

TRANSFORMANDO LA INDUSTRIA DEL NOPAL:

BIORREFINERÍAS Y EL CAMINO HACIA LA BIOECONOMÍA CIRCULAR

Kenia Aylín Carrillo-Verástegui*, Héctor M. Poggi-Varaldo**,
Carlos Escamilla-Alvarado*

* Universidad Autónoma de Nuevo León, Apodaca, México.

**CINEVESTAV-IPN Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México.

Contacto: carlos.escamillalv@uanl.edu.mx; kenia.carrillovrs@uanl.edu.mx;
lazarillodetormes1001@gmail.com



El nopal es una planta emblemática de México, presente en la cultura del país desde la gastronomía hasta la arqueología; es un símbolo nacional y de identidad mexicana. Por nopal (en inglés como *prickly pear* o cactus, y chumbera en España) se le conoce indistintamente a una gran variedad de especies y géneros de cactáceas, la más común, comestible y de mayor nivel económico en el mundo, conocida por su nombre científico, es *Opuntia ficus-indica*. Las pencas –o cladodios jóvenes– y la tuna son alimentos muy nutritivos y el conocimiento tradicional mexicano les ha atribuido beneficios medicinales para tratar la arteriosclerosis, la diabetes, la gastritis y la hiperglucemia (Aruwa et al., 2019). Por su constitución, son fuente renovable de materias primas de alto valor agregado: carbohidratos, antioxidantes y pigmentos. Adicionalmente, su transformación en biocombustibles y fertilizantes es posible y deseable ante la necesidad de encontrar alternativas de energía y de nutrientes orgánicos (Quintanar-Orozco et al., 2018).

Debido a sus diversas aplicaciones, esta planta multifacética sería una excelente propuesta para convertirse en un cultivo aprovechable mediante su procesamiento exhaustivo utilizando el concepto de biorrefinería.





DISTRIBUIDO POR TODO EL MUNDO

Esta planta, originaria de Mesoamérica, crece en todo el planeta, especialmente en América Latina, el Mediterráneo, África, Medio Oriente, Australia e India, gracias a que necesita poca agua, soporta el calor y puede crecer en suelos pobres o secos (Stintzing y Carle, 2005). En América es posible encontrarlo desde Canadá hasta la Patagonia. Aunque México es el mayor consumidor en el mundo, Brasil se destaca en su eficiente cosecha y principal utilidad como forraje.

En México se han determinado 93 especies de *Opuntia* silvestres y ocho de *Nopalea*, de las cuales 62 son endémicas, con lo que se sugiere que este territorio es el centro de origen del

género (Scheinvar *et al.*, 2011). Las zonas semiáridas del país, especialmente en el norte, ocupan 3 millones de hectáreas con suelos de baja calidad, pero con especies que pueden usarse como alimento o forraje (Financiera Rural, 2011).

El uso comercial (forraje, verdura y tuna) abarca 75,489 hectáreas (SIAP, 2022), que generan 65 toneladas de pencas y de cuatro a ocho de desechos por hectárea al año. Si su cultivo se expandiera abarcando las tierras ociosas y los terrenos áridos y con bajos niveles de fertilidad, habría un incremento de hasta 200 millones de toneladas de pencas y 12 millones de toneladas de residuos anuales.

DE NOPALES A ENERGÉTICOS

Dado que *Opuntia* es una biomasa rica en carbohidratos, se ha convertido en biometano, biohidrógeno y bioetanol, algunos de los bioenergéticos más populares. Carrillo-Verástegui *et al.* (2022) reportaron por primera vez la producción de hidrógeno a partir de tres tipos de *Opuntia* y determinaron que se podía obtener biometano de su biomasa previamente sometida a extracción de compuestos fenólicos. Aunque se obtiene menos bioetanol que de la caña de azúcar y la remolacha azucarera, su uso como bioenergético se justifica al no competir con su uso en alimentos debido al subaprovechamiento de la superficie disponible para su siembra, además de los residuos que se generan de su cosecha.



