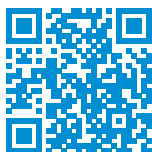


## 7. *Opuntia* spp. como elemento articulador de la economía circular mexicana: Experiencias y posibilidades



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.365.07>

GABRIELA ALEJANDRA VÁZQUEZ RODRÍGUEZ<sup>1</sup>

CARLOS ALEXANDER LUCHO CONSTANTINO<sup>2</sup>

ROSA ICELA BELTRÁN HERNÁNDEZ<sup>3</sup>

CLAUDIA CORONEL OLIVARES<sup>4</sup>

JUAN ANDRÉS AGUILAR HUESCA<sup>5</sup>

### Resumen

La capacidad de las plantas del género *Opuntia* para crecer en suelos empobrecidos y soportar sequías prolongadas las convierte en un recurso estratégico frente al cambio climático, en torno al cual pueden articularse esquemas de economía circular en México. Este trabajo presenta experiencias de investigación sobre el aprovechamiento de *Opuntia* spp. no comestibles o sus residuos para la producción de (i) un medio de cultivo para gránulos fúngicos, (ii) pectina y mucílago, (iii) películas comestibles y (iv) biofertilizante y biogás. Estas aplicaciones se desarrollaron bajo un enfoque de biorrefinería, con bajo impacto ambiental y sin competir con el uso alimentario tradicional de estas plantas. Los resultados respaldan el papel de *Opuntia* spp. como recurso clave para implementar modelos de economía circular en regiones áridas y semiáridas de México.

<sup>1</sup> Doctora en Microbiología-Biotecnología. Profesora-investigadora de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8351-8451>

<sup>2</sup> Doctor en Biotecnología. Profesor-investigador de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0899-2409>

<sup>3</sup> Doctora en Biotecnología. Profesora-investigadora de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0678-6991>

<sup>4</sup> Doctora en Territorio y Medio Ambiente. Profesora-investigadora de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9137-2894>

<sup>5</sup> Doctorante en Ciencias Ambientales en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0921-1704>

**Palabras clave:** *nopal*, *mucílago*, *pectina*, *biofertilizante*, *biogás*.

## Introducción

*Opuntia* pertenece a las plantas con flores de la familia de las cactáceas (*Cactaceae*), que son endémicas del continente americano. Su distribución está documentada desde Canadá hasta la Patagonia, con un total de 2 000 especies (Stintzing y Carle, 2005). De las 200 especies existentes de nopales, en México se encuentran 102, de las cuales 94 pertenecen al género *Opuntia* y ocho al género *Nopalea* (Conabio, 2018; Madrigal-Santillán et al., 2022; Semarnat, 2020).

Desde la perspectiva económica destacan los cladodios comestibles de algunas especies de *Opuntia*, en particular de *O. ficus-indica*, comúnmente denominados nopal verdura. Las variedades de *O. ficus-indica* más utilizadas para la producción de nopal verdura son Copena V1, nopal de Castilla, Milpa Alta e Italiano. Asimismo, se ha registrado el aprovechamiento de *O. megacantha*, *O. xoconoxtle*, *O. leucotricha*, *O. chaveña*, *O. hyptiacantha* y *O. robusta*, esta última considerada silvestre (Ochoa y Barbera, 2018; Sáenz et al., 2013; Tahiri et al., 2025).

Se calcula que se cultivan cerca de 590 mil hectáreas de nopales en todo el mundo, pero el 90% de la producción mundial se origina en México. Esta producción se distribuye en varios estados, principalmente en zonas semiáridas con suelos pobres de Sonora, Chihuahua, Coahuila, Durango, Baja California, Baja California Sur, Nuevo León, Tamaulipas, Sinaloa, Jalisco, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Morelos, Estado de México y la Ciudad de México (Semarnat, 2020). El nopal verdura alcanza una producción nacional de 891 821 toneladas anuales, y se consume a razón de 6.2 kg per cápita y por año (SADER, 2020).

Tanto por su estructura, en la que abundan células mucilaginosas y fibra, como por el papel sociocultural que han jugado por siglos, los productos a base de opuntias abundan en el mercado mexicano. Así, productos que van desde agentes emulsificantes hasta coagulantes destinados al tratamiento del agua o reforzadores de materiales de construcción, son

muestra de la importancia de esta planta en la sociedad mexicana, ya de por sí considerable como alimento. En nuestro grupo de investigación, el Cuerpo Académico de Biotecnología y Microbiología Ambientales de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH-CA-82), hemos explorado el potencial de *Opuntia* o sus residuos para elaborar diversos productos considerando aspectos clave para la sustentabilidad, tales como la no competencia con su consumo alimentario, el procesamiento en condiciones ambientales suaves o el aprovechamiento circular mediante el enfoque de las biorrefinerías.

Por consiguiente, en este capítulo se explora el potencial de *Opuntia* como eje articulador de esquemas de economía circular, especialmente en el contexto del cambio climático y la gestión sostenible de los recursos. Para ello, se presentan antecedentes acerca de la relevancia de esta cactácea en México, así como su distribución geográfica y principales características fisiológicas. Posteriormente, se discute el papel de la biotecnología y las biorrefinerías como herramientas clave para valorizar la biomasa de *Opuntia*. En la sección de resultados, se describen experiencias específicas desarrolladas por nuestro grupo de investigación en torno a (i) la formulación de medios para cultivo de gránulos fúngicos; (ii) la extracción de pectina y mucílago; (iii) la elaboración de películas comestibles, y (iv) la producción de biofertilizantes y biogás. Estas aplicaciones se integraron con un enfoque de biorrefinería, con bajo impacto ambiental y sin competir con su uso alimentario tradicional. Con este enfoque integral se busca demostrar que *Opuntia* puede incorporarse efectivamente en un modelo de economía circular sustentable.

## Antecedentes

### Importancia histórica del género *Opuntia*

Debido al consumo habitual de sus frutos maduros (*tun*, término que después se modificó a *tuna*), así como a otras usanzas que conferían a los nopales propiedades medicinales —para el tratamiento de fracturas óseas, como fuente de agua e incluso como cercas protectoras o de colindancias—,

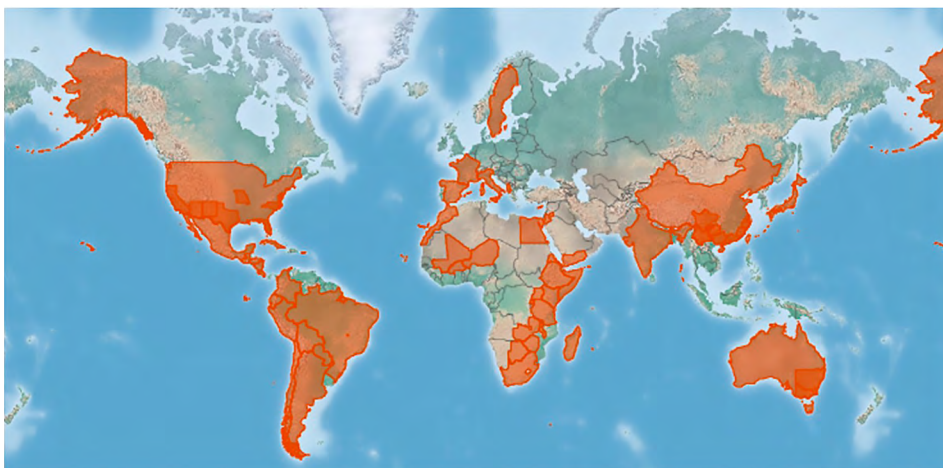
la domesticación de *Opuntia* fue tan importante para los aztecas que incluso era evidente en sus insignias bélicas, que aparecía junto a un águila devorando una serpiente (Ochoa y Barbera, 2018). Así pues, los *nopalli* (planta de nopal en náhuatl) formaban parte de la cultura azteca, y continuaron siéndolo tras la llegada de los conquistadores españoles, que resultó en un intercambio significativo de flora y fauna entre el nuevo y el viejo mundo. La abundancia de esta planta en el paisaje fue destacada por Hernán Cortés y por los autores del Códice Barberini (1552), lo cual constituye la más antigua referencia a *Opuntia*, conocida como *tlatocnochtli*.

