

Composición química y actividad antioxidante en estambres de cuatro especies de *Cylindropuntia*: influencia del solvente de extracción

Chemical Composition and Antioxidant Activity of Stamens from Four *Cylindropuntia* Species: Influence of the Extraction Solvent

Kevin Alexis Madrigal Hernández¹, Raquel González-Fernández¹, José Valero-Galván^{1*}

¹ Departamento de Ciencias Químico-Biológicas, Instituto de Ciencias Biomédicas, Universidad autónoma de Ciudad Juárez; Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Av. Plutarco Elías Calles #1210 FOVISSSTE Chamizal, Ciudad Juárez, Chihuahua, México, C.P. 32310.

*Correspondencia: jose.valero@uach.mx (José Valero-Galván)

DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v19i2.1802>

Recibido: 27 de diciembre de 2024; Aceptado: 21 de mayo de 2025

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado.

Editor de Sección: Dr. René Renato Balandrán-Quintana

Resumen

Actualmente, la información sobre la composición química de las especies del género *Cylindropuntia* es limitada. Generar mayor conocimiento sobre estas especies es de interés para identificar diferencias entre especies y determinar su potencial antioxidante y composición química. El objetivo de este estudio fue evaluar la composición química y la actividad antioxidante de los estambres de cuatro especies de *Cylindropuntia*, utilizando tres solventes acuosos para la extracción y la cuantificación espectrofotométrica de pigmentos, compuestos fenólicos, flavonoides, azúcares reductores y actividad antioxidante. El metanol fue el solvente más eficiente en la extracción de clorofilas (b, c, d y total), carotenoides, betacianinas, betaxantinas y betalainas, en comparación con la acetona y el etanol. *C. spinosior* presentó las mayores concentraciones de xantofilas (29.37 mg·g⁻¹), betacianinas (0.190 mg·g⁻¹), betaxantinas (0.080 mg·g⁻¹) y betalainas (0.27 mg·g⁻¹), mientras *C. imbricata* destacó por su alto contenido de clorofila a (49.51 mg·g⁻¹), clorofila d (15.24 mg·g⁻¹), clorofila total (89.10 mg·g⁻¹), compuestos fenólicos (10.97 mg EAG·g⁻¹) y una mayor actividad antioxidante medida por FRAP (22.56 mmol ET·g⁻¹). Por otro lado, *C. kleiniae* presentó la mayor concentración de carotenoides (12.14 mg·g⁻¹), azúcares reductores (136.89 mg EG·g⁻¹) y actividad antioxidante medida por DPPH (23.84 μM ET·g⁻¹). En contraste, *C. arbuscula* presentó los niveles más bajos en la mayoría de los compuestos analizados. Los estambres de las especies *C. spinosior* y *C. imbricata*

emergen como fuentes potenciales de compuestos bioactivos, lo que resalta su relevancia para futuras investigaciones en el ámbito fitoquímico, farmacológico y nutricional.

Palabras clave: cactáceas, pigmentos vegetales, antioxidantes naturales, flavonoides y fenoles, análisis discriminante.

Abstract

Currently, information on the chemical composition of species within the *Cylindropuntia* genus is limited. Expanding knowledge about these species is essential for identifying interspecies differences and determining their antioxidant potential and chemical composition. This study aimed to evaluate the chemical composition and antioxidant activity of stamens from four *Cylindropuntia* species using three aqueous solvents for extraction and spectrophotometric quantification of pigments, phenolic compounds, flavonoids, reducing sugars, and antioxidant activity. Among the solvents tested, methanol was the most efficient for extracting chlorophylls (b, c, d, and total), carotenoids, betacyanins, betaxanthins, and betalains, compared to acetone and ethanol. *C. spinosior* exhibited the highest concentrations of xanthophylls ($29.37 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), betacyanins ($0.190 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), betaxanthins ($0.080 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), and betalains ($0.27 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), while *C. imbricata* stood out for its high content of chlorophyll a ($49.51 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), chlorophyll d ($15.24 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), total chlorophyll ($89.10 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), phenolic compounds ($10.97 \text{ mg GAE}\cdot\text{g}^{-1}$), and potent antioxidant activity measured by FRAP ($22.56 \text{ mmol TE}\cdot\text{g}^{-1}$). On the other hand, *C. kleiniae* exhibited the highest concentration of carotenoids ($12.14 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), reducing sugars ($136.89 \text{ mg EG}\cdot\text{g}^{-1}$), and a higher antioxidant activity measured by DPPH ($23.84 \text{ mmol TE}\cdot\text{g}^{-1}$). In contrast, *C. arbuscula* showed the lowest levels across most analyzed compounds. The stamens of *C. spinosior* and *C. imbricata* emerge as promising sources of bioactive compounds, underscoring their relevance for future research in phytochemistry, pharmacology, and nutrition.

