y mejoramiento de productos alimenticios (Almanza-Merchán & Fischer, 2012; Tahir, Xiaobo, Komla, & Mariod, 2019).

Por ejemplo, Msaddak et al. (2017) evaluaron el perfil de compuestos bioactivos de subproductos de *O. ficus-indica* para su integración en la producción de pan, la sustitución al 5% de la harina de trigo por el polvo de cladodios mejoró considerablemente el contenido total de fenoles y el potencial antioxidante del pan sin tener ningún efecto negativo en su aceptabilidad sensorial. Por lo que los cladodios de *O. ficus-indica* podrían considerarse como un potencial ingrediente funcional promotor de la salud en los productos de panadería.

Aunque, el aprovechamiento de subproductos alimentarios ha aumentado, no se cuenta con información suficiente que permita aprovechar al máximo los compuestos bioactivos extraídos a partir de subproductos de la tuna. Por lo que, este trabajo permitirá identificar sus posibles aplicaciones en la industria alimentaria, así como los métodos de extracción de compuestos bioactivos, a partir de los subproductos de la tuna, mediante la recopilación y la revisión de artículos científicos y capítulos de libros relacionados con el tema, con el propósito de incentivar el emprendimiento de nuevas investigaciones.

2. *Opuntia ficus-indica* spp.

El nopal (*Opuntia ficus-indica*) es un cactus domesticado de la familia de las cactáceas que puede alcanzar de 3 a 5 m de altura, tiene un tronco corto y robusto de 30 -45 cm de diámetro con tallos de color verde grisáceo formados por una serie de segmentos carnosos ovalados de 25-60 cm de largo y 20-40 cm de ancho. En México, el fruto de *Opuntia* spp. se denomina comúnmente como “tuna” la cual es una fruta carnosa de forma ovalada con abundantes semillas que está recubierta con una cáscara gruesa y espinosa. Es un fruto no climatérico que tiene un diámetro entre 5.7-6.8 cm, longitudes desde 5.2-12

cm y un peso alrededor de 45 a 280 g (Almanza-Merchán & Fischer, 2012; Fideicomiso de Riesgo Compartido, 2017; Lim, 2012).

2.1. Variedades de *Opuntia ficus-indica* spp.

En general, la variedades de tuna presentan características similares pero se distinguen principalmente por la coloración de su pulpa, entre las que destacan rojo siciliano (Sanguigna), amarilla (Surfarina) y blanca (Muscaredda); o bien por el color de la cáscara, el cual puede cambiar de verde a naranja-amarillo para los cultivares amarillos (Gialla), de verde a rojo rubí para los cultivares de tuna roja (Rossa) y de verde a verde blanquecino para los cultivares de color blanco (Bianca) (FAO, 2018).

2.2. Producción y comercialización en México

La producción de tuna se lleva a cabo en aproximadamente 32 países, entre los cuales destaca México al aportar el 44% de la producción mundial (Almanza-Merchán & Fischer, 2012). Este cuenta con aproximadamente 20 mil productores de tuna, quienes producen alrededor de 352 mil toneladas anuales cosechadas en 48 mil hectáreas (Almanza-Merchán & Fischer, 2012; Fideicomiso de Riesgo Compartido, 2017). El mayor volumen de producción se concentra en los estados de México, Zacatecas, Puebla e Hidalgo, los cuales representan el 80% de la producción nacional (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2018).

2.3. Composición química

La composición química de las tunas depende de muchos factores tales como, especie, variedad, manejo del cultivo, manejo postcosecha y, en mayor medida, la madurez, debido a que la tuna es una fruta no-climática, por lo que es importante cosechar en el punto de madurez óptimo de consumo (Piga, 2004).