EL NOPAL COMO FUENTE DE PRODUCTOS NATURALES BIOACTIVOS

Opuntia ha sido una fuente de antioxidantes, pectina, mucílago y bioadsorbente. Se le han atribuido propiedades antiproliferativas, neuroprotectoras y hepatoprotectoras. Los antioxidantes más reportados para *O. ficus-indica* son el ácido gálico, quercetina, isorhamnetina y kaempferol (Aruwa *et al.*, 2019). Por su parte, los flavonoides son compuestos de alto valor agregado ya que actualmente se pueden

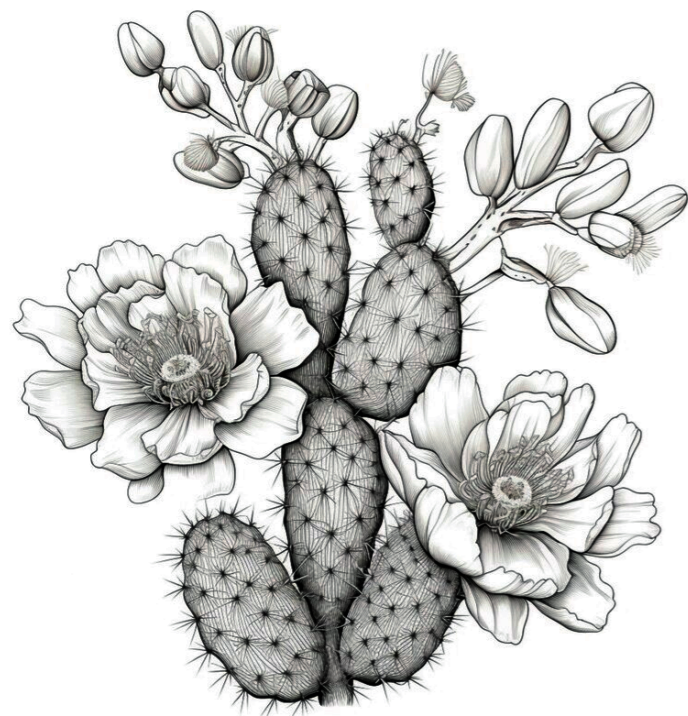
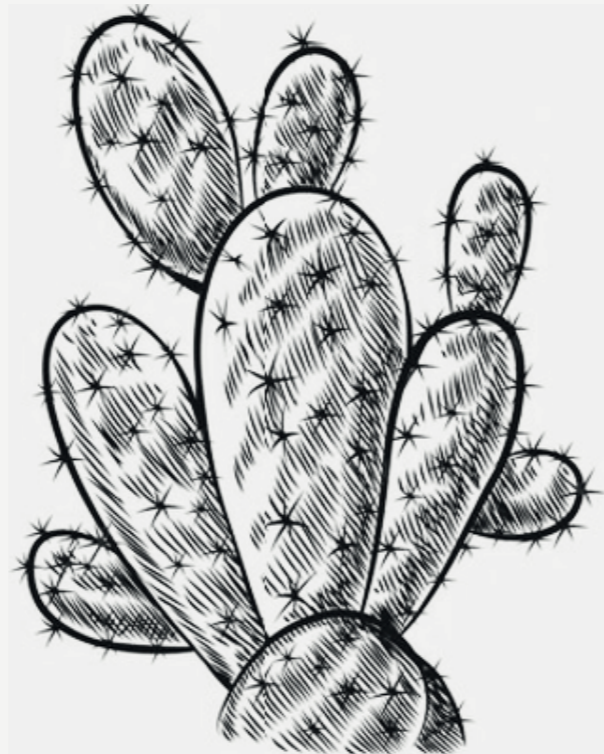
encontrar en cápsulas a manera de suplemento alimenticio, un ejemplo son las tabletas de 500 mg de quercetina que pueden costar \$800 pesos mexicanos las 60 unidades. Adicionalmente, los cladodios proveen vitaminas, carotenoides y ácidos orgánicos: oxálico y málico (Stintzing y Carle, 2005).

DE LA ECONOMÍA LINEAL A LA BIORREFINERÍA DE NOPAL

Por su composición y características, presenta un gran potencial de uso como sustrato de biorrefinerías, es decir, "instalaciones versátiles dedicadas al uso eficiente y a la transformación exhaustiva de la biomasa en un espectro de bioproductos" (Rodríguez-Valderrama, 2018), y de su incorporación al concepto de bioeconomía circular, que a su vez consiste en el aprovechamiento holístico de los recursos naturales biomásicos, disminuyendo el desperdicio, minimizando impactos ambientales y maximizando la eficiencia en el uso de recursos (García-Bucio *et al.*, 2022).