Keywords: cacti, plant pigments, natural antioxidants, flavonoids and phenols, discriminant analysis.

1. Introducción

Las cactáceas son plantas suculentas y dicotiledóneas pertenecientes al orden *Caryophyllales* (Jiménez-Sierra, 2011). Destacan por su adaptación a ambientes áridos y semiáridos, resultado de su naturaleza halófila y xerófila, así como de su metabolismo fotosintético C4 o CAM (Santos-Díaz y Camarena-Rangel, 2019). Dentro de la familia *Cactaceae* se han identificado entre 110 y 124 géneros, que en conjunto comprenden alrededor de 1500 a 1600 especies (de Castro Campos Pinto y Scio, 2014). Su distribución abarca todo el continente americano, con su mayor diversidad concentrada en Norteamérica, especialmente en los desiertos de Chihuahua, Sonora y Mojave (Fontenele *et al.*, 2021). En menor medida, también se encuentran en Argentina, Bolivia, Chile, Perú y Brasil (Ortega-Baes y Godínez-Álvarez, 2006).

En México, las cactáceas tienen un gran valor económico, social, cultural y ecológico, por lo que se utilizan en diversos ámbitos, como la alimentación, la producción de forraje, la delimitación de terrenos mediante cercos vivos, la ornamentación, las ceremonias religiosas y la medicina

tradicional. Sin embargo, estas especies han sufrido una disminución en sus poblaciones debido a la recolección y el comercio ilegal, así como al cambio de uso de suelo y la industrialización de sus hábitats naturales (Jiménez-Sierra, 2011).

El género *Cylindropuntia*, conocido coloquialmente como “choyas”, pertenece a la subfamilia *Opuntioideae* y se caracteriza por sus tallos cilíndricos, articulados y glabros, con areolas que contienen gloquidios y espinas. Sus flores pueden presentarse solitarias o agrupadas, con podarios en el pericarpelo (Balandrán-Quintana et al., 2018; Malusa et al., 2014). Con un registro de 35 especies, 21 subespecies y 10 híbridos, este género exhibe una amplia distribución geográfica que abarca el sur y centro de los Estados Unidos, el norte de México, así como Sudamérica, con presencia destacada en Chile, Ecuador y Perú (Hunt, 2016; Guzmán et al., 2003). En México, las especies más abundantes incluyen *C. imbricata*, *C. leptocaulis*, *C. spinosior* y *C. kleiniae* (Guzmán et al., 2003). Estas plantas se emplean como cercos vivos para delimitar terrenos y sus cladodios secos en la elaboración de artesanías (Bustamante y Burquez, 2005).

Desde el punto de vista fitoquímico, se ha reportado que las raíces de *C. cholla* presentan actividad antimicrobiana atribuida a inhibidores enzimáticos (Galván-Gutiérrez, 2019), mientras que los frutos y semillas contienen una elevada actividad antioxidante, asociada con su alto contenido de compuestos fenólicos (Reyes-Corral et al., 2022). No obstante, existe información limitada sobre la composición fitoquímica y la actividad antioxidante de los estambres en el género *Cylindropuntia*. Dado que los pigmentos y metabolitos secundarios en estructuras florales pueden desempeñar un papel determinante en la defensa antioxidante, su análisis en el género *Cylindropuntia* representa una oportunidad para ampliar el conocimiento sobre los compuestos bioactivos de las flores en este género.

