

Caracterización nutricional de nopalitos (*Opuntia engelmannii*, *O. phaeacantha*, *O. macrocentra* y *O. ficus-indica*, Cactaceae) de la sierra de Samalayuca, Chihuahua, México

Nutritional characterization of nopalitos (*Opuntia engelmannii*, *O. phaeacantha*, *O. macrocentra*, and *O. ficus-indica*; Cactaceae) from the sierra de Samalayuca, Chihuahua, Mexico

José Valero-Galván¹ , Nina del Rocío Martínez-Ruiz¹ , Joaquín Rodrigo-García² ,
Raquel González-Fernández^{1*} 

¹ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ciencias Biomédicas, Departamento de Ciencias Químico-Biológicas, Avenida Benjamín Franklin 4650, Zona PRONAF, 32315, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

² Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ciencias Biomédicas, Departamento de Ciencias de la Salud, Avenida Benjamín Franklin 4650, Zona PRONAF, 32315, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

*Autor para correspondencia: raquel.gonzalez@uacj.mx

Fecha de recepción:
14 de enero de 2025

Fecha de aceptación:
1 de noviembre de 2025

Disponible en línea:
24 febrero de 2026

Este es un artículo en acceso abierto que se distribuye de acuerdo a los términos de la licencia Creative Commons.



Reconocimiento-
NoComercial-
CompartirIgual 4.0
Internacional
(CC BY-NC-SA 4.0)

Cómo citar:
Valero-Galván, J., Martínez-Ruiz, N. del R., Rodrigo-García, J., & González-Fernández, R. (2026). Caracterización nutricional de nopalitos (*Opuntia engelmannii*, *O. phaeacantha*, *O. macrocentra* y *O. ficus-indica*, Cactaceae) de la sierra de Samalayuca, Chihuahua, México. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 12, e0121012. <https://doi.org/10.30973/aap/2026.12.0121012>

RESUMEN

Los nopalitos son una fuente tradicional de alimento con potencial funcional y nutraceutico, pero existe poca información sobre sus propiedades en especies silvestres. El objetivo de este estudio fue caracterizar las propiedades morfológicas, físicas, químicas y antioxidantes en tres especies silvestres (*Opuntia engelmannii* Salm-Dyck de Engelm., *O. macrocentra* Engelm. y *O. phaeacantha* Engelm.) y una comercial [*O. ficus-indica* (L.) Miller]. Los nopalitos de las especies silvestres presentaron valores morfológicos bajos. En contraste, *O. ficus-indica* presentó altos contenidos en humedad, carbohidratos, clorofila *b* y azúcares reductores. *Opuntia engelmannii* y *O. macrocentra* destacaron por su contenido en materia seca, acidez titulable, proteína y cenizas; *O. phaeacantha*, por su contenido en compuestos fenólicos, y *O. macrocentra*, por la mayor actividad antioxidante (DPPH). Los nopalitos silvestres exhiben propiedades nutricionales y antioxidantes relevantes, lo que las convierte en especies con una fuente potencial de ingredientes funcionales y nutraceuticos.

PALABRAS CLAVE

Cladodios, fisicoquímica, proximal, fitoquímicos.

ABSTRACT

Nopalitos are a traditional food source with functional and nutraceutical potential, however limited information is available on their properties in wild species. The aim of this study was to characterize the morphological, physical, chemical, and antioxidant properties of three wild species (*Opuntia engelmannii* Salm-Dyck de Engelm., *O. macrocentra* Engelm. y *O. phaeacantha* Engelm.) and one commercial species [*O. ficus-indica* (L.) Miller]. Nopalitos from wild species exhibited low morphological values. In contrast, *O. ficus-indica* showed high contents of moisture, carbohydrates, chlorophyll *b*, and reducing sugars. *Opuntia engelmannii* and *O. macrocentra* stood out for their dry matter, titratable acidity, protein, and ash content; *O. phaeacantha* for its phenolic compound content; and *O. macrocentra* for its higher antioxidant activity (DPPH). Nopalitos from wild species exhibit relevant nutritional and antioxidant properties, making them a potential source of functional and nutraceutical ingredients.

KEYWORDS

Cladodes, physicochemical, proximal, phytochemical.

INTRODUCCIÓN

El género *Opuntia* perteneciente a la familia de las cactáceas, es diverso y ampliamente distribuido en el continente americano. México es uno de los países a nivel mundial que presenta la mayor diversidad de especies comerciales y silvestres con un registro de 126 (Santos Díaz et al., 2017).

Una de las especies domesticada y más cultivada en México es *O. ficus-indica* (L.) Mill., por lo que su composición química y valor nutricional han sido bien estudiados (Aragona et al., 2018). Los nopalitos de *O. ficus-indica* se usan como alimento y en la producción de jugos. Además, su consumo proporciona minerales, lípidos, proteínas y fibra dietética, los cuales podrían tener efectos sobre la salud de la población que los consume, principalmente relacionado con el alto contenido de compuestos antioxidantes, pigmentos, ácidos fenólicos, biopéptidos y fibras solubles (Albano et al., 2015; Mena et al., 2018; Santos Díaz et al., 2017). Asimismo, contienen compuestos con acción farmacológica (incluyendo emolientes y cicatrizantes de heridas, hipocolesterolémicos, inhibidores de ulceración de estómago, neuroprotectores, hipoglucémicos y antidiabéticos) (Abbas et al., 2022; Manzur-Valdespino et al., 2022; Tahri-Joutey et al., 2022). Sin embargo, muchas de estas propiedades se han estudiado en los nopalitos de *O. ficus-indica* y no en otras especies silvestres infrautilizadas de *Opuntia*, por lo que son necesarias más investigaciones (como la presente) para establecer la importancia y usos potenciales de estas especies.

En el desierto del estado de Chihuahua, México, se desarrollan abundantes especies catalogadas como silvestres del género *Opuntia* como *O. engelmannii* Salm-Dyck de Engelmann, *O. macrocentra* Engelm. y *O. phaeacantha* Engelm. (Núñez-Gastélum et al., 2018). En investigaciones previas, se encontró que las semillas de estas tres especies podrían ser una fuente importante de ácidos grasos poliinsaturados (Núñez-Gastélum et al., 2018); además, el análisis sensorial de sus frutos mostró un olor intenso y reducido dulzor con una ligera tendencia a la acidez. También, la pulpa de sus frutos mostró mayores contenidos de proteína, lípidos, fibra dietética, compuestos fenólicos, betacianinas, betaxantinas, betalainas y capacidad antioxidante en comparación con los frutos de *O. ficus-indica* (Valero-Galván et al., 2021).

Aunque los nopalitos de diversas especies de *Opuntia* son recolectados y consumidos por las poblaciones locales, existe poca información sobre sus propiedades fisicoquímicas, fitoquímicas y capacidad antioxidante. El objetivo de este estudio fue caracterizar las propiedades morfológicas, físicas, químicas y antioxidantes en tres especies silvestres (*O. engelmannii*, *O. macrocentra*, *O. phaeacantha*) y una comercial (*O. ficus-indica*) recolectadas en el municipio de Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Esta comparación busca identificar diferencias y similitudes entre especies silvestres y comerciales con el fin de evaluar el potencial de las especies silvestres como recurso alimenticio y funcional, contribuyendo a su aprovechamiento sostenible y a la diversificación de la dieta humana.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de recolección del material biológico

Las tres especies de *Opuntia* silvestres analizadas se colectaron en la sierra de Samalayuca, Ciudad Juárez, Chihuahua, México (31°39'36"-29°25'12" N, 109°02'24"-107°14'24" O). Los cladodios de *O. ficus-indica* se recolectaron en el Jardín Botánico Prof. Alberto Carballo del Parque Central Hermanos Escobar, Ciudad Juárez, Chihuahua, México (31°41'13.5" N, 106°25'39.9" O, 1,330 msnm). La zona presenta una precipitación pluvial anual de 208 mm y temperatura promedio de 18.3 °C. El clima se clasifica como muy seco, según Köppen que la identifica con el tipo Bwkw' (e'). La vegetación de esta región se conforma de matorrales del tipo microfila semiespinosos.

Se seleccionaron de forma aleatoria 20 plantas de cada una de las cuatro especies durante abril de 2021 y se escogieron aleatoriamente 10 cladodios terciarios (o de tercer orden de ramificación), los cuales se encontraban en su etapa de desarrollo joven; posteriormente, se separaron de la base inferior con la ayuda de una navaja. Los cladodios se colocaron de forma individual en bolsas de papel con la identificación de la especie y número de planta, luego se transportaron al laboratorio en cajas de cartón. Una vez allí, los cladodios se limpiaron con una solución de hipoclorito al 2 % (v/v) durante 2 min, se enjuagaron con agua corriente dos veces y una vez, con agua destilada para la eliminación de los residuos del hipoclorito de sodio y posibles

contaminantes. Los cladodios lavados se colocaron cuidadosamente en una tabla y se eliminaron las espinas con ayuda de un cuchillo.