La pulpa está compuesta por agua (84-90%) y azúcares reductores (10% a 15%), siendo la glucosa y fructosa los azúcares predominantes. Además, la pulpa es rica en minerales como, calcio, magnesio, potasio y fósforo (Almanza-Merchán & Fischer, 2012; Kossori, Villaume, Boustani, Sauvair, & Méjean, 1998; Piga, 2004). Por otra parte, El Kossori et al. (1998) analizaron la composición química de las semillas y el pericarpio mostrando que las semillas tienen un alto contenido de celulosa, proteínas y lípidos, mientras que la cáscara tiene mayores concentraciones de calcio y potasio. Además, determinaron que la glucosa es el principal carbohidrato presente en la cáscara comparado con la sacarosa y fructosa las cuales se encuentran en pequeñas cantidades (Tabla I).

Tabla I. Composición de la tuna.

	Cáscara	Semillas	Pulpa
Composición química	% p/p, materia seca		
Proteína	8.30	11.8	5.3
Lípidos	2.43	6.77	0.97
Fibra	40.8	54.2	20.5
Cenizas	12.1	5.90	8.5

Fuentes: El Kossori et al. (1998).

El contenido de otros componentes, como los lípidos, las proteínas y la fibra son similares a las de otras frutas. Los lípidos están distribuidos en la pulpa, las semillas y la cáscara, esta última contiene cantidades considerables de ácidos grasos poliinsaturados, principalmente ácido linoleico, α -tocoferol, esteroides, β -

caroteno y vitamina K1. Por otra parte, el γ -tocoferol es el componente predominante en la semilla y el δ -tocoferol se encuentra principalmente en la pulpa, mientras que el ácido linoleico es el ácido poliinsaturado mayoritario tanto en la pulpa como en la semilla (Ramadan & Mörsel, 2003).

2.3.1. Compuestos bioactivos

Las distintas partes de *Opuntia ficus-indica* spp. son consideradas como una fuente importante de compuestos bioactivos tales como, fenoles, flavonoides, antocianinas, betaxantina y betacianina, vitamina E, vitamina C, carotenoides, ligninas, entre otros (FAO, 2018; Astello-García et al., 2015; De Leo, Abreu, Pawlowska, Cioni, & Braca, 2010; Guevara-Figueroa et al., 2010; Tahir et al., 2019). Los cladodios, por ejemplo presentan un perfil fenólico importante, Guevara-Figueroa et al. (2010) identificaron varios glucósidos flavonoides como isoquercitrina, kaempferol-3-O-rutinósido, isorhamnetina-3-O-glucósido e isorhamnetina-3-O-rutinósido en los cladodios de *Opuntia* spp. Astello-García et al. (2015) encontraron que los principales compuestos fenólicos presentes en diferentes variedades de cladodios de *O. ficus-indica* son el ácido eucómico, el kaempferol 3-O-robinobiosido-7-O-arabinofurósido, la isorhamnetina 3-O-galactósido y la isorhamnetina 3-O-rhamnosido-7-O-rhamnosil hexósido).

En cuanto al fruto, se ha reportado que contiene una cantidad considerable de compuestos bioactivos como betalainas, ácido ascórbico, carotenoides, además de flavonoles como la isorhamnetina, la quercetina y los derivados glucosilados del kaempferol (Mena et al., 2018; Tahir et al., 2019). Mena et al. (2018) realizaron caracterización fitoquímica de la pulpa y cáscara de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., identificaron flavonoides como Kaempferol-di-ramnosa-hexósido Isorhamnetina-ramnosa-rutinósido y Quercetina-hexósido-pentósido; ácidos fenólicos como el ácido cafeico y derivados del ácido ferúlico; y los lignanos, además de otros compuestos como betalainas (Betanina e Isobetanina).

Por otro lado, se ha reportado que los polifenoles y los flavonoides son los principales compuestos bioactivos de las flores de *O. ficus-indica* (Tahir et al., 2019). De leo et al. (2010) identificaron compuestos como kaempferol, quercetina y derivados glucosilados de isorhamnetina.