Los españoles quisieron imponer sus cultivos tradicionales y sólo se interesaron por aquellos productos americanos que generaran ganancias a corto plazo. Tal fue el caso de la grana cochinilla *nocheztli*, debido al colorante que se extrae de las hembras adultas del insecto hemíptero *Dactylopius coccus*, las cuales infestan los cladodios del nopal de Castilla (*O. ficus-indica*). Este colorante, rico en ácido el carmínico que le confiere el color rojo, fue apreciado y valuado incluso por encima de los metales preciosos (Coronado-Flores et al., 2015; Ochoa y Barbera, 2018).

### **Distribución y características del género *Opuntia***

De acuerdo con el Centro Internacional de Agricultura y Biociencias (CABI, por sus siglas en inglés), *Opuntia* se puede encontrar en regiones subtropicales, tropicales y de temperaturas cálidas del mundo; su base de datos CABI Compendio 37714 (Wallingford, Reino Unido) muestra un mapa de distribución actual alrededor del mundo (*vid.* figura 7.1) (Bakewell-Stone, 2022).

La versatilidad fisiológica de *Opuntia* le ha permitido expandirse por la cuenca mediterránea hasta el paralelo 43 norte, donde se cultiva principalmente en Túnez, Libia y Egipto (Prisa, 2021). Además, se ha propagado extensamente a Marruecos, Eritrea, Etiopía, Somalia, Yemen, así como al centro y sur de África; ha proliferado en el sur de Europa, Medio Oriente, la India, y se ha extendido a Australia y Hawaii (Bakewell-Stone, 2022; Zouitane et al., 2025).

Figura 7.1. Mapa de distribución mundial contemporánea de *Opuntia ficus-indica*

Fuente: <https://www.cabdigitalibrary.org/doi/10.1079/cabicompendium.37714#sec-10>.

El rango de temperatura ideal para el crecimiento de *Opuntia* es de 10 a 15 °C en invierno y de 30 a 35 °C en verano; a temperaturas menores a –5 °C las hojas se tornan amarillas y por debajo de –16 °C los tejidos mueren. Toleran entre 100 y 400 mm de lluvia anual, crecen en suelos franco-arenosos y arcillo-limosos, con pH de 5-8 y conductividad eléctrica de 2-7 dS/m (Inglese et al., 2018; Jorge et al., 2025; Prisa, 2021). Como cualquier planta suculenta, es xerófita, perenne, con metabolismo ácido crasuláceo (CAM). Durante las noches sus raíces fibrosas, amplias y superficiales absorben el rocío que recubre el suelo y permiten que el agua se introduzca al tallo a través de un movimiento ascendente. Asimismo, se asocian con bacterias nitrificantes y micorrizas; además del nitrógeno asimilan fósforo, agua y nutrientes, lo que permite incluso una mejora en los suelos (Scheinvar, 2009).

La clasificación taxonómica del nopal de Castilla, según Bakewell-Stone (2022), es la siguiente: Dominio: *Eukaryota*; Reino: *Plantae*; Phylum: *Spermatophyta*; Subphylum: *Angiospermae*; Clase: *Dicotyledonae*; Orden: *Caryophyllales*; Familia: *Cactaceae*; Género: *Opuntia*; Especie: *ficus-indica*.

En México, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) describe al nopal de Castilla de la siguiente manera:

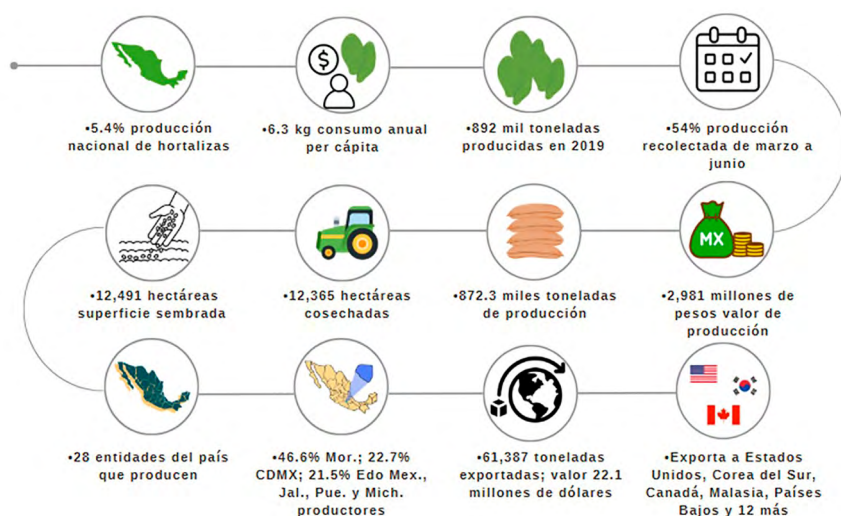
*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., 1768, también acepta como sinónimos a *Opuntia undulata*, *Cactus ficus-indica* u *Opuntia ficus-barbarica*. Es una

planta que se presenta como arbusto o arbórea, comúnmente con troncos bien desarrollados. Los tallos miden de 20 a 50 cm de largo por 20 a 30 cm de ancho, son de color verde opaco y están cubiertos por una capa cerosa. Los cladodios son verdes elípticos. Se caracteriza por carecer de espinas, pero cuando están presentes tienen entre 2 a 7, blanquecinas y no sobrepasan el centímetro de largo. Presenta flores de color amarillo, aunque en ocasiones de color naranja. Los frutos exhiben una variedad de colores desde rojizos a verdoso, pasando por el rosa, anaranjado o amarillo y raramente con espinas (Conabio, 2018).

El nopal verdura se ha convertido en un factor clave en la alimentación, salud y la calidad de vida de la sociedad mexicana debido a su alto contenido en nutrientes, minerales, fibra, vitaminas y compuestos bioactivos como ácidos orgánicos, carotenoides, compuestos volátiles, lípidos, betalainas, compuestos polifenólicos y esteroides. Por ello, es una planta de gran importancia cultural y económica en el país; algunos datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2023) que lo ejemplifican se presentan en la figura 7.2.

Además, podemos enlistar diversos estudios *in vivo*, *in vitro* y clínicos que le confieren a *Opuntia* propiedades como antioxidante, antiinflamato-

Figura 7.2. Cifras oficiales hasta el año 2022 referentes al nopal verdura

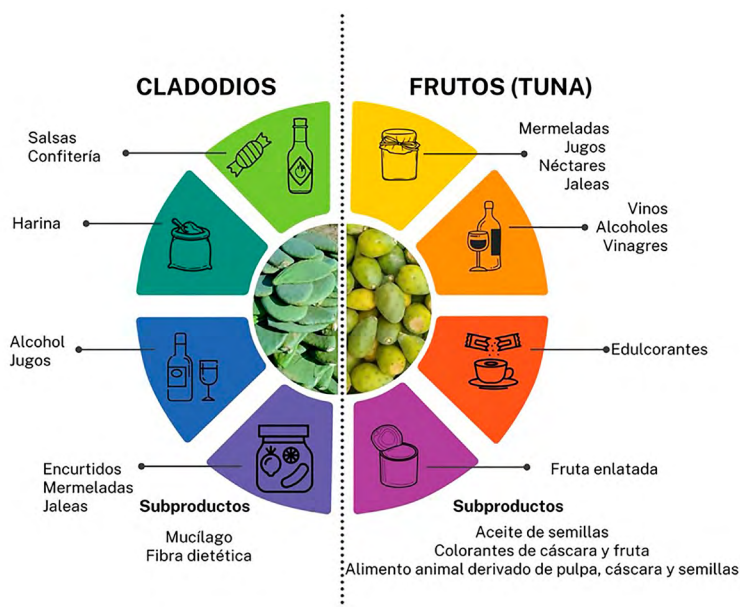


Fuente: elaboración propia con datos de SIAP (2023).

rio, antiulcerogénico, diurético, analgésico, antidiarréico, antibacteriano, antiviral, antihipercolesteronémico, antígenotóxico y antiproliferativo; útil en el manejo de hipoglucemia, heridas de la piel y obesidad; preventivo contra enfermedades cardiovasculares arteroescleróticas, fotoenvejecimiento o afectaciones en la infertilidad humana; en tratamientos de pérdida de peso y de salud ósea, y con capacidad quimiopreventiva, neuroprotectora, citotóxica y anticarcinogénica (Giraldo-Silva et al., 2023; Guedes et al., 2023; Ha et al., 2024; Kaur, 2012; Madrigal-Santillán et al., 2022; Monteiro et al., 2023; Silva et al., 2021; Shoukat et al., 2023). En consecuencia, se han formulado numerosos productos a base de *Opuntia*, principalmente de *O. ficus-indica*, para comercializar estos beneficios; algunos de ellos se presentan en la figura 7.3 (Giraldo-Silva et al., 2023; Ha et al., 2024; Mondragón y Chessa, 2018; Sáenz et al., 2013).