Análisis morfológico de los cladodios

Para cada cladodio se registró el peso fresco usando una balanza digital (Apx-200, Denver Instrument, Goettingen, Alemania), la longitud, largo de la base y ancho utilizando un vernier digital (Digimatic ABSOLUTE SERIE 500-170-4, Mitutoyo México, Naucalpán de Juárez, México) (Pérez-Sánchez et al., 2015). Luego, se tomaron fotografías digitales de cada uno de los diez cladodios de las especies en estudio para medir el área y perímetro mediante el *software* de procesamiento de imágenes digitales ImageJ (Institutos Nacionales de Salud, Estados Unidos). Por último, se contaron el número de gloquidios de forma individual de cada uno de los cladodios.

Preparación de la muestra homogénea

Las muestras de los nopalitos de cada especie se colocaron en una bandeja de plástico que contenía 1 L de agua con una mezcla de 20 gotas de jabón y se colocaron en un agitador orbital (Orbit™ 1900, Labnet International, Iselin, Estados Unidos). En seguida se lavaron dos veces con agua destilada en las mismas condiciones que el paso anterior y se pusieron a escurrir en papel secante a 27 °C por una hora. Para minimizar la variación biológica individual y obtener valores promedios representativos, los cladodios de cada especie se combinaron para formar una muestra compuesta. Esta mezcla de cladodios se trituroó en fresco sin adición de agua en un homogeneizador (Osterizer® MAX, Oster®, Ciudad de México, México) a una velocidad baja en un inicio y posteriormente en su máxima velocidad durante 3 min. La mitad de la muestra se almacenó a -20 °C y la otra mitad se sometió a un proceso de liofilización. Finalmente, estas fueron almacenadas en bolsas plásticas sellables a -80°C.

Análisis fisicoquímico

El pH se determinó por el método de potenciómetro digital AOAC 945.27 (Helrich, 1990). De la muestra compuesta se pesaron 2 g y se colocaron en un vaso de

precipitado de 100 mL. A continuación, se agregaron en 20 mL de agua destilada. Enseguida se agitó la muestra manualmente hasta obtener una mezcla homogénea. Posteriormente, el pH se midió con un potenciómetro digital (Fisher Scientific México, Accumet® basic, Ciudad de México, México).

El contenido de humedad se determinó por medio del método de secado por estufa AOAC 964.22 (Helrich, 1990). De la muestra compuesta, se pesaron 2 g y se colocó en cápsulas de porcelana, puestas a peso constante previamente. Posteriormente se colocaron las muestras en la estufa (Lab-Line® Instruments, 3613, Melrose Park, Estados Unidos) a 105 °C por 24 h. Después, las muestras se retiraron de la estufa y se colocaron en un desecador por 45 min y posteriormente se registró el peso de cada una. La determinación del contenido de humedad se realizó mediante las ecuaciones propuestas por AOAC 964.22 (Helrich, 1990).

La determinación de la acidez titulable se realizó usando un potenciómetro digital (Fisher Scientific México, Accumet® basics AB15 Plus, Ciudad de México, México). Para ello, de la muestra compuesta se pesaron 2 g y se mezclaron con 20 mL de agua destilada. Enseguida, la solución se tituló con NaOH 0.1 N valorado (0.100777 N) hasta lograr un pH de 7 (Helrich, 1990). Para obtener el porcentaje de acidez titulable los resultados se reportaron como mililitros de ácido cítrico/100 g de muestra (0.006404 g) (Helrich, 1990).

El contenido de sólidos solubles totales se midió usando un refractómetro portable con una escala de 0-32 % (Sper Scientific, Sugar/Brix Refractometer 0-32 %, 300001, Scottsdale, Estados Unidos). De la muestra compuesta se pesaron 100 mg y se colocaron en un tubo de 5 mL, se agregó 2 mL de agua destilada, se maceraron con la ayuda de un pistilo hasta homogeneizar y se recuperó el homogeneizado en un microtubo de 2 mL con ayuda de una micropipeta. A continuación, el extracto se centrifugó a 15,000 g a 4 °C durante 5 min en una máquina centrífuga Eppendorf (5810R, Hamburgo, Alemania); el sobrenadante se recogió en un microtubo nuevo de 1.5 mL. A continuación, se colocaron 20 µL en el refractómetro portable y, a contraluz, se determinó el porcentaje de sólidos solubles totales de cada una de las muestras.

El contenido de cenizas se llevó a cabo por el método de incineración y calcinación en mufla AOAC

920.152 (Helrich, 1990). De la muestra compuesta, se pesaron 2 g y se colocaron en cápsulas de porcelana a peso constante. Enseguida las cápsulas se introdujeron en una mufla (Felisa®, FE-300, Zapopan, México) por 5 h a 550 °C. Finalizado el tiempo de calcinación, se esperó el descenso de temperatura de la muestra a 120-150 °C para colocarla en un desecador por 45 min; una vez terminado el tiempo, las muestras se pesaron (Helrich, 1990). El porcentaje de cenizas se calculó mediante las ecuaciones propuestas en la AOAC 920.152 (Helrich, 1990).

El contenido de proteínas se realizó por el método de Kjeldahl usando la metodología propuesta por la AOAC 940.25 (Helrich, 1990). De la muestra compuesta, se pesó 1 g y se colocó en un tubo de digestión Kjeldahl. Posteriormente se agregó 2 g de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (ACS, Acros Organics® Thermo Fisher Scientific, Fairlawn, Estados Unidos) (16.6 %) y Na_2SO_4 (ACS, Acros Organics® Thermo Fisher Scientific, Fairlawn, Estados Unidos) (83.4 %) y 10 mL de ácido sulfúrico concentrado (ACS, J.T. Baker®, Phillipsburg, Estados Unidos). El tubo se colocó en un digestor y se calentó a 300 °C hasta que todo el material fue carbonizado, posterior a esto se aumentó gradualmente la temperatura hasta 400 °C, cuando la mezcla tomó un color verde cristalino. Después, la muestra se dejó enfriar y se le agregó 20 mL de agua destilada hasta disolverla completamente. El tubo digestor se colocó en un sistema de destilación con salida de refrigerante (Labconco™, RapidStill II, 65200, Kansas City, Estados Unidos), se le agregó hidróxido de sodio (ACS, Acros Organics®, Thermo Fisher Scientific, Fairlawn, Estados Unidos) al 50 % y se dejó destilando por 5 min hasta que todo el amoníaco (aproximadamente 40 mL) pasara al matraz Erlenmeyer. El matraz Erlenmeyer de 250 mL se colocó en la salida refrigerante con 50 mL de ácido bórico al 5 % (ACS, J.T. Baker®, Phillipsburg, Estados Unidos) y cuatro gotas de indicador Shiro-Tashiro (ACS, Acros Organics®, Thermo Fisher Scientific, Fairlawn, Estados Unidos). Luego del proceso de destilación, se retiró el matraz Erlenmeyer y se valoró el contenido con ácido clorhídrico (ACS, Acros Organics®, Thermo Fisher Scientific, Fairlawn, Estados Unidos) valorado 0.1 N (Helrich, 1990). El contenido en porcentaje de nitrógeno se calculó

mediante las ecuaciones propuestas en la AOAC 940.25 (Helrich, 1990).

El contenido de grasa se determinó mediante el método de Soxhlet (Helrich, 1990). De la muestra compuesta, se pesó 1 g y se colocó en un dedal de celulosa que, a su vez, se colocó en un tubo de extracción. En un vaso de vidrio adaptable a peso constante conteniendo perlas de ebullición, se vertieron 50 mL de hexano (ACS, J.T. Baker®, Phillipsburg, Estados Unidos), y este se conectó al aparato de extracción (FOSS Mexico, Soxtec™ 2043, Ciudad de México, México). Se realizó un enjuague sumergiendo la muestra en hexano por 40 min, posteriormente se efectuó el goteo por 1 h y 25 min, durante el cual las muestras se retiraron del hexano y se verificó que tuvieran un goteo similar de 3 a 5 gotas por segundo. Terminado este proceso, se llevó a cabo la extracción del hexano por evaporización durante 40 min. Para finalizar, se colocó el vaso de vidrio adaptable en una estufa con temperatura de 105 °C durante 15 min. Transcurrido el tiempo, se colocó el vaso de vidrio en un desecador por 45 min y enseguida se pesó. La determinación del contenido de grasa se calculó mediante las ecuaciones propuestas por Helrich (1990).

El cálculo de carbohidratos se realizó por el método de diferencia, utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Carbohidratos totales} = 100 - (\% \text{ de proteínas} + \% \text{ de cenizas} + \% \text{ de grasa})$$

Todas las determinaciones se realizaron por triplicado.