3. Métodos de extracción y purificación de compuestos bioactivos a partir de subproductos de *Opuntia ficus-indica* spp.

En los últimos años se ha descrito una estrategia universal de recuperación de compuestos destinada a la obtención viable, sostenible y segura de los mismos a partir de subproductos alimentarios (Galanakis, 2012, 2015). La recuperación puede llevarse a cabo en cinco etapas distintas, aunque se pueden eliminar etapas y/o cambiar el orden con el propósito de separar eficazmente los compuestos de la matriz alimentaria. El proceso suele pasar del nivel macroscópico al macromolecular. Posteriormente, se realiza la extracción (o eliminación) de compuestos bioactivos de interés y, finalmente, la purificación y encapsulación de los compuestos deseados (Galanakis, 2015).

3.1. Pretratamiento de la muestra

En esta primera etapa se lleva a cabo el tratamiento macroscópico de la matriz de los subproductos alimentarios, el cual tiene como objetivo ajustar del contenido de agua, sólidos y grasas, la activación o desactivación de enzimas, la moderación de la carga microbiana y el aumento de la permeabilidad de la matriz (Galanakis, 2015). Para el caso de los subproductos de *O. ficus-indica*, diversos autores han realizado una reducción en el tamaño de la muestra mediante la molienda para facilitar y mejorar el rendimiento en las siguientes etapas de separación y extracción (Kossori et al., 1998; Lefsih et al., 2017; Lira-Ortiz et al., 2014; Manzur-Valdespino et al., 2020; Msaddak et al., 2017).

Por otro lado, se han realizado procesos térmicos con la finalidad de activar/desactivar enzimas clave como la pectina metil esterasa o polifenol oxidasa, las cuales afectan el rendimiento y la calidad de

compuestos de interés, como la pectina y los fenoles (Galanakis, 2015; Lefsih et al., 2017; Lira-Ortiz et al., 2014; Msaddak et al., 2017).

Otro proceso utilizado para el pretratamiento de muestras de subproductos de tuna es la liofilización, sin embargo, esta presenta algunas limitaciones como un alto consumo de tiempo y energía, así como un mayor costo debido a la presencia de condiciones de vacío (Galanakis, 2012; Kossori et al., 1998; Manzur-Valdespino et al., 2020).

3.2. Separación de macro y micromoléculas

La segunda etapa consiste en la separación de los compuestos pequeños (antioxidantes, ácidos o iones) de las macromoléculas (proteínas o fibras alimentarias). Este procedimiento suele realizarse mediante precipitación con alcohol, ya que es un método barato y de fácil aplicación. Sin embargo, no es selectivo ni permite separar los complejos formados entre las moléculas más pequeñas y las más grandes (Ammar, Ennouri, & Attia, 2015; Ciriminna et al., 2019; Coba, Flores, Elizabeth, & Salazar Llangari, 2019; Galanakis, 2012, 2015; Lira-Ortiz et al., 2014).

Por otra parte, Ciriminna et al. (2019) realizaron la separación de pectina de las cáscaras de *Opuntia ficus-indica* mediante la precipitación con etanol (relación molar 25:1 etanol:agua) seguido de una centrifugación a 4000 rpm durante 40 min. Lira-Ortiz et al. (2014) también realizaron la extracción de pectina y de betanina a partir de residuos de frutos de nopales (*Opuntia albicarpa*) utilizando etanol al 96%, con el propósito de eliminar las sales y los azúcares libres. Otro tipo de proceso eficaz para la separación de macromoléculas es la ultrafiltración a través del uso de membranas, ya que son fáciles de usar y no son destructivas (Galanakis, 2015).

3.3. Extracción de compuestos de interés *Opuntia ficus-indica* spp.

3.3.1. Polímeros

Los principales componentes de los cladodios y la cáscara de *O. ficus-indica* spp. son polímeros que contienen carbohidratos, los cuales comprenden una mezcla de mucílago y pectina (FAO, 2008). La extracción de estos compuestos resulta de gran importancia para su uso en la industria alimentaria como espesante en alimentos debido a su capacidad de absorber agua (Sáenz, Sepúlveda, & Matsuhira, 2004).