En contraparte, la producción y el manejo de los cultivos de nopal generan entre cuatro y ocho toneladas por hectárea al año de residuos orgánicos, los cuales suelen apilarse en el suelo sin ningún tratamiento y con-

Figura 7.3. Productos y subproductos obtenidos de *Opuntia ficus-indica*



Fuente: elaboración propia a partir de Madrigal-Santillán et al. (2022) y Giraldo-Silva et al. (2023).

tribuyen así a la producción de gases de efecto invernadero (Quintanar-Orozco, 2021). Se ha estimado que, si el cultivo de nopal se expandiera hacia suelos ociosos y con bajos niveles de fertilidad, esta generación de residuos alcanzaría los doce millones de toneladas anuales (Carrillo-Verástegui et al., 2024).

### **Economía circular de la biomasa a través de la biotecnología**

Los principios de la economía circular pueden aplicarse exitosamente a los residuos agroindustriales, en particular a través de la biotecnología. Esta disciplina ofrece procesos sostenibles para recuperar nutrientes que de otro modo se perderían, mientras se mitiga la contaminación ambiental que representan. Además, los procesos basados en el cultivo de biomasa se consideran sostenibles porque se llevan a cabo a temperaturas y presiones cercanas a las ambientales, permiten obtener una alta selectividad de los productos y pueden ofrecer productos de alto valor agregado, entre otras ventajas. Por ejemplo, los procesos biotecnológicos pueden agregar valor a residuos tales como cáscaras, orujos y semillas generados en las industrias de frutas y verduras; lo anterior evita pérdidas nutricionales y económicas, ya que estos desechos son ricos en compuestos bioactivos valiosos tales como enzimas, aceites y vitaminas, entre otros. Estos compuestos bioactivos también se pueden integrar a medios para el cultivo de microorganismos; específicamente, la biotecnología fúngica permite utilizar como sustratos una amplia variedad de residuos agroindustriales en sustitución de azúcares refinados, lo que es aún más interesante puesto que este tipo de medios no compite con el consumo humano directo de alimentos.

Por otra parte, la digestión anaerobia de residuos orgánicos es una herramienta biotecnológica clave para la economía circular, ya que permite transformar residuos en recursos valiosos como biogás y fertilizantes naturales. Este proceso microbiano no solo reduce la disposición de residuos en vertederos o rellenos sanitarios, sino que también promueve la producción de energía renovable —y, por ende, la seguridad energética—, así como el cierre de ciclos de nutrientes.



## Las biorrefinerías y la economía circular

Una biorrefinería se basa en el procesamiento sustentable de la biomasa para obtener un espectro amplio de productos comercializables y energía (Cervantes et al., 2020). Tomando como modelo las refinerías petrolíferas convencionales, el objetivo de una biorrefinería es el aprovechamiento óptimo de los componentes de la biomasa mediante un enfoque integrado; sin embargo, a diferencia de aquéllas, la materia prima de las biorrefinerías es muy variada, y busca que este procesamiento tenga la menor huella ambiental posible. Este modelo ha surgido como un enfoque sostenible y una plataforma prometedora para producir bienes a partir de cultivos comestibles (como la caña de azúcar), biomasa residual (residuos agrícolas o municipales), cultivos no comestibles o algas, a través de muy variadas tecnologías (térmicas, químicas o biotecnológicas). La capacidad de las biorrefinerías para generar múltiples productos, a partir de fuentes limitadas de materia prima permite cerrar ciclos materiales, lo que las posiciona como piezas clave dentro de las estrategias de la economía circular (Cervantes et al., 2020).

En los países del sur global, el concepto de biorrefinerías basadas en residuos resulta especialmente relevante, debido a la carga ambiental y económica que representa la disposición controlada de residuos, o la inexistencia de esta práctica. Además, estas biorrefinerías ofrecen una solución viable para satisfacer la creciente demanda energética, al tiempo que promueven la creación de nuevos negocios, mercados laborales, y mejoras en la salud pública y el entorno local.

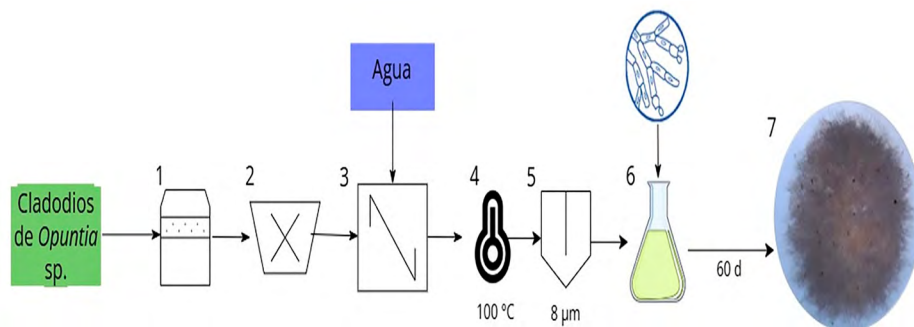
## Resultados

### Uso de harina de *Opuntia* para el cultivo de gránulos fúngicos

En medios líquidos, los hongos filamentosos pueden crecer como micelio disperso o en forma de gránulos. Estos últimos han sido objeto de numerosas investigaciones, ya que, gracias a su gran área superficial y a su potencial degradativo, tienen aplicaciones en procesos de tratamiento del agua

(Legorreta-Castañeda et al., 2020). Por ello, la formulación de nuevos medios de cultivo de bajo costo que cumplan con los requerimientos nutricionales para la granulación de hongos reviste un interés particular. Así, con harina de *O. heliabravoana*, preparada a partir de cladodios secos y triturados, se preparó una suspensión acuosa (3 g/L) que primero se mantuvo a 100 °C con agitación esporádica por tres minutos. Posteriormente, la suspensión se dejó reposar hasta que se formaron dos fases; la fase superior se hizo pasar a través de papel filtro (8 mm) y se utilizó como medio de cultivo para la granulación de una cepa fúngica modelo (*Aspergillus tabacinus*), como se muestra en la figura 7.4 (Legorreta-Castañeda, 2021).

Figura 7.4. Descripción gráfica del cultivo de gránulos fúngicos a partir de harina de *Opuntia heliabravoana*. 1: Secado; 2: molienda; 3: mezcla; 4: calentamiento a 100 °C; 5: filtración; 6: inoculación; 7: cultivo de gránulos fúngicos



Fuente: elaboración propia.

El medio de cultivo se caracterizó antes y tras la obtención de los gránulos fúngicos, lo cual ocurrió seis días después de la inoculación. Los parámetros medidos fueron materia orgánica, fosfatos totales y varios oligoelementos (magnesio, manganeso, sodio, potasio, hierro, cobre y zinc). Se comprobó que el medio de cultivo aportó cantidades suficientes de los nutrientes evaluados, ya que ninguno de ellos se consumió por completo (Legorreta-Castañeda, 2021).

La recuperación del valor nutricional de *O. heliabravoana* en este medio de cultivo permitió obtener gránulos fúngicos de *A. tabacinus*, que luego se emplearon eficientemente en procesos de biosorción de oro y plata presentes en bajas concentraciones (Legorreta-Castañeda et al., 2022).

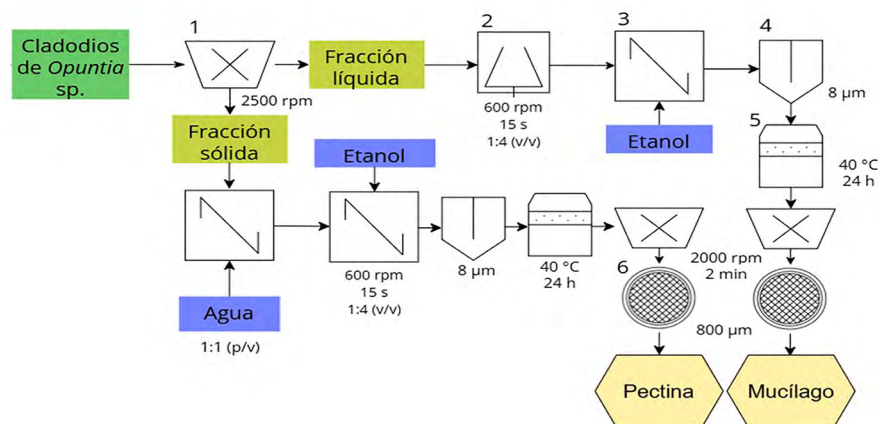
Este proceso, con aplicación prometedora en la remediación de efluentes de la minería, puede realizarse a partir de un medio de cultivo de bajo costo y que, por añadidura, no compite con el consumo humano de alimentos, ya que *O. heliabravoana* no es una especie comestible. Por ello, se solicitó la patente del procedimiento de preparación de este medio al Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (MX/A/2023/000485; Lucho-Constantino et al., 2023). Queda por investigar si otras especies de *Opuntia* producen medios de cultivo con valores nutrimentales semejantes, y confirmar si el medio de cultivo producido a partir de *O. heliabravoana* favorece la granulación de otras cepas fúngicas.