Extracción y cuantificación de pigmentos

Para la cuantificación del contenido de clorofilas se obtuvo un extracto estándar usando el método propuesto por Lichtenthaler (1987). A continuación, se colocaron tres réplicas independientes de 200 µL del extracto estándar en tres pocillos separados de una microplaca de 96 pocillos para, finalmente, medir la absorbancia a 632 nm, 652 nm, 665 nm y 696 nm en un lector de microplacas UV-Vis (Bio-Rad, Hércules, Estados Unidos) que dispone del *software* Microplate Manager 6.0 (Bio-Rad, Hércules, Estados Unidos). La concentración de clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila *c*, clorofila *d* y clorofilas totales se determinó mediante las ecuaciones propuestas por Ritchie (2008).

Cuantificación de fitoquímicos y actividad antioxidante

Para la cuantificación de los contenidos de azúcares reductores, fenólicos totales, flavonoides, taninos y actividad antioxidante de los cladodios de las cuatro especies, se realizó un extracto metanólico con el método propuesto por Alvarez-Parrilla et al. (2011).

Los azúcares reductores se determinaron mediante el método de ácido 3,5 dinitrosalicílico (DNS), usando la metodología propuesta por Ávila Núñez et al. (2012) con algunas modificaciones. Brevemente, en tubos de cristal de 10 mL se mezclaron 300 μ L de la muestra de extracto metanólico estándar diluido 1:10 y 600 μ L del reactivo de DNS (ACS, Sigma-Aldrich®, Naucalpan de Juárez, Estado de México, México). Los tubos se colocaron en un termobloque a 100 °C durante 10 min para después ser enfriados inmediatamente en un baño de hielo por 5 min. Luego se tomaron 250 μ L de cada muestra y se pasaron a pocillos de una microplaca (Simport™, Saint-Mathieu-de-Beloeil, Quebec, Canadá) para registrar la absorbancia a 540 nm en un lector de microplacas UV-Vis (Bio-Rad, Hércules, California, Estados Unidos) que dispone del programa Microplate Manager 6.0 (Bio-Rad, Hércules, Estados Unidos). Para la cuantificación, se realizó una curva de calibración con glucosa en un rango de 0.6-10 mg/mL (ACS, Sigma-Aldrich®, Naucalpan de Juárez, México) como estándar. Los resultados se expresaron como miligramos de equivalentes de glucosa por gramos de peso seco (mg Glu·g⁻¹).

El contenido de fenoles totales se realizó de acuerdo con los métodos utilizados por Georgé et al. (2005). Brevemente, en un pocillo de microplaca se mezclaron 25 μ L de la muestra de extracto metanólico estándar, 100 μ L de carbonato de sodio al 7.5 % (m/v) (ACS, Sigma-Aldrich®, Naucalpan de Juárez, México) y 125 μ L de reactivo Folin-Ciocalteu (ACS, Sigma-Aldrich®, Naucalpan de Juárez, México) (10 % [v/v] en agua destilada). La mezcla se incubó a 30 °C durante 15 min en ausencia total de luz y se verificó la absorbancia a 760 nm en un lector de microplacas UV-Vis (Bio-Rad, Hércules, Estados Unidos) que dispone del *software* Microplate Manager 6.0 (Bio-Rad, Hércules, Estados Unidos). Para la cuantificación, se realizó una curva de calibración con ácido gálico en un rango de 0.0125-0.2 mg/mL (ACS, Sigma-Aldrich®, Naucalpan de Juárez,

México) como estándar. Los resultados se expresaron en miligramos de equivalentes de ácido gálico por gramos de peso seco (mg EAG·g⁻¹).

De igual manera, el contenido de flavonoides totales se realizó usando la metodología utilizada por Georgé et al. (2005). Es decir, en un pocillo de microplaca se mezclaron 310 μ L del extracto metanólico estándar, 125 μ L de agua destilada, 9.5 μ L de nitrito de sodio al 5 % (ACS, Fluka®, Honeywell/Sigma-Aldrich®, Naucalpan de Juárez, México) (m/v), 9.5 μ L de cloruro de aluminio (ACS, Fluka®, Honeywell/Sigma-Aldrich®, Naucalpan de Juárez, México) (10 % [m/v] en agua destilada) y 125 μ L de hidróxido de sodio 0.5 M (ACS, Fluka®, Honeywell/Sigma-Aldrich®, Naucalpan de Juárez, México); posteriormente, se incubó a 27 °C durante 30 min en ausencia de luz y se registró la absorbancia a 510 nm en un lector de microplacas UV-Vis (Bio-Rad, Hércules, Estados Unidos) que dispone del *software* Microplate Manager 6.0 (Bio-Rad, Hércules, Estados Unidos). Para la cuantificación, se realizó una curva de calibración utilizando catequina en un rango de 0.12-0.2 mg/mL (ACS, Sigma-Aldrich®, Naucalpan de Juárez, México) como estándar. Los resultados se expresaron en miligramos de equivalentes de catequina por gramos de peso seco (mg EC·g⁻¹).

El contenido de taninos condensados se determinó mediante el ensayo de dimetilaminocinamaldehído (DMAC). En breve, 50 μ L de la muestra del extracto metanólico estándar se mezclaron con 250 μ L de reactivo de DMAC (ACS, Sigma-Aldrich®, Naucalpan de Juárez, México). La reacción se incubó a 30 °C durante 20 min en ausencia de luz y se comprobó la absorbancia a 510 nm en un lector de microplacas UV-Vis (Bio-Rad, Hércules, Estados Unidos) que dispone del *software* Microplate Manager 6.0 (Bio-Rad, Hércules, Estados Unidos). Para la cuantificación, se realizó una curva de calibración con catequina en un rango de 0.12 a 0.2 mg/mL (ACS, Sigma-Aldrich®, Naucalpan de Juárez, México) como estándar. Los resultados se expresaron como miligramos de equivalentes de catequina por gramos de peso seco (mg EC·g⁻¹).

Las actividades antioxidantes determinadas por DPPH y FRAP se realizaron con la metodología propuesta por Moreno-Escamilla et al. (2018). Para la valoración por DPPH en un pocillo de una microplaca se mezclaron 25 μ L del extracto metanólico y 200 μ L del reactivo DPPH a 190 μ M (ACS, Sigma-Aldrich®,

Naucalpan de Juárez, México). La reacción se incubó a 30 °C durante 20 min en ausencia de luz y se examinó la absorbancia a 510 nm en un lector de microplacas UV-Vis (Bio-Rad, Hércules, Estados Unidos) que dispone del *software* Microplate Manager 6.0 (Bio-Rad, Hércules, Estados Unidos). Para la cuantificación por FRAP, en un pocillo de una microplaca se mezclaron 25 µL del extracto metanólico y 180 µL del reactivo FRAP (ACS, Sigma-Aldrich®, Naucalpan de Juárez, México). La reacción se incubó a 30 °C durante 20 min en ausencia de luz, y se verificó la absorbancia a 595 nm en un lector de microplacas UV-Vis (Bio-Rad, Hércules, Estados Unidos) que dispone del *software* Microplate Manager 6.0 (Bio-Rad, Hércules, Estados Unidos).

Para la cuantificación de los resultados, se construyeron curvas de calibración con TROLOX como estándar en un rango de 8-130 µM/mL para FRAP y de 25-400 µM/mL para DPPH (ACS, Sigma-Aldrich®, Naucalpan de Juárez, México). Los resultados se expresaron en micromoles de equivalentes de TROLOX por gramo de masa seca (µM ET-g⁻¹). Todas las determinaciones se realizaron por triplicado.

Análisis de datos

Los datos morfológicos, fisicoquímicos y fitoquímicos se analizaron a través de una prueba de normalidad por el método de Shapiro-Wilk. También se realizó un ANOVA unidireccional y una prueba de medias Tukey. Se aceptó la significancia de la diferencia entre los grupos con nivel de confianza de 95 % o superior. Además, Los datos obtenidos de las características morfológicas, fisicoquímicos y fitoquímicos también se

sometieron a un análisis de funciones discriminantes canónicas. Todos los análisis se realizaron con el *software* estadístico SPSS (IBM® SPSS® Statistics versión 23, Armonk, Estados Unidos).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características morfométricas de los nopalitos

Los cladodios de las tres especies silvestres presentaron valores significativamente menores ($p < 0.05$) en casi todas las variables analizadas comparadas con *O. ficus-indica* (Cuadro 1). El número de gloquidios fue mayor en *O. macrocentra*, mientras que *O. phaeacantha* y *O. engelmannii* presentaron los valores menores (Cuadro 1).

Los datos obtenidos de las características morfológicas de los nopalitos se sometieron a un análisis de funciones discriminantes canónicas, encontrándose que las dos primeras funciones explicaron el 99.4 % de la variación total (Figura 1). La primera función (largo del cladodio) representó el 79.7 % de esta variación ($r = 0.555$), mientras que la segunda función, el 19.7 %, y las variables asociadas a esta última fueron el perímetro ($r = 0.559$), área ($r = 0.553$) y número de gloquidios ($r = 0.315$). Además, este análisis permitió agrupar a *O. phaeacantha* (1) y *O. engelmannii* (2) por presentar las características morfológicas de los nopalitos más similares (Cuadro 1; Figura 1). Por el contrario, *O. macrocentra* (3) y *O. ficus-indica* (4), se separaron del grupo integrado por *O. phaeacantha* (1) y *O. engelmannii* (2), mostrando que estas especies presentaron las características morfológicas más contrastantes (Cuadro 1; Figura 1).