La extracción de estos compuestos se ha realizado utilizando métodos tradicionales como Soxhlet y maceración (Lefsih et al., 2017). Diversos autores han realizado la extracción y purificación del mucílago, la mayoría de ellos homogenizan las cactáceas con agua y etanol para su precipitación (Cárdenas, Higuera-Ciapara, & Goycoolea, 1997; Saag, Sanderson, Moyna, & Ramos, 1975; Sáenz et al., 2004). Sin embargo, los métodos de extracción convencionales tienen los inconvenientes de tener un tiempo de extracción más largo y de requerir una cantidad considerable de solventes. Por lo que, muchos autores se han interesado por las tecnologías emergentes como método alternativo para mejorar la extracción (Lefsih et al., 2017). Por ejemplo, Lefsih et al. (2017) estudiaron la extracción asistida por microondas (MAE) de pectina soluble en agua de cladodios de *O. ficus-indica*. Reduciendo el consumo de energía y de cantidades de disolventes orgánicos. La extracción con este método mejoró un 12.56% la recuperación de pectina comparado al método convencional.

3.3.2. Pigmentos

Hoy en día, los consumidores desean comprar alimentos con colorantes naturales debido a la toxicidad de los colorantes sintéticos. En el caso de los subproductos de tuna la variación de color se atribuye principalmente a la combinación de dos pigmentos hidrosolubles derivados de las betalainas y son betaxantinas (amarillo) y betacianinas (rojo) (Prakash Maran & Manikandan, 2012; Tahir et al., 2019). La obtención de colorantes naturales a partir de tuna para su uso alimenticio se realiza con base a la

estrategia universal, ya que se inicia por el pretratamiento de la muestra mediante secado, seguido de la extracción por solventes y finaliza con la purificación (Coba et al., 2019).

Coba et al. (2019) realizaron la extracción de pigmentos naturales de *Opuntia ficus-indica*. El proceso de obtención se desarrolló inicialmente por secado (liofilización), el sólido resultante se sometió a extracción con etanol al 96 % en equipo Soxhlet. Posteriormente la mezcla se purificó mediante destilación y se obtuvo el colorante.

Uno de los inconvenientes de los métodos de extracción convencionales para la recuperación de pigmentos de *Opuntia* es el uso de grandes cantidades de disolvente, así como varios procesos de purificación lo que limita su uso a escalas industriales. Por lo anterior, es de gran importancia encontrar nuevas tecnologías que permitan reducir o eliminar el uso de disolventes tóxicos, además de reducir el tiempo y la energía de las operaciones, así como la mejora de los rendimientos de extracción (Koubaa et al., 2016). Por ello, diversos autores se han interesado por tecnologías emergentes las cuales reducen o eliminan los disolventes tóxicos, minimizan tiempo y energía de las operaciones (Galanakis, 2012). Por ejemplo, Koubaa et al. (2016) evaluaron el potencial de la extracción con campos eléctricos pulsados (PEFs) y ultrasonidos (USNs) mejorando la extracción de colorantes rojos (betanina/isobetanina) de las cáscaras y pulpas de nopales rojos (*Opuntia stricta* Haw).

3.3.1. Compuestos antioxidantes

Se ha reportado que las distintas partes de la planta de nopal (pulpa, cáscara, semillas y cladodios) tienen elevadas cantidades de compuestos antioxidantes como polifenoles, flavonoides, betaxantina y betacianina. La extracción con disolventes es una de las más utilizadas y es de gran utilidad para la obtención de compuestos bioactivos (Galanakis, 2015). Sin embargo, la eficacia de la extracción se ve afectada por factores como el tipo de disolvente y el método de extracción (Ammar et al., 2015; Guevara-Figueroa et al., 2010).

Guevara-Figueroa et al. (2010), realizaron la extracción de los ácidos fenólicos y flavonoides de dos especies comerciales y ocho silvestres de *Opuntia* spp. utilizando etanol a temperatura ambiente durante 48 horas bajo agitación mecánica. Por otro lado, Ammar et al. (2015), evaluaron el efecto de diferentes disolventes utilizando dos métodos de extracción para el contenido total de polifenoles y flavonoides de las flores de *O. ficus-indica*. En este estudio la extracción por Soxhlet, usando MeOH como disolvente, tiene una buena reproducibilidad y eficiencia sobre otros métodos. Además, los extractos obtenidos por este método presentaron elevada actividad antioxidante.