En la última década, ha crecido el interés por identificar fuentes naturales de compuestos bioactivos con capacidad antioxidante, debido a su potencial para mitigar el daño celular provocado por especies reactivas del oxígeno y radicales libres, factores vinculados a enfermedades crónicas (Hoang y Kim, 2021; Grodzicki y Dziendzikowska, 2020; Chandrasekara y Shahidi, 2018; Rangel-Huerta et al., 2015). Dentro de la familia *Cactaceae*, diversas especies destacan por su riqueza en pigmentos, compuestos fenólicos, carotenoides, betalainas, fibras y mucílagos, que les confieren una notable capacidad antioxidante y protección frente al estrés ambiental (Márquez-Rangel et al., 2025; Agostini-Costa, 2022; Aispuro-Hernández et al., 2022; Das et al., 2021). La variabilidad en la composición química entre diferentes tejidos y especies responde a factores ecológicos y evolutivos (Agostini-Costa, 2022), lo que subraya su relevancia en la ecología de ecosistemas áridos y su potencial en aplicaciones farmacológicas y nutraceuticas. Investigaciones recientes han destacado sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y anticancerígenas (Martínez et al., 2024; Das et al., 2021; Ramírez-Rodríguez et al., 2020), reforzando el interés en los recursos naturales como alternativa sostenible a los antioxidantes sintéticos, cuyo impacto en la seguridad y efectos secundarios sigue en evaluación.

La extracción de compuestos bioactivos es relevante en la industria farmacéutica, alimentaria y cosmética (Martínez et al., 2024; Das et al., 2021; Ramírez-Rodríguez et al., 2020). Su eficacia depende en gran medida del solvente utilizado, cuya capacidad para disolver y extraer los compuestos de interés varía según sus características químicas (Ngo et al., 2017; Nagarajan et al., 2016). Propiedades como la polaridad, el punto de ebullición y la capacidad de solubilización determinan la cantidad y calidad de los compuestos obtenidos (Ngo et al., 2017; Nagarajan et al., 2016). Así, la elección adecuada del solvente maximiza el rendimiento de extracción, ya que los solventes polares favorecen

la extracción de compuestos hidrofílicos, mientras que los solventes menos polares son más eficaces en la extracción de compuestos lipofílicos (Ngo *et al.*, 2017; Nagarajan *et al.*, 2016; Arvayo-Enríquez *et al.*, 2013; Ritchie, 2008; Lichtenthaler, 1987).

Este estudio tuvo como objetivo evaluar la composición química y la actividad antioxidante de los estambres de cuatro especies del género *Cylindropuntia*, mediante la extracción con tres solventes acuosos y la cuantificación espectrofotométrica de pigmentos, compuestos fenólicos, flavonoides, azúcares reductores y actividad antioxidante. Asimismo, se buscó identificar diferencias entre especies y determinar la combinación de solvente y especie con el mayor contenido de compuestos bioactivos y actividad antioxidante, con el fin de aportar información relevante sobre su potencial fitoquímico, funcional y relevancia industrial por su uso como colorantes naturales.

2. Materiales y métodos

Material biológico y sitio de recolección

En el presente estudio se utilizó un diseño factorial para evaluar el efecto de tres solventes acuosos (metanol al 80 %, etanol al 80 % y acetona al 80 %, v/v) y la variación interespecífica en la extracción de pigmentos, compuestos fitoquímicos y la actividad antioxidante en estambres, los cuales incluyeron los filamentos y las anteras que contienen el polen, de cuatro especies del género *Cylindropuntia*.

La recolección de las flores se realizó a inicios de abril de 2023 en Ciudad Juárez, Chihuahua, México, en especies nativas de la región. Para la identificación taxonómica, se seleccionaron aleatoriamente cinco individuos por especie y se recolectaron tres tallos y frutos de cada uno, siguiendo la guía de Deltoro-Torró *et al.* (2014).

Las flores de *C. kleiniae* y *C. imbricata* se recolectaron en el Parque Central Hermanos Escobar (31.687157, -106.427388), las de *C. spinosior* en el jardín botánico del Instituto de Ciencias Biomédicas de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (31.746881, -106.442465), y las de *C. arbuscula* en el Parque Jardín del Valle (31.661430, -106.370235).