Cuadro 1. Análisis de la morfología de los cladodios de cuatro especies de *Opuntia*.

Característica	Especie			
	<i>O. phaeacantha</i>	<i>O. engelmannii</i>	<i>O. macrocentra</i>	<i>O. ficus-indica</i>
Peso (g)	25.10 ± 5.0 ^c	33.0 ± 6.40 ^b	18.60 ± 6.00 ^c	58.90 ± 9.30 ^a
Largo (cm)	8.60 ± 1.10 ^c	10.10 ± 1.00 ^b	8.50 ± 1.10 ^c	16.80 ± 0.80 ^a
Ancho (cm)	7.60 ± 0.60 ^{bc}	8.50 ± 0.90 ^{ab}	7.10 ± 0.90 ^c	8.80 ± 0.80 ^a
Base (cm)	1.30 ± 0.50 ^b	1.90 ± 0.50 ^a	1.10 ± 0.30 ^b	2.00 ± 0.60 ^a
Área (cm)	49.40 ± 90 ^c	65.20 ± 11.20 ^b	61.00 ± 15.60 ^{bc}	113.60 ± 9.00 ^a
Perímetro (cm)	26.20 ± 2.40 ^c	29.30 ± 2.50 ^b	24.00 ± 3.20 ^c	42.60 ± 1.20 ^a
Núm. de gloquidios	55.30 ± 3.05 ^c	57.00 ± 5.60 ^c	125.40 ± 23 ^a	77.00 ± 10.20 ^b

Se presentan los valores como el promedio ± desviación estándar (n = 10). Las letras indican el agrupamiento resultado de la prueba de medias de Tukey ($p \leq 0.05$).

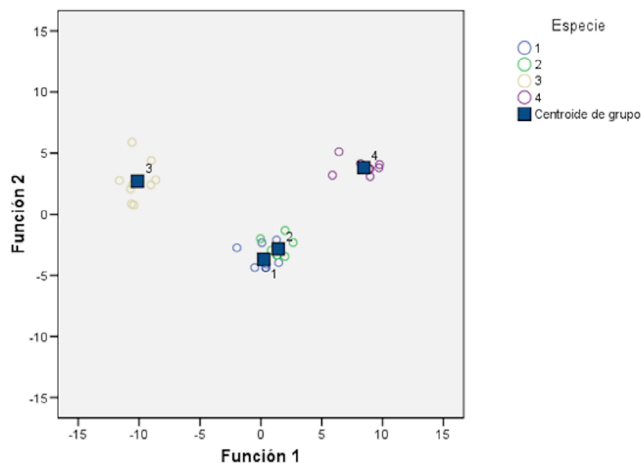


Figura 1. Diagrama de dispersión de las funciones discriminantes canónicas del análisis morfométrico de los nopalitos de cuatro especies del género *Opuntia*: *O. phaeacantha* (1); *O. engelmannii* (2); *O. macrocentra* (3); *O. ficus-indica* (4).

Varios estudios han expuesto que las características morfométricas de los nopalitos para consumo son parámetros de calidad importantes para su comercialización (Maki-Díaz et al., 2015). La cosecha de los nopalitos para consumo se realiza por los productores según su experiencia, seleccionándolos principalmente por su peso, largo, ancho y grosor (Maki-Díaz et al., 2015). Sin embargo, existe una gran variación en las características morfológicas de estos. El peso de nopalitos de la especie comercial *O. ficus-indica* colectados en tres localidades del Estado de México, México (125.35-163.04 g) (Maki-Díaz et al., 2015) y los analizados de una localidad del estado de Zacatecas, México (83-119 g) (Aguilar-Sánchez et al., 2007) fueron mayores a los encontrados en el presente estudio. Además, los resultados del largo y ancho de *O. ficus-indica* medidos en esta investigación fueron inferiores a los determinados en nopalitos en una localidad del estado de Lara, Venezuela (26.47 cm y 15.86 cm de largo y ancho, respectivamente) (Barazarte et al., 2017) y a los colectados en tres localidades del Estado de México, México (21.66-23.86 cm y 11.44-12.36 cm de largo y ancho, respectivamente) (Maki-Díaz et al., 2015). Sin embargo, fueron similares a los nopalitos colectados en Zacatecas, México (con un rango de 16-22 cm de largo y 7-13 cm de ancho) (Aguilar-Sánchez et al., 2007). Estas variaciones en las características morfométricas podrían deberse principalmente a las condiciones de precipitación, de cultivo y a la época de cosecha (Aguilar-Sánchez et al., 2007; Alvarado Raya et al., 2020; Barazarte et al., 2017; Maki-Díaz et al., 2015).

Las diferencias interespecíficas observadas en las características morfológicas pueden explicarse por procesos de domesticación y adaptación ecológica. *Opuntia ficus-indica*, como especie cultivada, ha sido sometida a selección artificial para maximizar atributos comerciales, como mayor tamaño y contenido de humedad, lo que favorece su aceptación en el mercado (Díaz-Delgado et al., 2024; Maki-Díaz et al., 2015). En contraste, las especies silvestres presentan cladodios más pequeños y mayor densidad de gloquidios, rasgos que constituyen estrategias adaptativas frente a condiciones de estrés hídrico y herbívora en ambientes áridos (Boudjouan et al., 2022). Estas características permiten reducir la pérdida de agua y aumentar la protección contra depredadores, reflejando diferencias en la presión de selección y en la disponibilidad de recursos entre especies domesticadas y silvestres. Tales variaciones morfológicas son consistentes con patrones evolutivos reportados en estudios recientes sobre *Opuntia* y sugieren que la plasticidad fenotípica desempeña un papel clave en la supervivencia bajo condiciones contrastantes (Boudjouan et al., 2022).

Características fisicoquímicas de los nopalitos

En las características fisicoquímicas de las cuatro especies se observaron diferencias ($p < 0.05$) significativas en el contenido de humedad, materia seca, acidez titulable, contenido de proteína, cenizas y carbohidratos; sin embargo, no se observaron diferencias ($p > 0.05$) en el pH, azúcares solubles y contenido de lípidos (Cuadro 2). Los datos obtenidos de las características fisicoquímicas de los nopalitos se sometieron a un análisis de funciones discriminantes canónicas, encontrándose que las dos primeras funciones explicaron el 98.6 % de la variación total (Figura 2).

La primera función representó el 90.2 % de esta variación. Las variables asociadas a esta función fueron el contenido de carbohidratos ($r = -0.822$) y el de proteínas ($r = 0.773$). La segunda función solo aportó el 8.4 % y la variable asociada fue la acidez titulable ($r = 0.951$). Al mismo tiempo, este análisis permitió separar a *O. macrocentra* (3), *O. phaeacantha* (1) y *O. engelmannii* (2) de la comercial, por presentar características fisicoquímicas similares (Figura 2; Cuadro 2). En los nopalitos de *O. ficus-indica* y *O. phaeacantha*, se observaron valores más elevados en el contenido de

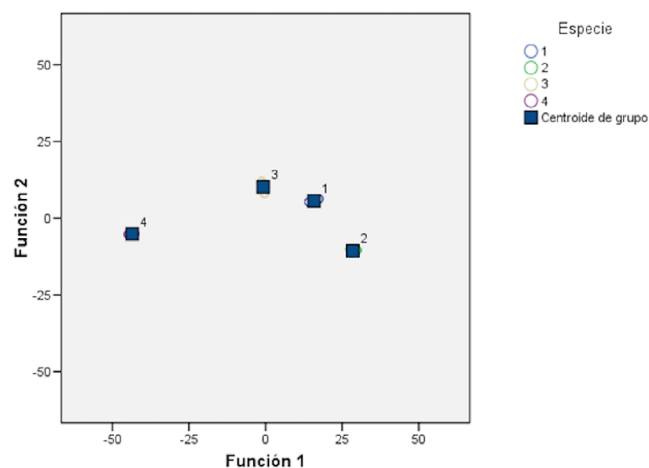


Figura 2. Diagrama de dispersión de las funciones discriminantes canónicas del análisis fisicoquímico de los nopalitos de cuatro especies del género *Opuntia*: *O. phaeacantha* (1); *O. engelmannii* (2); *O. macrocentra* (3); *O. ficus-indica* (4).

humedad (92.2 % y 83.4 %, respectivamente) comparado con *O. engelmannii* y *O. macrocentra* (67.3 % y 72.20 %, respectivamente) (Cuadro 2).

El resultado obtenido para *O. ficus-indica* fue similar al encontrado en nopalitos analizados en una localidad de España y localidades de México (91.4-94.8 %) (Andreu et al., 2018; Betancourt-Domínguez et al., 2006; Maki-Díaz et al., 2015). La variación en el contenido de humedad en el nopalito puede estar relacionada por la disponibilidad de agua del suelo y la pérdida de vapor debido a la transpiración (Maki-Díaz et al., 2015).