### Extracción de pectina y mucílago

La pectina y el mucílago son hidrocoloides de alto peso molecular, cuya capacidad de retener agua posibilita la supervivencia de las especies de *Opuntia* en ambientes áridos y semiáridos; esta y otras características de ambos compuestos se aprovechan ampliamente en la industria. La pectina es una mezcla de ácidos poligalacturónicos coloidales, solubles en agua, que varían en su grado de neutralización y proporción de grupos éster metilo (Rodríguez et al., 2003). Por su parte, el mucílago es un polímero formado por azúcares como L-arabinosa, D-galactosa, L-ramnosa y D-xilosa, y también por ácido galacturónico (Luna-Zapién et al., 2023). Tanto la pectina como el mucílago se encuentran en las paredes celulares de los vegetales.

En la figura 7.5 se presenta el proceso de obtención de pectina y mucílago a partir de los cladodios de *Opuntia* sp.; durante la molienda se separan la fracción líquida y la sólida para extraer el mucílago y la pectina, respectivamente. La fracción líquida se homogeniza (600 rpm, 15 s) para disminuir su viscosidad y después se centrifuga (5000 rpm, 5 min); el sobrenadante se mezcla con etanol (1:4 v/v) agitando (600 rpm, 15 s), se deja reposar a temperatura ambiente (24 h, 20-25 °C) y luego se filtra (8 µm). Del líquido filtrado se recupera posteriormente el etanol por destilación, mientras que el sólido se seca (40 °C, 24 h), tritura y tamiza (800 µm) para homogenizar el tamaño de partícula del producto final, que es el mucílago.

Figura 7.5. Proceso para la extracción de pectina y mucilago a partir de cladodios de *Opuntia* sp. 1: Molienda; 2: centrifugación; 3: mezcla; 4: filtración; 5: secado; 6: tamizado



Fuente: elaboración propia.

Para la extracción de pectina, la fracción sólida que resulta de la molienda de los cladodios frescos se mezcla con agua (1:1 p/v) y después con etanol (1:4 v/v) agitando (600 rpm, 15 s), y finalmente se filtra (8 µm); el líquido filtrado se conserva para recuperar el etanol, y el sólido (la pectina) se seca (40 °C, 24 h), tritura y tamiza (800 µm). Vale la pena mencionar que el proceso anterior se encuentra protegido bajo el título de patente No. 421655 (Lucho-Constantino et al., 2019a).

La pectina obtenida presentó un grado de esterificación de 99.48%. El contenido de glucanos varió de 9.9 a 15.5%, el de xilanos de 7.4 a 13%, el de residuos insolubles de 3.6 a 4.1% y el de azúcares reductores fue de 32.2 g/L. De acuerdo con el análisis elemental, los contenidos de C, H, O y N fueron 30, 4.4, 0.63 y 64.8%, respectivamente, mientras que las proporciones de humedad, cenizas y proteína fueron 5.7, 28.1 y 73%, respectivamente. Estos resultados indicaron que la pectina tenía un alto grado de metoxilación, que le confiere la capacidad de formar geles cuando se mezcla con azúcares (sacarosa, fructosa, glucosa) en medio ácido, lo cual favorece su uso en la producción de alimentos ácidos y azucarados, como mermeladas, jugos y jarabes de cítricos, o conservas de mermeladas ácidas, entre otros. El recubrimiento de fármacos que desarrollan su actividad en

medios ácidos es otra aplicación de las pectinas con alto grado de metoxilación (Ciriminna et al., 2016; Qiu y Park, 2001).

El mucílago obtenido no presentó glucanos, pero sí xilanos (15.4-23.5%) y arabanos (0-13.4%); el contenido de humedad y de cenizas fueron 3.9 y 14.4%, respectivamente, y el de azúcares reductores, 29.6 g/L. Es común que los componentes del mucílago de opuntias varíen ampliamente no solo entre especies y con la edad de la planta, sino también por las características de los suelos y las condiciones climáticas (Stintzing y Carle, 2005), y a estos factores se le suman las condiciones del método de extracción. No obstante, los valores encontrados en este estudio se encuentran dentro de los intervalos reportados por Luna-Zapién et al. (2023). Según estos autores, entre las aplicaciones que se han probado experimentalmente para el mucílago de opuntias están las siguientes: estabilizante (en mayonesa, malvaviscos y huevo deshidratado), material de microencapsulación (de zeaxantina, antocianinas, betalainas y pulpa de tuna amarilla-naranja), nutracéutico (en galletas y pan) y material de recubrimiento (nopal verdura, manzana, higo, moras, tomate y rebanadas de plátano deshidratadas).

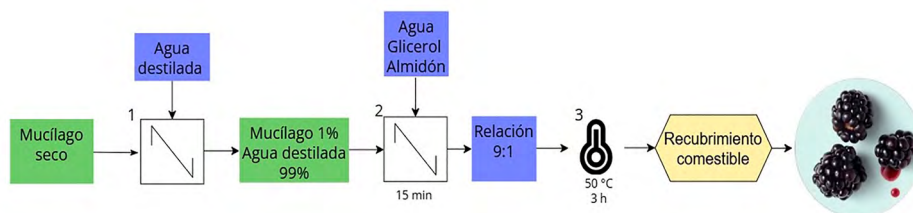
El método patentado por nuestro grupo de trabajo presenta ahorros significativos en recursos como agua, reactivos químicos, energía eléctrica y tiempo, que se traducen en un menor impacto ambiental. Por ejemplo, el pretratamiento de la biomasa consiste únicamente en una reducción de tamaño, a diferencia de otros métodos que usan grandes cantidades de agua, calientan o congelan los cladodios, o ajustan el pH del medio (Goyocolea y Cárdenas, 2003); también se han usado enzimas, agua en condiciones subcríticas, microondas y ultrasonido (Adetunji et al., 2017; Luna-Zapién et al., 2023). El etanol es el único reactivo empleado en nuestro proceso y se recupera por destilación para reutilizarse. También es importante resaltar que en nuestro caso los cladodios se aprovechan para obtener tanto pectina y mucílago. Si bien el rendimiento del mucílago es bajo (2.7% en base seca), el de la pectina es alto (53% en base seca) comparado con los rendimientos de 20-30% reportados a nivel industrial (Ciriminna et al., 2016).

## Producción de películas comestibles

Las películas comestibles son materiales con los que se recubren alimentos para extender su vida útil, y que pueden ser ingeridos en conjunto con estos. Estas películas, al estar elaboradas a partir de materiales naturales y biodegradables, funcionan como barrera contra agentes externos, evitan que los alimentos pierdan componentes importantes (agua, gases o solutos) y representan una alternativa sustentable a los empaques plásticos convencionales. Así, en nuestro grupo de trabajo se elaboraron películas comestibles utilizando como materia prima el mucílago extraído de *O. heliabravoana* Scheinvar. Por una parte, se seleccionó esta especie forrajera de nopal con la intención de evitar la competencia con cultivos alimentarios; por la otra, se empleó un enfoque de biorrefinería, ya que se evaluó el potencial energético de los residuos generados en el proceso, para promover el aprovechamiento integral de la biomasa en las zonas en que ésta abunda.

Se partió de mucílago seco, preparado según lo expuesto en la sección anterior. Luego, se preparó una suspensión de mucílago al 1% con agua destilada, que se mezcló en una proporción 9:1 con almidón termoplástico, preparado con almidón, glicerol y agua (Nájera-García et al., 2018). Tras un calentamiento a 50 °C por tres horas y su posterior enfriamiento, se obtuvo una mezcla con la que se recubrieron zarzamoras frescas. El procedimiento se presenta en la figura 7.6. Tanto la materia prima como el producto se analizaron mediante distintos parámetros fisicoquímicos (pérdida de peso, pH, acidez titulable, sólidos solubles, color, crecimiento de levaduras y aceptación sensorial) durante su almacenamiento, lo que permitió su comparación.