El protocolo de recolección se adaptó de González-Fernández *et al.* (2023), monitoreando cada 10 días entre el 1 de marzo y el 30 de mayo de 2023. Se seleccionaron dos flores al azar por individuo, sumando un total de diez flores por especie. Para evitar la contaminación del polen por insectos herbívoros y polinizadores, la colecta se realizó en antesis temprana. La recolección se llevó a cabo en diferentes ramas del mismo individuo, entre las 7:00 y 10:00 h.

Las muestras se depositaron individualmente en bolsas de polietileno herméticas sin solución fijadora, ya que en colectas previas se observó que las flores pueden abrirse tras el corte sin alteraciones en sus rasgos polínicos. Una hora después de la recolección, las muestras fueron transportadas al laboratorio, donde se cortaron longitudinalmente con un bisturí para separar los estambres. Posteriormente, las muestras se homogeneizaron en un mortero y se sometieron a un secado a 28 °C durante 96 h en una incubadora (Thermo, Alemania). Finalmente, el material seco fue pulverizado manualmente con un pistilo, colocado en sobres de papel identificados y almacenado a 27 °C por un máximo de 24 h antes de su análisis.

Preparación de los extractos

Para cada especie, se prepararon tres extractos estándar utilizando la técnica de extracción sólido-líquido con tres solventes acuosos al 80 % (v/v): metanol (Deq, México), etanol (Civeq, México) y acetona (Deq, México). La extracción se llevó a cabo siguiendo la metodología de Reyes-Corral *et al.* (2022).

Se pesaron 0.03 g de material seco de cada especie y se colocaron en un mortero. Posteriormente, se añadieron 1.5 mL de la solución de metanol al 80 % (v/v) y se homogeneizó con un pistilo hasta obtener una mezcla uniforme. La solución resultante se transfirió a tubos nuevos de 1.5 mL y se mantuvo a 4 °C durante 12 h en oscuridad. Luego, los extractos fueron centrifugados a 5000 rpm durante 3 min a 4 °C en una centrífuga (Eppendorf, Estados Unidos). El sobrenadante se recuperó y se almacenó a 4 °C hasta su análisis.

Este procedimiento se repitió utilizando soluciones acuosas de etanol al 80 % (v/v) y acetona al 80 % (v/v), asegurando condiciones idénticas para cada solvente.

Cuantificación de pigmentos

Se tomaron 75 µL de cada uno de los doce extractos y, por triplicado, se depositaron en celdas independientes dentro de una microplaca de 96 pocillos (Corning, México). Se midió la absorbancia de la longitud de onda a 470 nm, 490 nm, 547 nm, 630 nm, 632 nm, 647 nm, 652 nm, 649 nm, 664 nm, 665 nm, 691 nm y 696 nm en un espectrofotómetro acoplado a un lector de microplacas (Hercules®, USA) usando el programa Microplate Manager 6.0 (Bio-Rad, USA).

Como blancos, se usaron los mismos solventes usados en la extracción. Para la cuantificación de clorofilas (a, b, c, d y total), xantofilas y carotenoides, se aplicaron las ecuaciones de Ritchie (2008) y Lichtenthaler (1987). La cuantificación de betacianinas, betaxantinas y betalainas totales se realizó mediante las ecuaciones propuestas por Castellanos-Santiago y Yahia (2008).

Cuantificación de fenólicos

El contenido total de compuestos fenólicos y flavonoides se cuantificó mediante el método de Folin-Ciocalteu y el método de cloruro de aluminio, respectivamente, con modificaciones (Valero-Galván *et al.* 2024; Georgé *et al.* 2005).

Para la cuantificación de compuestos fenólicos, 25 µL de cada uno de los doce extractos, por triplicado, se depositaron en celdas independientes de una microplaca de 96 pocillos (Corning, México). A cada extracto se le añadieron 40 µL de Na₂CO₃ al 7.5 % (m/v) (Sigma-Aldrich, México) y 125 µL de reactivo de Folin-Ciocalteu 2 N (Sigma-Aldrich, México). Como blancos, se utilizaron los mismos solventes empleados en la extracción. La mezcla se incubó durante 15 min a 25 °C en oscuridad y se midió la absorbancia a 710 nm en un espectrofotómetro (Hercules, USA) acoplado al software Microplate Manager 6.0 (Bio-Rad, USA).