3.4. Aislamiento y purificación de los compuestos bioactivos

Para el aislamiento y purificación de compuestos bioactivos de *Opuntia* se han realizado diversos estudios, por ejemplo, Ciriminna et al. (2019), realizaron la extracción de pectina y betanina de la cáscara de *O. ficus-indica* mediante hidrodifusión asistida por microondas, la pectina precipitada se aisló en forma de cristales de gran pureza mediante liofilización. Sin embargo, este proceso de secado consume más tiempo y energía en comparación con otros métodos tales como el secado por aspersión (Galanakis, 2015).

En otro estudio, Lira-Ortiz et al. (2014) llevaron a cabo el proceso de extracción de pectina a partir de subproductos de frutos de *Opuntia albicarpa*, los cuales se secaron a 45°C en un horno de convección, se molieron y tamizaron para producir un polvo homogéneo el cual fue almacenado para su posterior caracterización. Diversos autores han descrito en su metodología el uso de este proceso de secado para el aislamiento y purificación de pectinas (Bayar et al., 2017; Goycoolea & Cardenas, 2003; Lefsih et al., 2017; Lira-Ortiz et al., 2014; Silva et al., 2008). Por ejemplo, Lefsih et al. (2017), después de realizar la extracción asistida por microondas de pectina de los cladodios de *O. ficus indica*, secaron el extracto a 45°C en la estufa de aire caliente hasta obtener un polvo.

4. Tendencias y aplicaciones recientes de los compuestos bioactivos de *Opuntia ficus-indica* spp.

En general, el uso de subproductos de tuna se ha enfocado principalmente en el desarrollo de nuevos productos. Entre los alimentos elaborados a base del fruto se encuentran: mermeladas, jugos y néctares; productos deshidratados; jugos concentrados, jarabes y licores. Por otro lado, entre los productos elaborados a base de los cladodios se encuentran: encurtidos, jugos, mermeladas y otros productos mínimamente procesados. Sin embargo, debido a su composición nutricional y funcional, el uso de los subproductos de *Opuntia ficus-indica* spp. en la industria alimentaria se ha enfocado en la formulación, enriquecimiento y desarrollo de nuevos productos, o bien, para formar parte de la gama de aditivos naturales (Tabla II) (Bouazizi, Montevecchi, Antonelli, & Hamdi, 2020; Chacón-Garza et al., 2020; Chougui et al., 2015; Manzur-Valdespino et al., 2020; Msaddak et al., 2017; Sáenz & Berger, 2006).

Tabla II. Ejemplos del uso de *Opuntia ficus-indica* spp. en la industria alimentaria.

Aplicaciones en alimentos	Parte de la planta	Referencia
Elaboración de suplementos alimenticios.	Pulpa y cáscara	Manzur <i>et al.</i> (2020)
Ingrediente funcional en la elaboración de pan.	Cladodios	Msaddak <i>et al.</i> (2017)
Elaboración de Jalea.	Pulpa	Chacón-Garza <i>et al.</i> (2020)
Antioxidante para conservación de la margarina.	Cáscara	Chougui <i>et al.</i> (2015)
Ingrediente en la formulación de galletas.	Cáscara	Bouazizi <i>et al.</i> (2020)

En el caso de los cladodios, segregan un flujo espeso llamado mucílago, el cual es un carbohidrato complejo con gran capacidad para absorber agua, esta propiedad le confiere un uso potencial en la industria alimentaria como espesante en alimentos, tales como las preparaciones en polvo para mezclarse con agua o jugos antes del consumo (Sáenz et al., 2004). Además, se ha evaluado su uso para el desarrollo de películas comestibles con el fin de disminuir los residuos de envases desechables contenedores de alimentos (Del-Valle, Hernández-Muñoz, Guarda, & Galotto, 2005).