Figura 7.6. Preparación de películas comestibles a partir de mucílago de *Opuntia heliabravoana* Scheinvar. 1-2: Mezcla; 3: calentamiento a 50 °C por tres horas



Fuente: elaboración propia.

Observamos que las películas comestibles contribuyeron significativamente a la preservación de las características organolépticas y fisicoquímicas del fruto, disminuyendo la pérdida de peso y el crecimiento microbiano; asimismo, mejoraron la apariencia y vida útil del producto (Nájera-García et al., 2018). Los residuos (sólidos y líquidos) generados en el proceso también se caracterizaron, y se determinó su potencial energético mediante la determinación de parámetros como la demanda química y bioquímica de oxígeno (DQO y DBO<sub>5</sub>), y su contenido de nutrientes. A partir de estos datos, se simuló su aprovechamiento en una planta de biodigestión anaerobia, lo que evidenció su factibilidad para la producción de biogás y fertilizantes orgánicos, cerrando así el ciclo de aprovechamiento integral bajo el concepto de biorrefinería. Pudimos corroborar que esta aplicación del mucílago de *Opuntia* promueve el uso de materiales renovables y locales, reduce la dependencia de plásticos derivados del petróleo para la conservación de alimentos, plantea un esquema viable de aprovechamiento de residuos, y contribuye a un modelo circular sustentable.

### Producción de biofertilizante y biogás

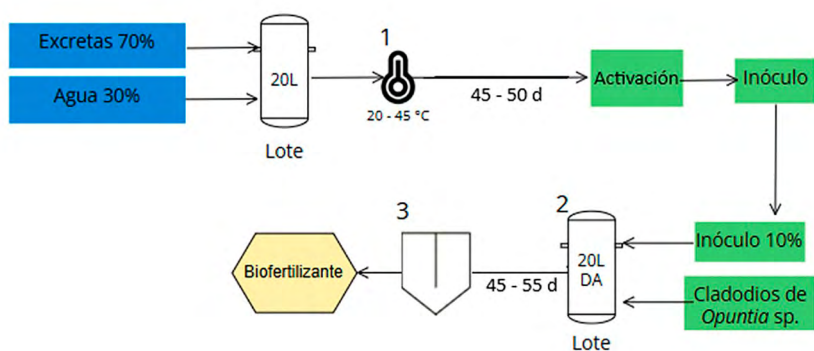
Los biofertilizantes son productos de origen biológico que aportan nutrientes o microorganismos benéficos para el crecimiento de los cultivos. Una de las principales características que tienen estos productos es la disponibilidad de los nutrientes en formas más asimilables para las plantas (Rodríguez-Martínez et al., 2022). El desarrollo tecnológico que se describe en esta sección es objeto de la patente MX 426410 B, y consiste en la producción de un biofertilizante producido a partir de *Opuntia* spp. mediante el proceso de digestión anaerobia (DA), en el cual la materia orgánica se degrada mediante la acción de microorganismos en ausencia de oxígeno. El resultado de esta degradación es un producto líquido que contiene nutrientes esenciales para los cultivos y puede aplicarse por vía foliar como bioestimulante o directamente en el suelo como mejorador (Lucho-Constantino et al., 2019b).

En este proceso se utilizaron como sustrato los residuos que resultaron de la poda de *Opuntia* spp.; para ello se seleccionaron cladodios con entre tres y 24 meses de edad. El pretratamiento de la biomasa solo consistió en

cortar los cladodios de un tamaño que permitiera alimentarlos a una trituradora, lo cual contrasta con la mayoría de los procesos reportados, que al pretratar térmica o enzimáticamente la biomasa, son más complejos y costosos. Este proceso se distingue en que no es necesario adicionar agua ni ajustar el pH del reactor con algún reactivo químico. El agua necesaria proviene de la humedad de los cladodios de *Opuntia* (85 al 95%), lo que es relevante en zonas áridas y semiáridas, y el pH del proceso se autorregula (6.5-8.0), gracias a lo cual el proceso es sencillo y de bajo costo.

En la figura 7.7 se describe el proceso de producción de biofertilizante de acuerdo con lo reportado en la patente MX 426410 B (Lucho-Constantino et al., 2019b). El primer paso es la activación del inóculo, para lo cual se alimenta el reactor con excretas animales frescas, preferentemente de conejos, que luego se cubren con agua. A la tapa del recipiente se le coloca un sistema *airlock* para impedir que el gas producido escape y que ingrese el aire atmosférico. El reactor debe mantenerse cerrado a una temperatura entre 20 y 45 °C durante un periodo de 45 a 50 días.

Figura 7.7. Producción de biogás y biofertilizante a partir de residuos de *Opuntia* spp.  
1: Activación del inóculo; 2: alimentación del digestor; 3: separación y obtención del biofertilizante.



Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, para la producción de biofertilizante el reactor se alimenta con una mezcla de nopal triturado y el inóculo previamente preparado (a razón de entre 10 y 20% del volumen de la mezcla). El reactor se cierra herméticamente y en el tubo superior de salida se conecta una bolsa

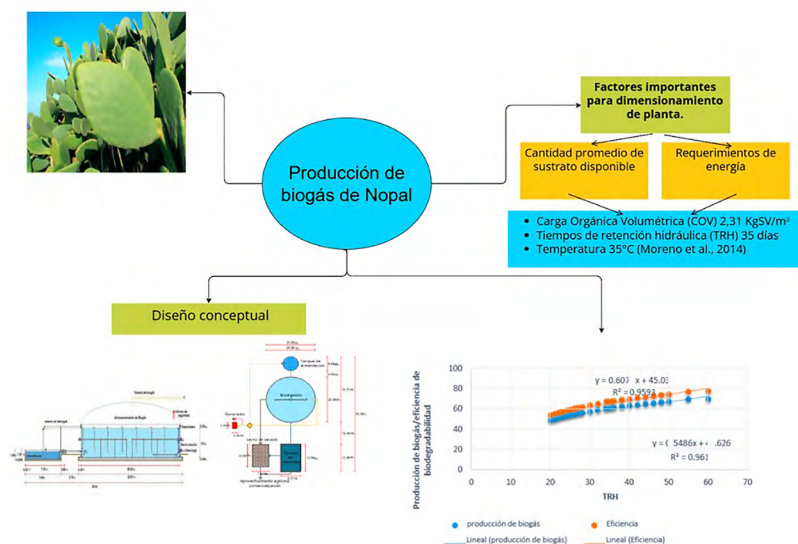


en la que se almacenará el biogás producido durante el proceso de DA. El tiempo mínimo para la DA es de 45 a 55 días a una temperatura de 20 a 45 °C. Una vez finalizada la digestión, el biofertilizante líquido se separa de los sólidos que quedan en el fondo del reactor y se almacena en recipientes opacos a temperatura ambiente (entre 15 a 30 °C).

El biofertilizante producido a partir de *Opuntia* spp. contiene nutrientes fácilmente asimilables por las plantas, las cuales pueden aprovecharlos hasta en un 90%; este valor es muy superior al típico de un fertilizante químico (entre el 10 al 20% de los nutrientes aplicados). Asimismo, el pH ácido del biofertilizante contribuye a que los nutrientes se mantengan solubles y por lo tanto asimilables. Cabe mencionar que el biofertilizante tiene contenidos medios de nitrógeno total (0.7 g/L), altos contenidos de Ca, Mg, K (mayores de 1 g/L), así como de carbono orgánico total (3 g/L), lo que lo hace ideal como mejorador de suelo. Por añadidura, presenta una buena calidad microbiológica, por lo que su uso es seguro para cualquier cultivo y forma de aplicación (foliar o al suelo). El biofertilizante obtenido promueve y estimula el crecimiento, la floración y el enraizamiento de los cultivos. En tomate verde (*Physalis ixocarpa*), el biofertilizante, combinado con biochar, permitió reducir a la mitad la cantidad de fertilizante químico empleado, adelantó la floración, incrementó significativamente la altura de las plantas y el peso de los frutos, además de favorecer un mayor desarrollo radicular. También se observaron mejoras en algunas propiedades del suelo como la densidad aparente, la capacidad de retención de agua, el contenido de materia orgánica y la disponibilidad de fósforo, potasio, cobre, hierro y zinc. En el caso de la cebada, con la aplicación de biofertilizante al 15% incrementó la altura de la planta, el peso de la espiga, el número de grano y el rendimiento del cultivo.