El avance más relevante en este sentido es la propuesta teórica de Margain Sato Matsumoto (2019), la cual busca convertir al nopal y la tuna en materias primas de una cadena productiva que permite la obtención simultánea de fruto deshidratado para consumo humano, jugos y el aprovechamiento de los residuos en aceites, pectina, betanina, mucílago, biogás y fertilizante. En nuestro grupo de investigación también se ha avanzado notablemente en aspectos importantes sobre la biorrefinería. Ávila-Lara (2019) propuso el uso de hidrolizados de *Opuntia* en la generación de ácido succínico y recuperar oxalato decalcio.



Además, Carrillo-Verástegui et al. (2022) han explorado la extracción de compuestos con propiedades antioxidantes y la manufactura de metano e hidrógeno. Por otro lado, Villela-Buenrostro (2018) realizó estudios de factibilidad ambiental utilizando análisis de ciclo de vida. Estos trabajos evaluaron la viabilidad técnica y ambiental de estrategias integrables a la biorrefinerías de nopal, considerando imperativo el evitar la competencia por recursos naturales con la agricultura alimentaria.

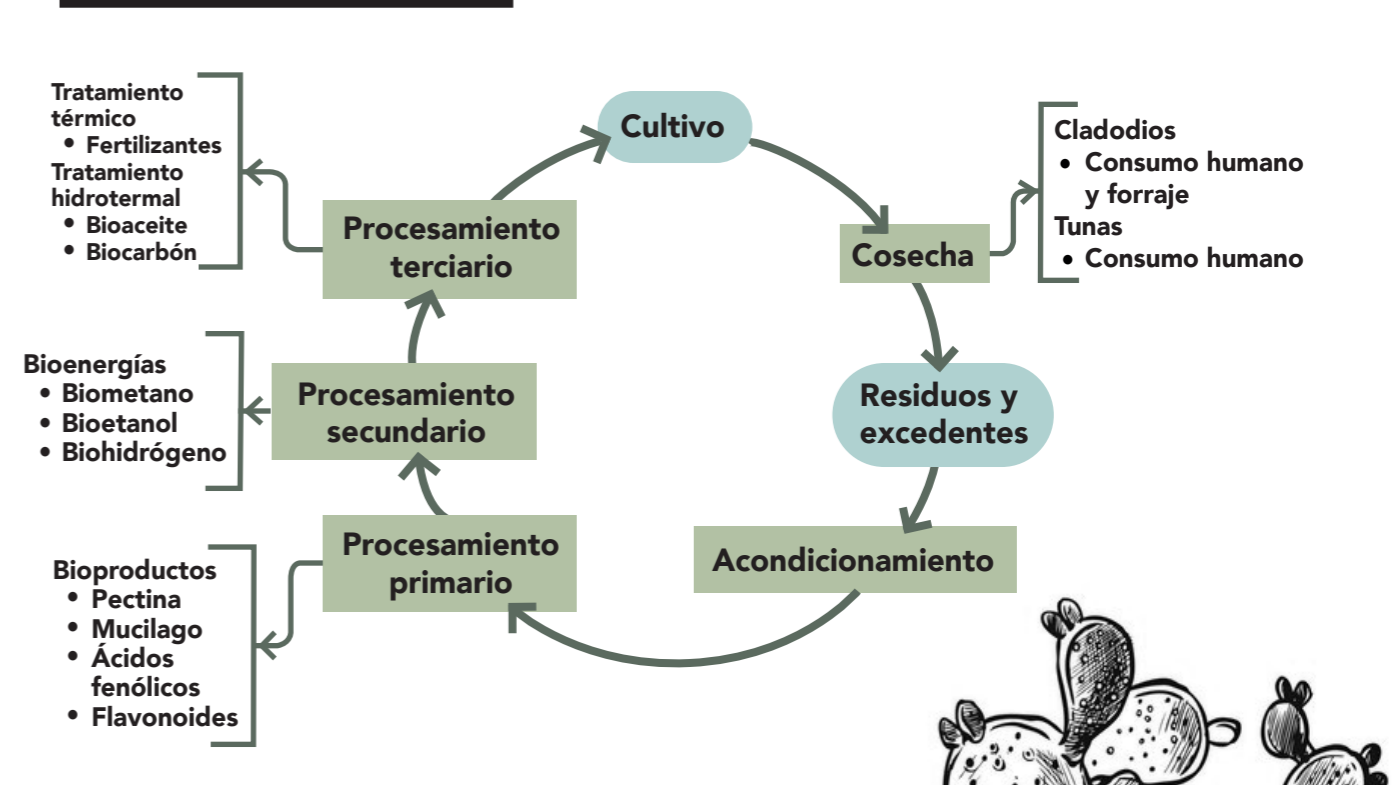
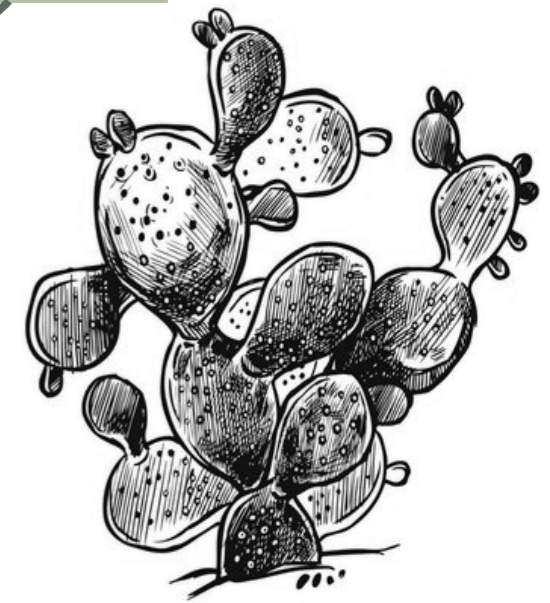