Para la cuantificación de flavonoides, 62.5 µL de cada uno de los doce extractos estándar, por triplicado, se depositaron en celdas independientes de una microplaca de 96 pocillos (Corning,

México). A cada extracto se le añadieron 46.5 μL de NaNO_2 al 5 % (m/v) (Sigma-Aldrich, México), 46.5 μL de AlCl_3 al 10 % (m/v) (Sigma-Aldrich, México) y 62.5 μL de NaOH 0.5 M (Sigma-Aldrich, México). Como blancos, se utilizaron los mismos solventes empleados en la extracción. Las mezclas se incubaron durante 15 min a 25 °C en oscuridad y se midió la absorbancia a 510 nm bajo las mismas condiciones descritas anteriormente.

Para la expresión de los resultados ambos análisis, se realizaron curvas de calibración. En el caso de los compuestos fenólicos, se utilizó ácido gálico como estándar en concentraciones de 0.0125 a 0.2 mg/mL (Sigma-Aldrich™, México), expresando los resultados como mg de equivalentes de ácido gálico por gramo de masa seca (mg EAG·g⁻¹). Para los flavonoides, se utilizó catequina como estándar en un rango de 0.12 a 0.2 mg/mL (Sigma-Aldrich™, México), y los resultados se expresaron como mg de equivalentes de catequina por gramo de masa seca (mg EC·g⁻¹).

Cuantificación de azúcares reductores

La determinación de azúcares reductores se realizó siguiendo metodologías previas (Valero-Galván *et al.*, 2024; Ávila-Núñez *et al.*, 2012). Para su cuantificación, se tomaron 50 μL de cada uno de los doce extractos y, por triplicado, se depositaron en tubos independientes de 1.5 mL. Luego, se añadieron 150 μL de una solución de ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) a 43 mM y la mezcla se incubó a 95 °C durante 5 min en un termoblock (Scientific, USA).

Como blancos, se utilizaron los mismos solventes empleados en la extracción. Posteriormente, los tubos se enfriaron en hielo durante 2 min y el contenido de cada muestra se transfirió a celdas independientes en una microplaca de 96 pocillos (Corning, México). La absorbancia se midió a 540 nm en un espectrofotómetro (Hercules, USA) acoplado al software Microplate Manager 6.0 (Bio-Rad, USA).

Para la cuantificación, se generó una curva de calibración utilizando glucosa como estándar en un rango de 0.6 a 10 mg/mL (Sigma-Aldrich, México). Los resultados se expresaron como mg de equivalentes de glucosa por gramo de peso seco (mg EG·g⁻¹).

Cuantificación de la actividad antioxidante

La actividad antioxidante se evaluó mediante los ensayos de reducción del ion férrico (FRAP) y captura del radical DPPH (Valero-Galván *et al.*, 2024; Moreno-Escamilla *et al.*, 2017).

Para FRAP, 24 μL de cada extracto, por triplicado, se depositaron en celdas independientes de una microplaca de 96 pocillos (Corning, México). Como blancos, se emplearon los mismos solventes utilizados en la extracción. Se añadieron 180 μL de reactivo FRAP (10 mM TPTZ, 300 mM acetato de sodio y 20 mM FeCl_3 ; Sigma-Aldrich™, México) y se incubó a 25 °C en oscuridad durante 15 min. Luego, se midió la absorbancia a 595 nm en un espectrofotómetro (Hercules, USA) con el software Microplate Manager 6.0 (Bio-Rad, USA).

Para DPPH, 25 μL de cada extracto, por triplicado, se depositaron en celdas independientes de una microplaca de 96 pocillos (Corning, México). Se añadieron 200 μL de DPPH 190 μM (Sigma-Aldrich, México) y se incubó a 25 °C en oscuridad durante 15 min. Como blancos, se utilizaron los mismos solventes empleados en la extracción. La absorbancia se midió a 517 nm en las mismas condiciones que en FRAP.