Por el contrario, cuando se analizó el contenido de materia seca, se observó que *O. macrocentra* y *O. engelmannii* presentaron los valores mayores (27.8 % y 32.70 %, respectivamente), mientras que *O. ficus-indica* y *O. phaeacantha* presentaron los valores menores (7.8 % y 16.6 %, respectivamente). Los resultados de

las especies silvestres fueron también superiores a los observados en nopalitos de *O. ficus-indica* en España, Marruecos y México (5.2-9.63 %) (Andreu et al., 2018; Betancourt-Domínguez et al., 2006; Maki-Díaz et al., 2015; Mounir et al., 2020).

En cuanto al pH, no se observaron diferencias ($p > 0.05$) significativas en las cuatro especies analizadas en el presente estudio. Estos resultados fueron similares a los encontrados en nopalitos de *O. ficus-indica* localizados en Guanajuato, México (4.05-4.55) y Marruecos (3.85-4.03) (Betancourt-Domínguez et al., 2006; Mounir et al., 2020); sin embargo, fueron más bajos que los encontrados en nopalitos de España (5.6-6.7) (Andreu et al., 2018). Esta variación podría estar relacionada a factores como las condiciones de cultivo, la maduración, postcosecha y diferencias en las variedades (Maki-Díaz et al., 2015).

En los nopalitos silvestres de *O. phaeacantha* y *O. macrocentra* se observaron los valores más elevados en la acidez titulable (0.70 % y 0.73 %, respectivamente), mientras que en *O. ficus-indica* se observó el valor más bajo (0.60 %). Estos resultados fueron similares a los encontrados en nopalitos de *O. ficus-indica* en Guanajuato, México (0.30-0.85 %) (Betancourt-Domínguez et al., 2006); sin embargo, fueron más bajos a los determinados en localidades de Venezuela (0.76 %), México (0.99-1.11 %) y España (2.10-3.47 %) (Andreu et al., 2018; Barazarte et al., 2017; Maki-Díaz et al., 2015). Esta amplia variación en la acidez titulable también podría estar relacionada con la edad del nopalito, el manejo y condiciones del cultivo (López-Palacios et al., 2012).

Cuadro 2. Análisis fisicoquímico de los nopalitos de *O. phaeacantha*, *O. engelmannii*, *O. macrocentra* y *O. ficus-indica*.

Característica	Especie			
	<i>O. phaeacantha</i>	<i>O. engelmannii</i>	<i>O. macrocentra</i>	<i>O. ficus-indica</i>
Humedad (%)	83.40 ± 1.30 ^a	67.30 ± 6.10 ^b	72.20 ± 9.10 ^b	92.20 ± 4.20 ^a
Materia seca (%)	16.60 ± 1.30 ^b	32.70 ± 6.10 ^a	27.80 ± 9.10 ^a	7.80 ± 4.20 ^b
pH	5.00 ± 0.80 ^a	5.00 ± 0.10 ^a	4.60 ± 0.50 ^a	5.00 ± 0.20 ^a
Acidez titulable (%)	0.70 ± 0.001 ^a	0.65 ± 0.001 ^b	0.73 ± 0.01 ^a	0.60 ± 0.001 ^c
Azúcares solubles (°Bx)	4.00 ± 0.00 ^a	4.20 ± 0.00 ^a	4.00 ± 0.00 ^a	4.20 ± 0.00 ^a
Proteína (%)	14.60 ± 0.08 ^b	15.90 ± 0.16 ^a	13.30 ± 0.08 ^c	8.70 ± 0.16 ^d
Lípidos (%)	0.20 ± 0.00 ^a	0.20 ± 0.00 ^a	0.20 ± 0.00 ^a	0.20 ± 0.00 ^a
Cenizas (%)	15.00 ± 0.24 ^a	14.37 ± 0.13 ^b	13.27 ± 0.05 ^c	12.37 ± 0.13 ^d
Carbohidratos (%)	70.23 ± 0.37 ^c	69.53 ± 0.05 ^d	73.23 ± 0.05 ^b	78.80 ± 0.08 ^a

Se presentan los valores con base en el peso seco como promedio ± desviación estándar (n = 3 por especie) y el agrupamiento de la prueba de medias de Tukey ($p \leq 0.05$).

En el presente estudio, no se observaron diferencias ($p > 0.05$) significativas en el contenido de azúcares solubles. Pero fueron similares a los de la especie comercial *O. ficus-indica* localizados en España (3.93-4.97 °Bx) (Andreu et al., 2018); sin embargo, fueron menores a los determinados en los nopalitos de Venezuela (5.59 °Bx) y México (6.50 a 7.30 °Bx) (Barazarte et al., 2017; Betancourt-Domínguez et al., 2006).

En los nopalitos de la especie silvestre *O. engelmannii* se observó el valor más elevado en el contenido de proteínas (15.90 %), mientras que en *O. ficus-indica*, el menor (8.70 %). Aunque no existen estudios comparativos del contenido de proteína de los nopalitos de las especies silvestres analizadas en el presente estudio, los valores de proteína fueron mayores a los encontrados en la cáscara, la pulpa del fruto y las semillas de *O. engelmannii* (2.3 %, 2.3 % y 8.2 %, respectivamente), *O. phaeacantha* (1.4 %, 2.1 % y 6.3 %, respectivamente) y *O. macrocentra* (2.3 %, 3.4 % y 5.2 %, respectivamente) (Valero-Galván et al., 2021). El contenido de proteína determinado en el presente estudio fue mayor al determinado en nopales maduros colectados de un área de Michoacán, México, de *O. ficus-indica* (5.64 %) y *O. velutina* F.A.C.Weber (4.70 %) (Pérez-Sánchez et al., 2015) y en nopalitos de *O. ficus-indica* localizados en Marruecos (1.78-3.44 %) (Mounir et al., 2020).

En esta investigación no se observaron diferencias significativas en el contenido de lípidos en las cuatro especies analizadas. Aunque no existen estudios comparativos del contenido de lípidos de los nopalitos de las especies silvestres analizadas, los valores de lípidos fueron menores a los encontrados en la cáscara, la pulpa del fruto y en las semillas de *O. engelmannii* (1.5 %, 0.4 % y 10.6 %, respectivamente), *O. phaeacantha* (1.6 %, 0.6 % y 7.1 %, respectivamente) y *O. macrocentra* (1.9 %, 0.4 % y 8.5 %, respectivamente) (Valero-Galván et al., 2021).

En los nopalitos de la especie silvestre *O. phaeacantha*, se observó el valor mayor en el contenido de cenizas (15 %), mientras que en *O. ficus-indica* se observó el menor (12.37 %). Aunque no existen estudios comparativos del contenido de cenizas en los nopalitos de las especies silvestres analizadas en el presente estudio, los valores fueron mayores a los encontrados en la pulpa del fruto y las semillas de *O. engelmannii* (7.4 % y 1.9 %, respectivamente), *O. phaeacantha* (10.4 % y 1.0 %, respectivamente) y *O. macrocentra* (9.2 % y 1.7 %),

aunque más bajos a los determinados para cáscara del fruto de *O. engelmannii* (24.5 %), *O. phaeacantha* (18.9 %) y *O. macrocentra* (19.2 %) (Valero-Galván et al., 2021). La variación del contenido de ceniza se ha relacionado con el desarrollo y estado de maduración de los nopalitos de *O. ficus-indica* (Hernández-Urbiola et al., 2010; Mounir et al., 2020).

En los nopalitos de *O. ficus-indica* se observó el valor más elevado ($p \leq 0.05$) en el contenido de carbohidratos (78.80 %), mientras que en *O. engelmannii* se obtuvo el más bajo ($p \leq 0.05$, 69.53 %). Aunque no existen estudios comparativos del contenido de carbohidratos en los nopalitos de las especies silvestres analizadas en el presente estudio, en otros tejidos del fruto de estas especies se observaron valores más altos en la pulpa del fruto y en las semillas de *O. engelmannii* (89.8 % y 79.1 %, respectivamente), *O. phaeacantha* (86.7 % y 84.5 %, respectivamente) y *O. macrocentra* (86.8 % y 84.5 %, respectivamente), aunque fueron similares a los determinados para cáscara del fruto de *O. engelmannii* (71.5 %), *O. phaeacantha* (77.8 %) y *O. macrocentra* (76.4 %) (Valero-Galván et al., 2021). El contenido de carbohidratos determinado en el presente estudio también fue mayor a los encontrados en nopalitos de *O. ficus-indica* en Venezuela y Perú (Barazarte et al., 2017; Guzmán Loayza & Chávez, 2007).