Del Valle et al. (2005) probaron películas comestibles de mucílago extraído de *Opuntia ficus-indica* con el fin de determinar sus efectos sobre la calidad sensorial de la fresa. A partir de los resultados, concluyeron que el uso de recubrimientos de mucílago permite aumentar la vida útil de la fruta. Asimismo, *O. ficus-indica* se ha propuesto como un producto de interés para la industria de los complementos alimenticios (Manzur-Valdespino et al., 2020). Y es que, de acuerdo con Manzur et al. (2020), quienes evaluaron el uso *Opuntia ficus-indica* L. Mill en la elaboración de suplementos alimenticios, determinaron que los añadidos con el polvo de subproductos (mesocarpio y pericarpio) del fruto presentaron un mayor contenido fenólico total a comparación de otras formulaciones, además de exhibir buenos valores en la capacidad de retención de lípidos y agua, concluyendo que los comprimidos elaborados con subproductos de *Opuntia* poseen un uso potencial en la industria de los suplementos alimenticios al aportar propiedades funcionales y antioxidantes.

Como se mencionó anteriormente, las betalainas son pigmentos solubles en agua derivados del ácido betalámico, principales responsables del color rojo y amarillo de *Opuntia ficus-indica*. Dentro de las betacianinas se encuentra la betanina, que es utilizada principalmente para colorear alimentos que no son tratados térmicamente, como yogur, helados y jarabes (Sáenz & Berger, 2006; Tahir et al., 2019). Si bien, en la actualidad las betalainas para uso alimentario se extraen de la remolacha roja (*Beta vulgaris* (L.) subsp. *vulgaris* cv. *rubra*), que contiene hasta 50mg/100g de betanina (Piga, 2004), Prakash & Manikandan (2012), mediante la optimización de los parámetros de extracción de pigmentos *O. ficus-*

indica, obtuvieron un rendimiento de extracción de 13.43 mg/100g de betacianina y 22.29 mg/100g de betaxantina.

CONCLUSIÓN

Considerando la composición química de los subproductos de *Opuntia ficus-indica* es posible concluir que su contenido de compuestos bioactivos le confiere un uso potencial en el desarrollo, enriquecimiento y mejoramiento de productos alimenticios. Y es que, si bien, en lo que respecta a la literatura, varios de los compuestos mencionados en esta revisión ya se han estudiado y demostrado sus posibles aplicaciones, es de suma importancia seguir invirtiendo en la investigación y el análisis de estos compuestos, además de optimizar las técnicas de extracción con el propósito de desarrollar estrategias que garanticen la viabilidad de estos procesos para ser utilizados y, de esta manera, asegurar el potencial nutricional y funcional de los subproductos.