Figura 1. Circularidad del aprovechamiento del nopal.



La figura 1 muestra el enfoque de circularidad aplicado al aprovechamiento exhaustivo del nopal. La misma hace énfasis en la necesidad de utilizar primordialmente los cladodios y tunas para consumo humano, cuyos excedentes y residuos se valorizarán en bioproductos y bioenergéticos por medio de una sucesión de procesamientos hasta la obtención de fertilizantes y biocarbón, que se reintegran al sitio de cultivo y de esta manera cerrar el ciclo productivo. Es pertinente resaltar que se requiere evaluar fehacientemente la sostenibilidad de estos modelos, tomando en cuenta los aspectos ambientales, económicos y sociales, así como sus relaciones intrínsecas y con la bioeconomía circular (Nallapaneni et al., 2023).

El análisis bibliométrico de las palabras “*O. ficus-indica*”, “bioeconomía” y “biorrefinerías” señala que su novedad es tal que a nivel científico sólo existe un reporte que los aplica conjuntamente al aceite de las semillas de la tuna (Ciriminna *et al.*, 2017). El análisis de otros trabajos que relacionan dos de las tres palabras, muestra que éstos se centran en una sola parte de la planta (tuna o cladodios), en unos cuantos subproductos (ácidos orgánicos, solventes, antioxidantes), bienergéticos (metano) o residuos (hidrolizados), sin tomar en cuenta la necesidad de valorización holística de *Opuntia*.