*Opuntia* spp. es ideal para procesos de DA en medio líquido, ya que por sus contenidos de agua (85% al 95%) y materia seca (5-15%) permite generar un combustible gaseoso rico en metano o hidrógeno. En la figura 7.8 se muestra el diseño conceptual de una planta de digestión anaerobia que emplea residuos de nopal para generar 1 MWh/año con una eficiencia mayor al 78% en la producción de biogás con un contenido de 75% de metano (Quintanar-Orozco et al., 2016); igualmente, se muestran los factores a considerar en el dimensionamiento de la planta, que se realizó con el pro-

Figura 7.8. Factores a considerar en el escalamiento de un proceso de producción de biogás usando residuos de nopal (1 MWH/año)



Fuente: elaboración propia.

grama Biodigestor-Pro versión 3.5 (Grupo AquaLimpia Constructores, Alemania) (Moncayo, 2013).

## Integrando experiencias y posibilidades sobre el uso de *Opuntia* como biomasa emergente bajo un esquema de biorrefinería

*Opuntia* spp. representa una fuente de biomasa altamente eficiente en el uso del agua, ideal para biorrefinerías en zonas áridas y semiáridas (Neupane et al., 2024; Niechayev et al., 2023). Es un cultivo adaptado a condiciones climáticas extremas, y su notable productividad anual —que puede alcanzar entre 3 y 50 Mg de materia seca por hectárea— así como su baja demanda hídrica, la convierten en una alternativa valiosa frente a cultivos C<sub>3</sub> o C<sub>4</sub> convencionales (Borland et al., 2009). Desde la perspectiva de una biorrefinería, como ya se destacó al inicio de este trabajo, *Opuntia* spp. ofrece numerosos productos que pueden ser aprovechables, a los que pueden agre-

garse compuestos bioactivos (betalaínas, antioxidantes), aceites de semillas con potencial nutracéutico y cosmético (Ciriminna et al., 2017), jugo de nopal cristalino con alto contenido de mucílago (Quintanar-Orozco y Lucho-Beltrán, 2023), entre muchos otros productos. Igualmente, su uso ha sido demostrado en la producción de bioenergía (biogás rico en metano o hidrógeno, bioetanol), biopolímeros y compuestos activos con actividad antimicrobiana e insecticida (Belay et al., 2021; Cenobio-Galindo et al., 2019; Quintanar-Orozco et al., 2018; Slot y Fort, 2024).

La implementación de una biorrefinería de *Opuntia* spp. es viable técnica, económica y ambientalmente: se han validado procesos escalables de extracción y transformación de cladodios y residuos para biogás —con rendimientos de hasta  $\sim 9720 \text{ m}^3/\text{ha}\cdot\text{año}$ —, y opciones de reciclaje del digestato como fertilizante orgánico (Quintanar-Orozco et al., 2018). Adicionalmente, *Opuntia* contribuye a la mitigación de gases de efecto invernadero a través del secuestro de carbono y la reducción de residuos orgánicos (Ciriminna et al., 2017; Cushman et al., 2015). Por tanto, resulta estratégico fomentar políticas públicas orientadas a instalar biorrefinerías basadas en esta biomasa local, promoviendo así economías circulares y resiliencia climática en regiones áridas de México.

Quintanar-Orozco (2021) propuso un modelo de biorrefinería basado en *O. heliabravoana* sustentado en datos experimentales generados a escala laboratorio, el cual fue escalado a nivel industrial mediante simulación de procesos. Esta propuesta contempla dos procesos eficientes para la obtención de cuatro productos de alto valor agregado como la pectina, mucílago, biofertilizante y biogás. El primer proceso se basa en la DA para la producción de biogás y biofertilizante (Quintanar-Orozco et al., 2018), mientras que el segundo consiste en una secuencia de operaciones unitarias mecánicas para la extracción de mucílago y pectina, empleando exclusivamente etanol grado alimenticio (96°) como solvente (Lucho-Constantino et al., 2019a; *vid.* la figura 7.5).

Para esta propuesta de biorrefinería se evaluaron aspectos tecnológicos, energéticos y ambientales mediante el uso de herramientas como SimaPro y GREENSCOPE. Los resultados indicaron que el etanol constituye el insumo con mayor impacto ambiental, dada su utilización intensiva en los procesos de extracción de mucílago y pectina. Desde la

perspectiva de sostenibilidad, los indicadores evaluados mostraron un desempeño favorable en las áreas de eficiencia material, energética y ambiental. En cuanto al análisis económico, los indicadores oscilaron entre el 40% y el 90%, lo que sugiere oportunidades de optimización en los procesos. Asimismo, se estimó un tiempo de retorno de inversión de aproximadamente un año, lo cual respalda la viabilidad económica de esta biorrefinería para la producción y comercialización de los bioproductos propuestos (Quintanar-Orozco, 2021; Aguilar Huesca et al., 2022).

Por otra parte, en este trabajo se propone integrar a la biorrefinería de Quintanar-Orozco et al. (2021) el uso de la harina de *Opuntia* para la obtención de gránulos fúngicos (*vid.* figura 7.4; Lucho-Constantino et al., 2023), implementar el uso del mucílago de nopal para la elaboración de películas comestibles (*vid.* figura 7.6; Nájera-García et al., 2018), y un nuevo proceso para la producción de biogás y biofertilizante en reactores por lote (Lucho-Constantino et al., 2019b). En la figura 7.9 se muestra la nueva propuesta de biorrefinería de *Opuntia* spp., la cual integra los procesos mencionados y que fueron realizados por el Cuerpo Académico de Biotecnología y Microbiología Ambientales (UAEH-CA-82) con la finalidad de incrementar las opciones de productos que pueden producirse bajo un esquema de economía circular.

Sin embargo, es importante mencionar que los nuevos procesos integrados (elaboración de gránulos fúngicos, la utilización del mucílago para la elaboración de biopelículas comestibles y la producción de biogás y biofertilizante) aún deben ser evaluados en conjunto con la nueva biorrefinería de *Opuntia* spp. en aspectos tecno-económicos, energéticos y ambientales para determinar la factibilidad de su escalamiento a nivel industrial. Lo anterior representa una oportunidad para desarrollar una estrategia prometedora a nivel nacional y mundial para el aprovechamiento sostenible de este cultivo, contribuyendo a la valorización de sus bioproductos y a la promoción de una bioeconomía circular local en zonas áridas y semiáridas.

[illegible]

Fuente: elaboración propia.

## Conclusiones y perspectivas

Este trabajo posiciona a *Opuntia* spp. como una plataforma biotecnológica estratégica para zonas áridas y semiáridas por su abundancia, composición química y resistencia a la sequía, debido a lo cual representa una alternativa viable para articular esquemas de economía circular en México. A través del aprovechamiento de esta planta o sus residuos, se desarrollaron productos de valor agregado como medios de cultivo fúngico, pectina, mucílago, películas comestibles, biofertilizantes y biogás mediante procesos técnica y ambientalmente viables, lo que confirma su versatilidad como materia prima dentro del modelo de biorrefinería. En particular, se destaca el proceso desarrollado para obtener pectina y mucílago, ya que es competitivo en cuanto al rendimiento de pectina con respecto a otros procesos que usan *Opuntia* spp. e incluso con respecto a otros que emplean materias primas convencionales. Las experiencias de nuestro cuerpo académico, algunas de

las cuales han sido patentadas, además de evitar la competencia con su consumo alimentario, muestran un enfoque sustentable, con bajo requerimiento energético y alta eficiencia en la recuperación de recursos. Se puso en evidencia el potencial de estas aplicaciones para su implementación a escala real, la cual podría incorporar a otras opuntias no comestibles, tales como *O. albicarpa*, *O. hyptiacantha*, *O. megacantha* u *O. streptacantha*. Igualmente, propusimos una biorrefinería que integra estas experiencias, cuya factibilidad de escalamiento a nivel industrial aún debe demostrarse.