BIBLIOGRAFÍA

- Almanza-Merchán, P., & Fischer, G. (2012). *Tuna (Opuntia ficus-indica (L.) Miller) en Manual para el cultivo de frutales en el trópico*. ProDumedios.
- Ammar, I., Ennouri, M., & Attia, H. (2015). Phenolic content and antioxidant activity of cactus (*Opuntia ficus-indica* L.) flowers are modified according to the extraction method. *Industrial Crops and Products*, *64*, 97-104.
- Astello-García, M. G., Cervantes, I., Nair, V., Santos-Díaz, M. del S., Reyes-Agüero, A., Guéraud, F., ... Barba de la Rosa, A. P. (2015). Chemical composition and phenolic compounds profile of cladodes from *Opuntia* spp. Cultivars with different domestication gradient. *Journal of Food Composition and Analysis*, *43*, 119-130.
- Bayar, N., Bouallegue, T., Achour, M., Kriaa, M., Bougatef, A., & Kammoun, R. (2017). Ultrasonic extraction of pectin from *Opuntia ficus indica* cladodes after mucilage removal: Optimization of experimental conditions and evaluation of chemical and functional properties. *Food Chemistry*, *235*, 275-282.
- Bouazizi, S., Montevecchi, G., Antonelli, A., & Hamdi, M. (2020). Effects of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.) peel flour as an innovative ingredient in biscuits formulation. *LWT*, *124*, 109155.
- Cardenas, A., Higuera-Ciapara, I., & Goycoolea, F. (1997). Rheology and Aggregation of Cactus (*Opuntia ficus-indica*) Mucilage in Solution. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, *2*.
- Chacón-Garza, L. E., Hernández-Cervantes, D., Ventura-Sobrevilla, J. M., Aguirre-Joya (2020). Sensory analysis of jelly from prickly pear cactus fruit (*Opuntia ficus indica*). *RIIT. Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, *8(44)*, 1-11.
- Chougui, N., Djerroud, N., Naraoui, F., Hadjal, S., Aliane, K., Zeroual, B., & Larbat, R. (2015). Physicochemical properties and storage stability of margarine containing *Opuntia ficus-indica* peel extract as antioxidant. *Food Chemistry*, *173*, 382-390.
- Ciriminna, R., Fidalgo, A., Avellone, G., Danzi, C., Timpanaro, G., Locatelli, M., ... Pagliaro, M. (2019). Integral Extraction of *Opuntia ficus-indica* Peel Bioproducts via Microwave-Assisted Hydrodiffusion and Hydrodistillation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *7(8)*, 7884-7891.
- Coba, R., Flores, L., Elizabeth, P., & Salazar Llangari, K. (2019). Obtención del colorante natural de tuna (*Opuntia ficus-indica*) Obtaining natural colorants tuna (*Opuntia ficus-indica*). *Ciencia Digital*, Vol. 3, 232-240.
- De Leo, M., Abreu, M. B. D., Pawlowska, A. M., Cioni, P. L., & Braca, A. (2010). Profiling the chemical content of *Opuntia ficus-indica* flowers by HPLC-PDA-ESI-MS and GC/EIMS analyses.