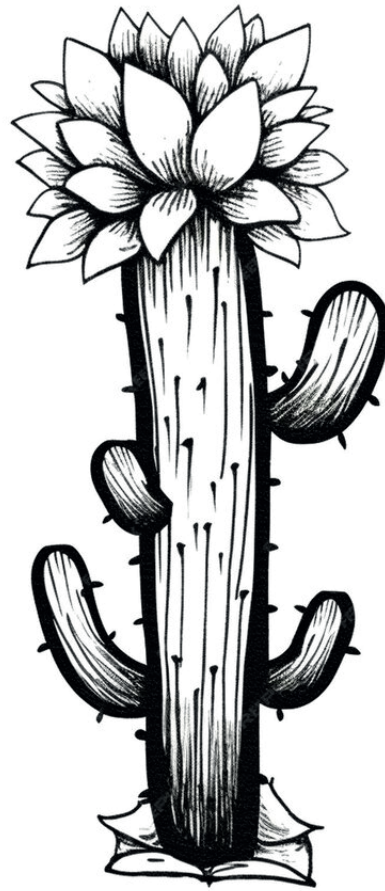
REFLEXIONES FINALES

El nopal es un recurso versátil y valioso con diversos usos en la industria alimentaria, la medicina, la generación de bioenergía y la conservación del medio ambiente. Sus subproductos pueden competir exitosamente con aquéllos provenientes de fuentes fósiles. Su cultivo de bajo consumo de agua es adaptable a tierras áridas, semiáridas, en desuso o descuidadas. Su integración en la bioeconomía circular mediante biorrefinerías es virtualmente viable considerando que su siembra se realice preferentemente en áreas donde se evite competir con las tierras agrícolas destinadas a la producción de alimentos.

REFERENCIAS

Aruwa, C.E., Amoo, S.O., y Kudanga, T. (2019). Phenolic compound profile and biological activities of Southern African *Opuntia ficus-indica* fruit pulp and peels, *Lwt*, 111(May), 337-344, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.028>
 Ávila-Lara, A.I. (2019). *Evaluación del bagazo de Agave tequilana Weber variedad azul y de Opuntia ficus-indica en pretratamientos químicos y enzimáticos para su aplicación en la producción de ácido succínico*, Universidad Autónoma de Nuevo León.

Carrillo-Verástegui, K.A., Escamilla-Alvarado, C., Escárcega-González, C.E., *et al.* (2022). Biohydrogen potential assessment of *Opuntia* spp.: Effect of inoculum-to-substrate ratio and residual biomass evaluation, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(70), 30085-30096, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.138>
 Ciriminna, R., Delisi, R., Albanese, L., *et al.* (2017). *Opuntia ficus-indica* seed oil: Biorefinery and bioeconomy aspects, *European Journal of Lipid Science and Technology*, 119(8), 1-5, <https://doi.org/10.1002/ejlt.201700013>



Financiera Rural. (2011). *Monografía del nopal y la tuna*, <https://www.yumpu.com/es/document/read/17605434/monografia-del-nopal-y-la-tuna-financiera-rural>

García-Bucio, P., Sotelo-Navarro, P.X., Poggi-Valardo, H.M., *et al.* (2022). Indicadores de la bioeconomía circular para el aprovechamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38, 78-92, <https://doi.org/10.20937/RICA.54350>

Margain Sato Matsumoto, P.K. (2019). *Estudio sobre la viabilidad técnica de biorrefinerías de Opuntia ficus-indica*, Universidad de Sevilla. Nallapaneni, M.K., Haque, M.A., y Patwary, S. (2023). It Is Time to Synergize the Circularity of Circular Bioeconomy with Sustainability and Resiliency Principles, *Sustainability (Switzerland)*, 15(16), <https://doi.org/10.3390/su151612239>

Quintanar-Orozco, E.T., Vázquez-Rodríguez, G.A., Beltrán-Hernández, R.I., *et al.* (2018). Enhancement of the biogas and biofertilizer production from *Opuntia heliabravoana* Scheinvar, *Environmental Science and Pollution Research*, 25(28), 28403-28412, <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2845-x>

Rodríguez-Valderrama, S. (2018). *Enfoque de biorrefinería para la producción de hidrógeno y metano a partir de residuos orgánicos*, Universidad Autónoma de Nuevo León.

Scheinvar, L., Olalde Parra, G., y Sule, D. (2011). *Especies silvestres de nopales Mexicanos*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología, Informe Final SNIB-Conabio, Proyecto No. GE005.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2022). *Anuario estadístico de la producción agrícola*, <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
 Stintzing, F.C., y Carle, R. (2005). Cactus stems (*Opuntia* spp.): A review on their chemistry, technology, and uses, *Molecular Nutrition and Food Research*, 49(2), 175-194. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200400071>
 Villela-Buenrostro, J.G. (2018). *Análisis de ciclo de vida de una planta de digestión anaerobia a partir de nopal para la generación de 1 MW de electricidad*, Instituto Politécnico Nacional.



Recibido: 27/11/2023
 Aceptado: 19/02/2024

Descarga aquí nuestra versión digital.