En perspectiva, los hallazgos de este estudio abren diversas líneas de acción estratégicas para consolidar y expandir el modelo de biorrefinerías basadas en *Opuntia* spp. Entre ellas, destaca la posibilidad de escalar y regionalizar esta tecnología hacia otras zonas áridas y semiáridas de México y, en general, del sur global, adaptándola a las particularidades ecológicas y socioeconómicas locales. Este esfuerzo debe ir acompañado del diseño e implementación de políticas públicas que fomenten incentivos gubernamentales y esquemas de financiamiento orientados a fortalecer estas iniciativas como parte de una agenda más amplia de resiliencia climática y desarrollo rural sustentable. Al mismo tiempo, resulta crucial continuar con la optimización de los procesos de extracción, especialmente aquellos que utilizan etanol, a fin de minimizar su huella ambiental. Asimismo, la diversificación de productos derivados —con aplicaciones potenciales en los sectores nutracéutico, cosmético y de biomateriales— representa una vía prometedora para incrementar la rentabilidad y competitividad del modelo. La articulación con cadenas de valor locales, mediante la incorporación de comunidades productoras, no solo fortalece las economías territoriales, sino que también impulsa modelos de negocio más inclusivos y justos. Finalmente, la consolidación de vínculos entre la academia, los centros de investigación y el sector productivo permitirá acelerar la transferencia tecnológica y la innovación aplicada. En conjunto, estas perspectivas respaldan la integración de *Opuntia* spp. en estrategias nacionales de adaptación al cambio climático y en la transición hacia una economía circular y resiliente.

## Referencias

- Adetunji, L. R., Adekuhle, A., Orsat, V. y Raghavan, V. (2017). Advances in the pectin production process using novel extraction techniques: A review. *Food Hydrocolloids*, 62, 239-250. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.08.015>
- Aguilar-Huesca, J. A., Quintanar-Orozco, E. T., Beltrán-Hernández, R. I. y Lucho-Constantino, C. A. (2022). Biorrefinería de *Opuntia* para obtener bioproductos y biocombustibles en zonas áridas y semiáridas: Estudios de caso. En *Convergencia de la ciencia: Una visión multidisciplinaria* (pp. 73-79). Colegio de Ciencias y Artes de Tabasco.
- Bakewell-Stone, P. (2022). *Opuntia ficus-indica* (prickly pear) [Conjunto de datos]. *CABI Compendium*. <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.37714>
- Belay, J. B., Habtu, N. G., Ancha, V. R. y Hussen, A. S. (2021). Alkaline hydrogen peroxide pretreatment of cladodes of cactus (*Opuntia ficus-indica*) for biogas production. *Heliyon*, 7(9), e08002. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08002>
- Borland, A. M., Griffiths, H., Hartwell, J. y Smith, J. A. C. (2009). Exploiting the potential of plants with crassulacean acid metabolism for bioenergy production on marginal lands. *Journal of Experimental Botany*, 60(10), 2879-2896. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp118>
- Carrillo-Verástegui, K. A., Poggi-Varaldo, H. M. y Escamilla-Alvarado, C. (2024). Transformando la industria del nopal: Biorrefinerías y el camino hacia la bioeconomía circular. *Revista CienciaUANL*, 27(126), 46-53. <https://doi.org/10.29105/cienciauanl.27.126.6>
- Cenobio-Galindo, A. J., Pimentel-González, D. J., Del Razo-Rodríguez, O. E., Medina-Pérez, G., Carrillo-Inungaray, M. L., Reyes-Munguía, A. y Campos-Montiel, R. G. (2019). Antioxidant and antibacterial activities of a starch film with bioextracts microencapsulated from cactus fruits (*Opuntia oligacantha*). *Food Science and Biotechnology*, 28(5), 1553-1561. <https://doi.org/10.1007/s10068-019-00586-9>
- Cervantes, G., Torres, L. G. y Ortega, M. (2020). Valorization of agricultural wastes and biorefineries: A way of heading to circular economy. En R. Salomone, A. Cecchin, P. Deutz, A. Raggi y L. Cutaia (Eds.), *Industrial symbiosis for the circular economy: Strategies for sustainability* (pp. 181-194). Springer.
- Ciriminna, R., Delisi, R., Albanese, L., Meneguzzo, F. y Pagliaro, M. (2017). *Opuntia ficus-indica* seed oil: Biorefinery and bioeconomy aspects. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 119(8), 1700013. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201700013>
- Ciriminna, R., Fidalgo, A., Delisi, R., Ilharco, L. M. y Pagliaro, M. (2016). Pectin production and global market. *Agro Food Industry Hi-Tech*, 27(5), 17-20.
- Conabio (2018). Nopal de castilla (*Opuntia ficus-indica*). *EncicloVida*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <https://enciclovida.mx/especies/145108-opuntia-ficus-indica>
- Coronado-Flores, V., Tornero-Campante, M. A., Núñez-Tovar, R., Jaramillo-Villanueva, J. L. y De Jesús Méndez-Gallegos, S. (2015). Productividad de cochinilla *Dactylopius*

- coccus (Hemiptera: Dactylopiidae) en cladodios de *Opuntia ficus-indica* (Cactacea) con diferentes tratamientos de fertilización. *Acta Zoológica Mexicana*, 31(2), 183-189. <https://doi.org/10.21829/azm.2015.312539>
- Cushman, J. C., Davis, S. C., Yang, X. y Borland, A. M. (2015). Development and use of bioenergy feedstocks for semi-arid and arid lands. *Journal of Experimental Botany*, 66(14), 4177-4193. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv087>
- Giraldo-Silva, L., Ferreira, B., Rosa, E. y Dias, A. C. P. (2023). *Opuntia ficus-indica* fruit: A systematic review of its phytochemicals and pharmacological activities. *Plants*, 12(3), 543. <https://doi.org/10.3390/plants12030543>
- Goyocolea, F. M. y Cárdenas, A. (2003). Pectins from *Opuntia* spp: A short review. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 5, 17-29. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v5i.302>
- Guedes, B. N., Fathi, F., Silva, A. M., Santini, A., Oliveira, M. B. P. P. y Souto, E. B. (2023). Biopharmaceutical applications of *Opuntia ficus-indica*: Bibliometric map, bioactivities and extraction techniques. *European Food Research and Technology*, 249(10), 2457-2469. <https://doi.org/10.1007/s00217-023-04314-w>
- Ha, Q. T. T., Nguyen, K. K., Le, A. N., Vu, H. T. y Nguyen, T. N. (2024). *Opuntia ficus-indica* (L.): An overview of the recent application and opportunities in food. *Tropical Journal of Natural Product Research*, 8(1). <https://doi.org/10.26538/tjnpr/v8i1.3>
- Inglese, P., Liguori, G. y de la Barrera, E. (2018). Ecofisiología y biología reproductiva del nopal. En P. Inglese, C. Mondragón, A. Nefzaoui, C. Sáenz, M. Taguchi, H. Makkar, y M. Louhaichi (Eds.), *Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal* (pp. 31-44). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Jorge, A. O. S., Costa, A. S. G., Ferreira, D. M. y Oliveira, M. B. P. P. (2025). Seasonal variation in nutritional and chemical profiles of wild *Opuntia ficus-indica* fruits. *Plants*, 14(3), 409. <https://doi.org/10.3390/plants14030409>
- Kaur, M. (2012). Pharmacological actions of *Opuntia ficus indica*: A review. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 2(7), 15-18. <https://doi.org/10.7324/japs.2012.2703>
- Legorreta-Castañeda, A. J., Lucho-Constantino, C. A., Coronel-Olivares, C., Beltrán-Hernández, R. I. y Vázquez-Rodríguez, G. A. (2022). Biosorption of precious metals present at dilute concentrations on fungal pellets. *Processes*, 10(4), 645. <https://doi.org/10.3390/pr10040645>
- Legorreta-Castañeda, A. J. (2021). *Biominería de Au y Ag por gránulos fúngicos en efluentes de la industria minera* [Tesis de doctorado]. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Legorreta-Castañeda, A. J., Lucho-Constantino, C. A., Beltrán-Hernández, R. I., Coronel-Olivares, C. y Vázquez-Rodríguez, G. A. (2020). Biosorption of water pollutants by fungal pellets. *Water*, 12(4), 1155. <https://doi.org/10.3390/w12041155>
- Lucho-Constantino, C. A., Beltrán-Hernández, R. I., Coronel-Olivares, C., Vázquez-Rodríguez, G. A., Legorreta-Castañeda, A. J. y García-Reyes, M. (2023). *Medio de cultivo elaborado a partir de opuntia para obtener gránulos fúngicos*. Solicitud de Patente de México MX/a/2023/000485. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.
- Lucho-Constantino, C. A., Beltrán-Hernández, R. I. y Quintanar Orozco, E. T. (2019a).