- Phytochemistry Letters*, 3(1), 48-52.
- Del-Valle, V., Hernández-Muñoz, P., Guarda, A., & Galotto, M. J. (2005). Development of a cactus-mucilage edible coating (*Opuntia ficus indica*) and its application to extend strawberry (*Fragaria ananassa*) shelf-life. *Food Chemistry*, 91(4), 751-756.
- Dueñas, M., & García-Estévez, I. (2020). Agricultural and Food Waste: Analysis, Characterization and Extraction of Bioactive Compounds and Their Possible Utilization. *Foods*, 9(6), 817.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2018). Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal. Roma: Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas.
- Fideicomiso de Riesgo Compartido. (2017, septiembre 6). La tuna, una fruta muy mexicana. Recuperado 10 de marzo de 2021, de Gobierno de México website: <https://www.gob.mx/firco/articulos/la-tuna-una-fruta-muy-mexicana?idiom=es>
- Galanakis, C. M. (2012). Recovery of high added-value components from food wastes: Conventional, emerging technologies and commercialized applications. *Trends in Food Science & Technology*, 26(2), 68-87.
- Galanakis, C. M. (2015). The universal recovery strategy. En *Food Waste Recovery* (pp. 59-81). Elsevier.
- Goycoolea, F., & Cardenas, A. (2003). Pectins from *Opuntia* spp.: A short review. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 5.
- Guevara-Figueroa, T., Jiménez-Islas, H., Reyes-Escogido, M. L., Mortensen, A. G., Laursen, B. B., Lin, L.-W., ... Barba de la Rosa, A. P. (2010). Proximate composition, phenolic acids, and flavonoids characterization of commercial and wild nopal (*Opuntia* spp.). *Journal of Food Composition and Analysis*, 23(6), 525-532.
- Kossori, R. L. E., Villaume, C., Boustani, E. E., Sauvaire, Y., & Méjean, L. (1998). Composition of pulp, skin and seeds of prickly pears fruit (*Opuntia ficus indica* sp.). *Plant Foods for Human Nutrition*, 52(3), 263-270.
- Koubaa, M., Barba, F. J., Grimi, N., Mhemdi, H., Koubaa, W., Boussetta, N., & Vorobiev, E. (2016). Recovery of colorants from red prickly pear peels and pulps enhanced by pulsed electric field and ultrasound. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 37, 336-344.
- Lefsih, K., Giacomazza, D., Dahmoune, F., Mangione, M. R., Bulone, D., San Biagio, P. L., ... Madani, K. (2017). Pectin from *Opuntia ficus indica*: Optimization of microwave-assisted extraction and preliminary characterization. *Food Chemistry*, 221, 91-99.
- Lim, T. K. (2012). *Opuntia ficus-indica*. En L. T. K., *Edible Medicinal and Non-Medicinal Plants* (pp. 660-682). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Lira-Ortiz, A. L., Reséndiz-Vega, F., Ríos-Leal, E., Contreras-Esquível, J. C., Chavarría-Hernández, N., Vargas-Torres, A., & Rodríguez-Hernández, A. I. (2014). Pectins from waste of prickly pear fruits (*Opuntia albicarpa* Scheinvar 'Reyna'): Chemical and rheological properties. *Food Hydrocolloids*, 37, 93-99.
- Manzur-Valdespino, S., Ramírez-Moreno, E., Arias-Rico, J., Jaramillo-Morales, O. A., Calderón-Ramos, Z. G., Delgado-Olivares, L., ... Cruz-Cansino, N. del S. (2020). *Opuntia ficus-indica* L. Mill Residues—Properties and Application Possibilities in Food Supplements. *Applied Sciences*, 10(9), 3260.
- Mena, P., Tassotti, M., Andreu, L., Nuncio-Jáuregui, N., Legua, P., Del Rio, D., & Hernández, F. (2018). Phytochemical characterization of different prickly pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) cultivars and botanical parts: UHPLC-ESI-MSn metabolomics profiles and their chemometric analysis. *Food Research International*, 108, 301-308.
- Msaddak, L., Abdelhedi, O., Kridene, A., Rateb, M., Belbahri, L., Ammar, E., ... Zouari, N. (2017). *Opuntia ficus-indica* cladodes as a functional ingredient: Bioactive compounds profile and their effect on antioxidant quality of bread. *Lipids in Health and Disease*, 16(1), 32.
- Piga, A. (2004). Cactus Pear: A Fruit of nutraceutical and functional importance. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 9-22.
- Prakash Maran, J., & Manikandan, S. (2012). Response surface modeling and optimization of process

- parameters for aqueous extraction of pigments from prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit. *Dyes and Pigments*, 95(3), 465-472.
- Ramadan, M. F., & Mörsel, J.-T. (2003). Oil cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L.). *Food Chemistry*, 82(3), 339-345.
- Saag, L. M. K., Sanderson, G. R., Moyna, P., & Ramos, G. (1975). Cactaceae mucilage composition. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 26(7), 993-1000.
- Sáenz, C., & Berger, H. (2006). *Utilización agroindustrial del nopal*. Food & Agriculture Org.
- Sáenz, C., Sepúlveda, E., & Matsuhira, B. (2004). *Opuntia* spp mucilage's: A functional component with industrial perspectives. *Journal of Arid Environments*, 57(3), 275-290.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2018, junio 11). En 2017, la producción nacional de tuna y xoconostle fue superior a 470 mil toneladas. Recuperado 13 de marzo de 2021, de Gob.mx website: <http://www.gob.mx/siap/articulos/en-2017-la-produccion-nacional-de-tuna-y-xoconostle-fue-superior-a-470-mil-toneladas>
- Silva, N. C., Benites, E. A., & Gomero, J. C. M. (2008). Extracción y caracterización de pectinas obtenidas a partir de frutos de la biodiversidad peruana. *Ingeniería Industrial*, (26), 175-199.
- Tahir, H. E., Xiaobo, Z., Komla, M. G., & Mariod, A. A. (2019). Nopal Cactus (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill) as a Source of Bioactive Compounds. En A. A. Mariod, *Wild Fruits: Composition, Nutritional Value and Products* (pp. 333-358). Cham: Springer International Publishing.