Las diferencias interespecíficas en las características fisicoquímicas reflejan tanto la influencia del proceso de domesticación como las adaptaciones fisiológicas a condiciones ambientales contrastantes. *Opuntia ficus-indica* presentó mayores contenidos de humedad y carbohidratos, lo que coincide con su selección para consumo humano y su cultivo en ambientes controlados (Díaz-Delgado et al., 2024; Valero-Galván et al., 2021). En contraste, las especies silvestres mostraron valores superiores de materia seca, proteínas y cenizas, asociados a mecanismos de tolerancia al estrés hídrico y a la acumulación de compuestos estructurales que favorecen la supervivencia en ambientes áridos (Boudjouan et al., 2022). Estas diferencias sugieren que la plasticidad fisiológica y metabólica desempeña un papel clave en la adaptación y en la diferenciación entre especies domesticadas y silvestres, lo que también influye en su potencial funcional y nutraceutico.

Características fitoquímicas de los nopalitos

Se observaron diferencias estadísticamente significativas en el contenido de clorofila *b*, azúcares reductores, compuestos fenólicos, flavonoides y actividad antioxidante determinada por DPPH (Cuadro 3). Los datos obtenidos de las características fitoquímicas de los nopalitos se sometieron a un análisis de funciones discriminantes canónicas, encontrándose que las dos primeras funciones explicaron el 99.9 % de la variación total (Figura 3). La primera función, representó el 98.6 % de esta variación; sin embargo, no se observó ninguna variable asociada a esta función; mientras que la segunda función solo aportó el 1.3 % y las variables asociadas a esta fueron la actividad antioxidante determinada por FRAP ($r = -0.789$), el contenido de clorofila total ($r = 0.296$), de clorofila *b* ($r = 0.265$) y de flavonoides ($r = 0.058$). Además, este análisis permitió separar a las especies silvestres *O. phaeacantha* (1) y *O. engelmannii* (2) de *O. macrocentra* (3) y *O. ficus-indica* (4), mostrando que estas especies presentan las características fisicoquímicas más contrastantes (Cuadro 3; Figura 3).

Los nopalitos de *O. ficus-indica* presentaron los valores más altos en el contenido de clorofila *b* ($4.6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ peso seco), en comparación con las tres especies silvestres. Los resultados de la cuantificación de las tres clorofilas analizadas para todas las especies del presente estudio fueron mayores a las determinadas por otros autores (Aguilar Becerril & Peña Valdivia, 2006; Santiago Lorenzo, 2015; Stintzing & Carle, 2005).

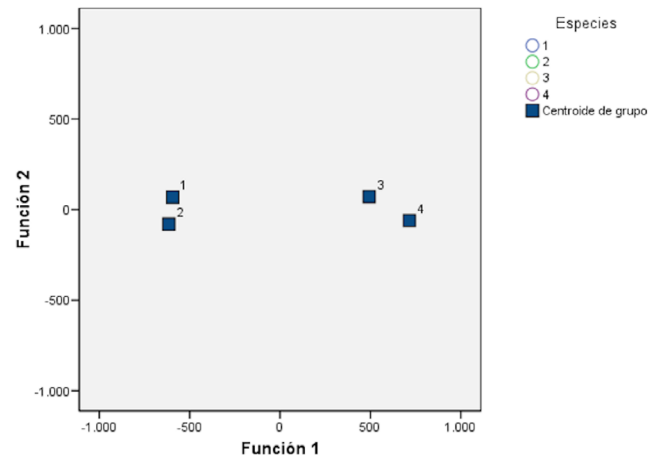


Figura 3. Diagrama de dispersión de las funciones discriminantes canónicas del análisis fitoquímico de los nopalitos de cuatro especies del género *Opuntia*: *O. phaeacantha* (1); *O. engelmannii* (2); *O. macrocentra* (3); *O. ficus-indica* (4).

También en *O. ficus-indica* se registraron los valores más altos en el contenido de azúcares reductores ($323.4 \text{ mg EGLU} \cdot \text{g}^{-1}$), mientras que en *O. engelmannii* se observaron los valores más bajos ($49 \text{ mg EGLU} \cdot \text{g}^{-1}$).

Los nopalitos de *O. phaeacantha* presentaron los valores más elevados en el contenido de compuestos fenólicos ($0.68 \text{ mg EAG} \cdot \text{g}^{-1}$), mientras que en *O. engelmannii* y *O. macrocentra* se observaron los valores más bajos ($0.22 \text{ mg EAG} \cdot \text{g}^{-1}$ y $0.28 \text{ mg EAG} \cdot \text{g}^{-1}$, respectivamente). Estos valores se observaron más bajos a los obtenidos en la cáscara, pulpa y las semillas de *O. engelmannii* ($6.45 \text{ mg EAG} \cdot \text{g}^{-1}$, $8.14 \text{ mg EAG} \cdot \text{g}^{-1}$ y $4.96 \text{ mg EAG} \cdot \text{g}^{-1}$, respectivamente), *O. phaeacantha* ($3.70 \text{ mg EAG} \cdot \text{g}^{-1}$, $7.76 \text{ mg EAG} \cdot \text{g}^{-1}$ y $4.41 \text{ mg EAG} \cdot \text{g}^{-1}$, respectivamente) y *O. macrocentra* ($7.11 \text{ mg EAG} \cdot \text{g}^{-1}$, $8.42 \text{ mg EAG} \cdot \text{g}^{-1}$ y $6.96 \text{ mg EAG} \cdot \text{g}^{-1}$, respectivamente) (Valero-Galván et al., 2021). Asimismo, fueron más bajos a los encontrados

Cuadro 3. Análisis fitoquímico de los cladodios de cuatro especies de *Opuntia*.

Fitoquímico	Especie			
	<i>O. phaeacantha</i>	<i>O. engelmannii</i>	<i>O. macrocentra</i>	<i>O. ficus-indica</i>
Clorofila <i>a</i> *	4.8 ± 0.6^a	7.2 ± 1.9^a	6.8 ± 0.8^a	4.9 ± 1.8^a
Clorofila <i>b</i> *	3.5 ± 0.4^b	3.0 ± 0.4^b	2.8 ± 0.3^b	4.6 ± 1.1^a
Clorofila total*	8.3 ± 1.2^a	10.4 ± 1.3^a	9.6 ± 1.0^a	9.5 ± 0.5^a
Azúcares reductores**	62.1 ± 3.1^c	49.0 ± 0.1^d	254.6 ± 10.6^b	323.4 ± 6.3^a
Fenólicos***	0.68 ± 0.11^a	0.22 ± 0.02^c	0.28 ± 0.05^c	0.46 ± 0.03^b
Flavonoides****	0.91 ± 0.11^a	0.64 ± 0.14^b	1.08 ± 0.01^a	1.00 ± 0.01^a
DPPH*****	61.4 ± 1.7^b	85.10 ± 0.1^a	93.7 ± 6.5^a	91.0 ± 5.7^a
FRAP*****	393.8 ± 16.8^a	387.35 ± 53.9^a	423.7 ± 54.0^a	452.8 ± 73.0^a

Se presentan los valores con base en el peso seco como promedio $\pm$ desviación estándar ($n = 5$ por especie) y el agrupamiento de la prueba de medias de Tukey ($p \leq 0.05$). * $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ peso seco; ** mg de equivalente de glucosa ($\text{EGLU} \cdot \text{g}^{-1}$); *** mg de equivalentes de ácido gálico ($\text{EAG} \cdot \text{g}^{-1}$); **** mg de equivalentes de catequina ($\text{EC} \cdot \text{g}^{-1}$); ***** μM de equivalentes de Trolox ($\text{ET} \cdot \text{g}^{-1}$).

en nopalitos de *O. ficus-indica* (18.9 mg $\text{EAG}\cdot\text{g}^{-1}$) (Andreu et al., 2018).

Los nopalitos de *O. phaeacantha*, *O. macrocentra* y *O. ficus-indica* presentaron los valores más elevados en el contenido de flavonoides (0.91 mg $\text{EC}\cdot\text{g}^{-1}$, 1.08 mg $\text{EC}\cdot\text{g}^{-1}$ y 1.00 mg $\text{EC}\cdot\text{g}^{-1}$, respectivamente), mientras que los de *O. engelmannii* el más bajo (0.64 mg $\text{EC}\cdot\text{g}^{-1}$). Aunque no existen estudios comparativos del contenido de flavonoides en los nopalitos de las especies silvestres analizadas en el presente estudio, su contenido fue inferior al obtenido en la cáscara y pulpa del fruto y en las semillas de *O. engelmannii* (5.01 mg $\text{EC}\cdot\text{g}^{-1}$, 4.26 mg $\text{EC}\cdot\text{g}^{-1}$ y 3.80 mg $\text{EC}\cdot\text{g}^{-1}$, respectivamente), *O. phaeacantha* (4.90 mg $\text{EC}\cdot\text{g}^{-1}$, 4.10 mg $\text{EC}\cdot\text{g}^{-1}$ y 4.02 mg $\text{EC}\cdot\text{g}^{-1}$, respectivamente) y *O. macrocentra* (3.60 mg $\text{EC}\cdot\text{g}^{-1}$, 3.74 mg $\text{EC}\cdot\text{g}^{-1}$ y 3.36 mg $\text{EC}\cdot\text{g}^{-1}$, respectivamente) (Valero-Galván et al., 2021).