- Proceso de extracción de pectina y mucílago a partir de cladodios de Opuntia spp.* Patente de México MX 421655 B. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.
- Lucho-Constantino, C. A., Beltrán-Hernández, R. I., Ortega-Ramírez E. y Cruz-Méndez A.S. (2019b). *Proceso para la producción de biofertilizante a partir de Opuntia spp.* Patente de México MX 426410 B. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.
- Luna-Zapién, E. A., Zegbe, T. A., Meza-Velázquez, J. A. y Minjares-Fuentes, R. (2023). Mucílago de nopal (*Opuntia spp.*) y su aplicación como aditivo alimentario: Una visión general. *Revista de Fitotecnia Mexicana*, 46(1), 51-61. <https://doi.org/10.35196/rfm.2023.1.51>
- Madrigal-Santillán, E., Portillo-Reyes, J., Madrigal-Bujaidar, E., Sánchez-Gutiérrez, M., Izquierdo-Vega, J. A., Izquierdo-Vega, J., Delgado-Olivares, L., Vargas-Mendoza, N., Álvarez-González, I., Morales-González, Á. y Morales-González, J. A. (2022). *Opuntia spp.* in human health: A comprehensive summary on its pharmacological, therapeutic and preventive properties. Part 2. *Plants*, 11(18), 2333. <https://doi.org/10.3390/plants11182333>
- Moncayo, R. G. (2013). *Biodigestores: dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás*. Aqualimpia Engineering e. K., pp. 86-112. <https://www.aqualimpia.com/biodigestores/e-books-manuales/>
- Mondragón, C. y Chessa, I. (2018). Recursos genéticos de nopal. En P. Inglese, C. Mondragón, A. Nefzaoui, C. Sáenz, M. Taguchi, H. Makkar y M. Louhaichi (Eds.), *Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal* (pp. 45-52). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Monteiro, S. S., Almeida, R. L., Santos, N. C., Pereira, E. M., Silva, A. P., Oliveira, H. M. L. y De Bittencourt-Pasquali, M. A. (2023). New functional foods with cactus components: Sustainable perspectives and future trends. *Foods*, 12(13), 2494. <https://doi.org/10.3390/foods12132494>
- Nájera-García, A. I., López-Hernández, R. E., Lucho-Constantino, C. A. y Vázquez-Rodríguez, G. A. (2018). Towards drylands biorefineries: Valorisation of forage *Opuntia* for the production of edible coatings. *Sustainability*, 10(6), 1878. <https://doi.org/10.3390/su10061878>
- Neupane, D., Niechayev, N. A., Petrusa, L. M., Heinitz, C., Cushman, J. C. (2024). Biomass production of 14 accessions of cactus pear (*Opuntia spp.*) under semi-arid land conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 210(3), e12704. <https://doi.org/10.1111/jac.12705>
- Niechayev, N. A., Mayer, J. A. y Cushman, J. C. (2023). Developmental dynamics of crasulacean acid metabolism (CAM) in *Opuntia ficus-indica*. *Annals of Botany*, 132(4), 869-879. <https://doi.org/10.1093/aob/mcad070>
- Ochoa, M. J. y Barbera, G. (2018). Historia e importancia agroecológica y económica. En P. Inglese, C. Mondragón, A. Nefzaoui, C. Sáenz, M. Taguchi, H. Makkar y M. Louhaichi (Eds.), *Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal* (pp. 1-11). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Prisa, N. D. (2021). *Opuntia ficus-indica* the key plant in climate change: Characteristics,

- cultivation and uses. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 17(2), 94-105. <https://doi.org/10.30574/gscbps.2021.17.2.0333>
- Qiu, Y. y Park, K. (2001). Environment-sensitive hydrogels for drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 53, 321-339.
- Quintanar-Orozco, E. T. y Lucho-Beltrán, I. (2023). *Proceso para la obtención de jugo de nopal cristalino con alto contenido de mucílago*. Solicitud de patente de México MX/a/2023/012014. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.
- Quintanar-Orozco, E. T. (2021). *Valoración de residuos de Opuntia spp. mediante un esquema de biorrefinería* [Tesis de doctorado]. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Quintanar-Orozco, E. T., Vázquez-Rodríguez, G. A., Beltrán-Hernández, R. I., Lucho-Constantino, C. A., Coronel-Olivares, C., Montiel, S. G. e Islas-Valdez, S. (2018). Enhancement of the biogas and biofertilizer production from *Opuntia heliabravoana* Scheinvar. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 28403-28412.
- Quintanar-Orozco, E. T., Augspach, C., Beltrán-Hernández, R. I., Jaimes-Núñez, E. I., Vázquez-Rodríguez, G. A., Cornejo-Oviedo, F. M., Coronel-Olivares, C., Lucho-Constantino, C. A. (2016). Diseño conceptual de una planta de digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de residuos de nopal. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 3(6). <https://doi.org/10.29057/icbi.v3i6.578>
- Rodríguez, S. E., Sandoval, A. E. y Ayala, A. A. (2003). Hidrocoloides naturales de origen vegetal. Investigaciones recientes y aplicaciones en la industria de alimentos. *Tecnura*, 13, 4-13.
- Rodríguez-Martínez, D. A., Lucho-Constantino, C. A., Martínez-Ortiz, J. A., Sánchez-Contreras, M. I., López-Pérez, P. A. y Beltrán-Hernández, R. I. (2022). El biochar y los biofertilizantes como tecnologías emergentes agroecológicas. En *Convergencia de la ciencia: una visión multidisciplinaria* (pp. 65-72). Colegio de Ciencias y Artes de Tabasco.
- Sáenz, C., Berger, H., Rodríguez-Félix, A., Galletti, L., Corrales García, J., Sepúlveda, E., Varnero, M. T., García de Cortázar, V., Cuevas-García, R., Arias, E., Mondragón, C., Higuera, I. y Rosell, C. (2013). *Agro-industrial utilization of cactus pear*. Food and Agriculture Organization.
- Scheinvar, L. (2009). Subfamilia Opuntioideae (Cactaceae). En A. Lot y Z. Cano-Santana (Eds.), *Biodiversidad del Pedregal de San Ángel* (pp. 143-152). Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel / UNAM, Coordinación de la Investigación Científica.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2020). *El nopal, parte de la riqueza del campo mexicano*. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/el-nopal-parte-de-la-riqueza-del-campo-mexicano>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2020). *La riqueza del nopal*. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/la-riqueza-del-nopal?idiom=es>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2023). *¿Y el nopal ingresó en la dieta simbólica y real de los mexicanos?* <https://www.gob.mx/siap/articulos/y-el-nopal-ingreso-en-la-dieta-simbolica-y-real-de-los-mexicanos>
- Shoukat, R., Cappai, M., Pia, G. y Pilia, L. (2023). An updated review: *Opuntia ficus indica*

- (OFI) chemistry and its diverse applications. *Applied Sciences*, 13(13), 7724. <https://doi.org/10.3390/app13137724>
- Silva, M. A., Albuquerque, T. G., Pereira, P., Ramalho, R., Vicente, F., Oliveira, M. B. P. P. y Costa, H. S. (2021). *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.: A multi-benefit potential to be exploited. *Molecules*, 26(4), 951. <https://doi.org/10.3390/molecules26040951>
- Slot, L. E. y Fort, F. (2024). Drivers of adoption of sustainable prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) innovations and conservation agriculture by smallholder farmers in Morocco. *Agronomy*, 14(12), 3014. <https://doi.org/10.3390/agronomy14123014>
- Stintzing, F. C. y Carle, R. (2005). Cactus stems (*Opuntia* spp.): A review on their chemistry, technology, and uses. *Molecular Nutrition & Food Research*, 49(2), 175-194. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200400071>
- Tahiri, A., Aabd, N. A., Qessaoui, R., Mimouni, A. y Bouharroud, R. (2025). Genetic diversity and breeding of cactus (*Opuntia* spp.). En J. M. Al-Khayri, S. M. Jain y M. A. Wani (Eds.), *Breeding of ornamental crops: Potted plants and shrubs* (Advances in Plant Breeding Strategies, vol. 7; pp. 153-193). Springer.
- Zouitane, I., Ferioun, M., Bouamri, K., Derraz, K., Koraichi, S. I., Idbella, M., Lingua, G. y Ghachtouli, N. E. (2025). Comparative assessment of physicochemical properties, functional diversity and enzymatic activities in three *Opuntia ficus-indica* soils across diverse climatic regions in Morocco. *Scientific African*, 28, e02663. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e02663>