Por otro lado, los nopalitos de *O. macrocentra* mostraron los mayores valores en la actividad antioxidante determinada por DPPH (93.7 $\mu\text{M ET}\cdot\text{g}^{-1}$), mientras que para *O. phaeacantha* se observó el más bajo (61.4 $\mu\text{M ET}\cdot\text{g}^{-1}$). Estos valores fueron más altos a los observados en la cáscara, pulpa y semillas de *O. engelmannii* (12.89 $\mu\text{M ET}\cdot\text{g}^{-1}$, 11.43 $\mu\text{M ET}\cdot\text{g}^{-1}$ y 10.68 $\mu\text{M ET}\cdot\text{g}^{-1}$, respectivamente), *O. phaeacantha* (13.08 $\mu\text{M ET}\cdot\text{g}^{-1}$, 13.53 $\mu\text{M ET}\cdot\text{g}^{-1}$ y 13.46 $\mu\text{M ET}\cdot\text{g}^{-1}$, respectivamente) y *O. macrocentra* (12.50 $\mu\text{M ET}\cdot\text{g}^{-1}$, 13.59 $\mu\text{M ET}\cdot\text{g}^{-1}$ y 12.60 $\mu\text{M ET}\cdot\text{g}^{-1}$, respectivamente) (Valero-Galván et al., 2021). Asimismo, a los encontrados en nopalitos de *O. ficus-indica* (0.0128-0.0552 mM $\text{ET}\cdot\text{g}^{-1}$), pero más bajos a los determinados en nopalitos de *O. ficus-indica* en España (Andreu et al., 2018).

Las diferencias interespecíficas en el contenido de compuestos fenólicos, flavonoides y actividad antioxidante reflejan adaptaciones metabólicas y procesos de domesticación. *Opuntia ficus-indica* presentó mayores niveles de clorofila *b* y azúcares reductores, lo que coincide con su selección para mejorar atributos sensoriales y calidad comercial (Díaz-Delgado et al., 2024). En contraste, las especies silvestres mostraron valores superiores en compuestos fenólicos y flavonoides, asociados a mecanismos de defensa frente a estrés hídrico y radiación solar, características comunes en plantas adaptadas a ambientes áridos (Boudjouan et al., 2022). Estas diferencias explican la mayor actividad antioxidante observada en *O. macrocentra* y confirman que la acumulación de metabolitos secundarios es

un rasgo clave para la supervivencia en condiciones extremas, además de otorgar un potencial nutracéutico relevante. Estos resultados también se soportan con otros estudios en donde el contenido de lípidos, fibra, azúcares totales y flavonoides se han presentado en mayor concentración en las especies silvestres de *Opuntia* comparado con las especies domesticadas (Astello-García et al., 2015; Guevara-Figueroa et al., 2010; Pichereaux et al., 2016). Estas variaciones en el contenido de fitoquímicos también se han asociado a las condiciones agronómicas del cultivo, condiciones climáticas, almacenamiento y fenología del cultivo (Aguilar Becerril & Peña Valdivia-Díaz, 2006; Guevara-Figueroa et al., 2010; Hernández-Urbiola et al., 2011; Santiago Lorenzo, 2015; Santos Díaz et al., 2017; Stintzing & Carle, 2005; Zamora-Morales et al., 2025). Estos patrones coinciden con estudios recientes que destacan la plasticidad fenotípica y metabólica como factores clave en la diferenciación interespecífica y en la capacidad antioxidante (Martins et al., 2023; Zeghibib et al., 2022). La evidencia disponible confirma que las especies silvestres constituyen una fuente potencial de compuestos funcionales y nutracéuticos, lo que abre oportunidades para su aprovechamiento en la industria alimentaria y farmacéutica (Shoukat et al., 2023; El Hassania et al., 2024).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos evidencian diferencias significativas entre la especie comercial *O. ficus-indica* y las tres especies silvestres analizadas (*O. phaeacantha*, *O. engelmannii* y *O. macrocentra*), tanto en características morfológicas como fisicoquímicas y fitoquímicas. En el ámbito morfológico, *O. ficus-indica* presentó clados de mayor tamaño, mientras que las especies silvestres mostraron dimensiones menores y mayor densidad de gloquidios, lo que refleja adaptaciones a condiciones áridas y procesos de domesticación. En cuanto a las propiedades fisicoquímicas, la especie comercial destacó por su mayor contenido de humedad y carbohidratos, atributos asociados a su selección para consumo humano, mientras que las especies silvestres exhibieron valores superiores de materia seca, proteínas y cenizas, indicadores de tolerancia al estrés hídrico. Finalmente, en el perfil fitoquímico, *O. ficus-indica* presentó mayores niveles de clorofila *b* y

azúcares reductores, en contraste con las especies silvestres que mostraron concentraciones más elevadas de compuestos fenólicos, flavonoides y actividad antioxidante, especialmente en *O. macrocentra*. Estas diferencias confirman que la plasticidad fenotípica y metabólica desempeña un papel clave en la adaptación y diferenciación entre especies domesticadas y silvestres, y sugieren que las especies silvestres constituyen una fuente potencial de compuestos funcionales y nutraceuticos con aplicaciones en la industria alimentaria y farmacéutica.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Departamento de Ciencias Químico-Biológicas por el apoyo en la utilización de las instalaciones para realizar la investigación. Así como a los alumnos del programa de QFB que apoyaron en la realización del proyecto de investigación.

LITERATURA CITADA

- Abbas, E. Y., Ezzat, M. I., El Hefnawy, H. M., & Abdel-Sattar, E. (2022). An overview and update on the chemical composition and potential health benefits of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. *Journal of Food Biochemistry*, 46(11), e14310. <https://doi.org/10.1111/jfbc.14310>
- Aguilar Becerril, G., & Peña Valdivia, C. (2006). Alteraciones fisiológicas provocadas por sequía en nopal *Opuntia ficus-indica*. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 29(3), 231-237. <https://doi.org/10.35196/rfm.2006.3.231>
- Aguilar-Sánchez, L., Martínez-Damián, M. T., Barrientos-Priego, A. F., Aguilar-Gallegos, N., & Gallegos-Vásquez, C. (2007). Enzymatic browning potential of "Nopalitos" varieties. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 9, 165-184. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v9i.273>
- Albano, C., Negro, C., Tommasi, N., Gerardi, C., Mita, G., Miceli, A., De Bellis, L., & Blando, F. (2015). Betalains, phenols and antioxidant capacity in cactus pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.] fruits from Apulia (South Italy.) genotypes. *Antioxidants*, 4(2), 269-280. <https://doi.org/10.3390/antiox4020269>
- Alvarado Raya, D. H. E., Salinas Callejas, E., & Ortiz Huerta, G. (2020). Peso fresco y calidad de nopalito (*Opuntia ficus-indica* L.) fertilizado con composta de estiércol de vaca. *Tecnociencia Chihuahua*, 10(1), 13-22. <https://doi.org/10.54167/tch.v10i1.581>
- Alvarez-Parrilla, E., De la Rosa, L. A., Amarowicz, R., & Shahidi, F. (2011). Antioxidant activity of fresh and processed Jalapeño and Serrano peppers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(1), 163-173. <https://doi.org/10.1021/jf103434u>
- Andreu, L., Nuncio-Jáuregui, N., Carbonell-Barrachina, Á. A., Legua, P., & Hernández, F. (2018). Antioxidant properties and chemical characterization of Spanish *Opuntia ficus-indica* Mill. cladodes and fruits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(4), 1566-1573. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8628>
- Aragona, M., Lauriano, E. R., Pergolizzi, S., & Faggio, C. (2018). *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller as a source of bioactivity compounds for health and nutrition. *Natural Product Research*, 32(17), 2037-2049. <https://doi.org/10.1080/14786419.2017.1365073>
- Astello-García, M. G., Cervantes, I., Nair, V., Santos-Díaz, M. del S., Reyes-Agüero, A., Guéraud F., Negre-Salvayre, A., Rossignol, M., Cisneros-Zevallos, L., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.04.016>
- Ávila Núñez, R., Rivera Pérez, B., Hernández Motzezak, R., & Chirinos, M. (2012). Contenido de azúcares totales, reductores y no reductores en *Agave cocui* Trelease. *Multiciencias*, 12(2), 129-135.
- Barazarte, H., Terán, Y., D'Aubeterre, R., Pérez, L., Garmendia, C., Moreno, I., Rodríguez, E., Pacheco, D., Colmenares, C., & Sánchez-Urdaneta A. B. (2017). Características físicas y químicas de cladodios de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 34, 175-186.
- Betancourt-Domínguez, M. A., Hernández-Pérez, T., García-Saucedo, P., Cruz-Hernández, A., & Paredes-López, O. (2006). Physico-chemical changes in cladodes (nopalitos) from cultivated and wild cacti (*Opuntia* spp.). *Plant Foods Human Nutrition*, 61, 115-119. <https://doi.org/10.1007/s11130-006-0008-6>
- Boudjouan, F., Zeghib, W., Carneiro, J., Silva, R., Morais, J., Vasconcelos, V., & Lopes, G. (2022). Comparison study on wild and cultivated *Opuntia* sp.: Chemical, taxonomic, and antioxidant evaluations. *Agriculture*, 12(11), 1755. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111755>

- Díaz-Delgado, G. L., Rodríguez-Rodríguez, E. M., Ríos, D., Cano, M. P., & Lobo, M. G. (2024). Morphological characterization of *Opuntia* accessions from Tenerife (Canary Islands, Spain) using upov descriptors. *Horticulturae*, 10(7), 662. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10070662>
- El Hassania, L., Bouslamti, M., Kaddad, S., Hbika, A., Elbouzidi, A., Mohamed, T., Mohammad Salamatullah, A., Bourhia, M., Dauelbait, M., Mohammed, R., & Fauconnier, M.-L. (2024). Physicochemical and phytochemical characterization of *Opuntia dillenii*: A promising source of bioactive compounds. *International Journal of Food Properties*, 27(1), 1079-1094. <https://doi.org/10.1080/10942912.2024.2385960>
- Georgé, S., Brat, P., Alter, P., & Amiot, M. J. (2005). Rapid determination of polyphenols and vitamin C in plant-derived products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(5), 1370-1373. <https://doi.org/10.1021/jf048396b>
- Guevara-Figueroa, T., Jiménez-Islas, H., Reyes-Escogido, M. L., Mortensen, A. G., Laursen, B. B., Li-Wei, L., De León-Rodríguez, A., Fomsgaard, I. S., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2009.12.003>
- Guzmán Loayza, D., & Chavez, J. (2007). Estudio bromatológico del cladodio del nopal (*Opuntia ficus-indica*) para el consumo humano. *Revista Sociedad Química Perú*, 73(1), 41-45.
- Helrich, K. (Ed.) (1990). *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. Association of Official Analytical Chemists.
- Hernández-Urbiola, M. I., Contreras-Padilla, M., Pérez-Torrero, E., Hernández-Quevedo, G., Rojas-Molina, J. I., Cortes, M. E., & Rodríguez-García, M. E. (2010). Study of nutritional composition of nopal (*Opuntia ficus-indica* cv. Redonda) at different maturity stages. *The Open Nutrition Journal*, 4, 11-16. <https://doi.org/10.2174/1874288201004010011>
- Hernández-Urbiola, M. I., Pérez-Torrero, E., & Rodríguez-García, M. E. (2011). Chemical analysis of nutritional content of prickly pads (*Opuntia ficus-indica*) at varied ages in an organic harvest. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(5), 1287-1295. <https://doi.org/10.3390/ijerph8051287>
- Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
- López-Palacios, C., Peña-Valdivia, C. B., Reyes-Agüero, J. A., & Rodríguez-Hernández, A. I. (2012). Effects of domestication on structural polysaccharides and dietary fiber in nopalitos (*Opuntia* spp.). *Genetic Resources and Crop Evolution*, 59, 1015-1026. <https://doi.org/10.1007/s10722-011-9740-3>
- Maki-Díaz, G., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, R., Arévalo-Galarza, M. L., Calderón-Zavala, G., & Anaya-Rosales, S. (2015). Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional. *Agrociencia*, 49, 31-51.
- Manzur-Valdespino, S., Arias-Rico, J., Ramírez-Moreno, E., Sánchez-Mata, M. de C., Jaramillo-Morales, O. A., Angel-García, J., Zafra-Rojas, Q. Y., Barrera-Gálvez, R., & Cruz-Cansino N. de S. (2022). Applications and pharmacological properties of cactus pear (*Opuntia* spp.) peel: A review. *Life*, 12(11), 1903. <https://doi.org/10.3390/life12111903>
- Martins, M., Ribeiro, M. H., & Almeida, C. M. M. (2023). Physicochemical, nutritional, and medicinal properties of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. and its main agro-industrial use: A review. *Plants*, 12(7), 1512. <https://doi.org/10.3390/plants12071512>
- Mena, P., Tassotti, M., Andreu, L., Nuncio-Jáuregui, N., Legua, P., Del Río, 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. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.03.062>
- Moreno-Escamilla, J. O., Alvarez-Parrilla, E., De la Rosa, L. A., Núñez-Gastélum, J. A., González-Aguilar, G. A., & Rodrigo-García, J. (2017). Effect of different elicitors and preharvest day application on the content of phytochemicals and antioxidant activity of Butterhead Lettuce (*Lactuca sativa* var. capitata) produced under hydroponic conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(26), 5244-5254. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b01702>
- Mounir, B., Younes, E. G., Asmaa, M., Abdeljalil, Z., & Abdellah, A. (2020). Physico-chemical changes in cladodes of *Opuntia ficus-indica* as a function of the growth

- stage and harvesting Areas. *Journal Plant Physiology*, 251, 153196. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2020.153196>
- Núñez-Gastélum, J. A., González-Fernández, R., Hernández-Herrera, A., Campas-Baypoli, O. N., Rodríguez-Ramírez, R., Lobo-Galo, N., & Valero-Galván, J. (2018). Morphological characteristics, chemical composition, and antioxidant activity of seeds by four wild *Opuntia* species from North of Mexico. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 20, 23-33. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v20i.26>
- Pérez-Sánchez, R. E., Delgado-Sánchez, L. A., García-Saucedo, P. A., Pulido, J., & Ortiz-Rodríguez, R. (2015). Caracterización, modelación morfológica y análisis proximales de *Opuntia ficus-indica* y *O. atropes* durante las épocas de estiaje y lluvias. *Nova Scientia*, 7(3), 133-152.
- Pichereaux, C., Hernández-Domínguez, E. E., Santos-Díaz, M. del S., Reyes-Agüero, A., Astello-García, M., Guéraud, F., Negre-Salvayre, A., Schilt, O., Rossignol, M., & Barba de la Rosa, A. P. (2016). Comparative shotgun proteomic analysis of wild and domesticated *Opuntia* spp. species shows a metabolic adaptation through domestication. *Journal of Proteomics*, 143, 353-364. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2016.04.003>
- Ritchie, R. J. (2008). Universal chlorophyll equations for estimating chlorophylls *a*, *b*, *c*, and *d* and total chlorophylls in natural assemblages of photosynthetic organisms using acetone, methanol, or ethanol solvents. *Photosynthetica*, 46, 115-126. <https://doi.org/10.1007/s11099-008-0019-7>
- Santiago Lorenzo, M. del R. (2015). *Calidad postcosecha de nopal verdura con diferente fuente de fertilización y tiempo de refrigeración* [Tesis inédita de Maestría en Ciencias]. Colegio de Postgraduados.
- Santos Díaz, M. del S., Barba de la Rosa, A.-P., Héliès-Toussaint, C., Guéraud, F., & Nègre-Salvayre, A. (2017). *Opuntia* spp.: characterization and benefits in chronic diseases. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2027, 8634249. <https://doi.org/10.1155/2017/8634249>
- Shoukat, R., Cappai, M., Pia, G., & 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>
- Stintzing, F. C., & 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>
- Tahri-Joutey, M., Saih, F.-E., El Kebbaj, R., Gondcaille, C., Vamecq, J., Latruffe, N., Lizard, G., Savary, S., Nasser, B., Cherkaoui-Malki, M., & Andreoletti, M. (2022). Protective effect of nopal cactus (*Opuntia ficus-indica*) seed oil against short-term lipopolysaccharides-induced inflammation and peroxisomal functions dysregulation in mouse brain and liver. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(19), 11849. <https://doi.org/10.3390/ijms231911849>
- Valero-Galván, J., González-Fernández, R., Sigala-Hernández, A., Núñez-Gastélum, J. A., Ruiz-May, E., Rodrigo-García, J., Larqué-Saavedra, A., & Martínez-Ruiz N. del R. (2021). Sensory attributes, physicochemical and antioxidant characteristics, and protein profile of wild prickly pear fruits (*O. macrocentra* Engelm., *O. phaeacantha* Engelm., and *O. engelmannii* Salm-Dyck ex Engelm.) and commercial prickly pear fruits (*O. ficus-indica* (L.) Mill.). *Food Research International*, 140, 109909. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109909>
- Zamora-Morales, B. P., Báez-Pérez, A., Bonilla-Valencia, L., Zegbe-Domínguez, J. A., Zamora-Martínez, M. C., & Quevedo-Nolasco, A. (2025). Efecto de las propiedades físicas y químicas del suelo en el estado nutrimental del nopal-verdura (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill variedad Milpa Alta. *Polibotánica*, 60, 307-324.
- Zeghib, W., Boudjouan, F., Vasconcelos, V., Lopes, G. (2022). Phenolic compounds' occurrence in *Opuntia* species and their role in the inflammatory process: A review. *Molecules*, 27(15), 4763. <https://doi.org/10.3390/molecules27154763>