Para la expresión de los resultados, se construyeron curvas de calibración con TROLOX como estándar en un rango de 8 a 130 $\mu\text{M/mL}$ para FRAP y de 25 a 400 $\mu\text{M/mL}$ para DPPH (Sigma-Aldrich, México). Los resultados se expresaron en μM de equivalentes de TROLOX por gramo de masa seca ($\text{mmol ET}\cdot\text{g}^{-1}$).

Análisis Estadístico

Los datos se analizaron utilizando el software estadístico SPSS (IBM®, versión 15.0, EE. UU.) para evaluar diferencias significativas en el contenido de pigmentos, compuestos fitoquímicos y actividad antioxidante. Se aplicó un análisis de varianza de dos factores (ANOVA) considerando como variables independientes el tipo de solvente (metanol, etanol y acetona) y la variación interespecífica (*C. spinosior*, *C. kleiniae*, *C. imbricata* y *C. arbuscula*).

Para comparar las medias entre grupos, se realizó una prueba de Tukey con un nivel de significancia de $p \leq 0.05$, considerando tres grupos para el tipo de solvente y cuatro grupos para la variación interespecífica.

Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis de funciones discriminantes canónicas para visualizar la diferenciación entre especies. Se analizó la varianza explicada y se identificaron las variables que contribuyen a la separación de las especies dentro del género *Cylindropuntia*, utilizando los coeficientes canónicos de correlación de la matriz de estructura.

3. Resultados y discusión

Extracción de los fitoquímicos y actividad antioxidante considerando los solventes

Con respecto a la extracción de los pigmentos de los estambres, se observó que el etanol al 80 % fue la mejor opción en la extracción de clorofila a (200 % con respecto al metanol); sin embargo, el metanol al 80 % mostró mayor eficiencia en la extracción de la clorofila b (504 % con respecto al metanol), de las clorofilas c, d, totales y de carotenoides (357 %, 229 %, 133 % y 188 %, respectivamente, con respecto a la acetona), y de las betacianinas y betalainas (160 % y 50 %, respectivamente, respecto al metanol); finalmente, la acetona al 80 % fue la más eficiente en la extracción de las xantofilas (125 % respecto al etanol) (Tabla 1). Con respecto a la extracción de los compuestos fenólicos de los estambres, no se observaron diferencias significativas entre los tres solventes analizados en la extracción de los fenoles totales, aunque en el caso de la extracción de flavonoides el metanol al 80 % fue más eficiente (158 % con respecto a la acetona) (Tabla 1). Por otro lado, la acetona acuosa fue la mejor opción para la extracción de los azúcares reductores (111 % con respecto a los solventes alcohólicos). Finalmente, para la determinación de la capacidad antioxidante, la acetona acuosa fue ligeramente más eficiente para la determinada mediante FRAP, mientras que con los tres solventes se obtuvieron valores similares para el método basado en DPPH (Tabla 1).

Tabla 1. Evaluación del contenido de fitoquímicos y actividad antioxidante en los estambres de cuatro especies del género *Cylindropuntia*, considerando exclusivamente la variación entre los solventes empleados.**Table 1.** Evaluation of phytochemicals and antioxidant activity content in the stamens from four *Cylindropuntia* species, considering exclusively the variation among the solvents used.

Pigmentos	Solvente		
	Metanol	Etanol	Acetona
Clorofila a*	15.67±0.93 ^a	31.49±0.93 ^b	28.29±0.93 ^b
Clorofila b*	22.15±1.60 ^c	4.39±1.60 ^a	14.82±1.60 ^b
Clorofila c*	21.12±1.93 ^b	14.41±1.93 ^b	5.91±1.93 ^a
Clorofila d*	15.90±1.65 ^b	9.07±1.65 ^a	6.93±1.65 ^a
Clorofila total*	74.86±3.52 ^b	59.35±3.52 ^a	55.93±3.52 ^a
Xantofilas*	10.28±3.78 ^a	10.58±3.78 ^a	13.77±3.78 ^b
Carotenoides*	15.16±1.74 ^b	8.03±1.74 ^a	8.23±1.74 ^a
Betacianinas*	0.080±0.00 ^b	0.050±0.00 ^a	0.070±0.00 ^b
Betaxantinas*	0.038±0.00 ^b	0.032±0.00 ^a	0.040±0.00 ^b
Betalaínas*	0.120±0.00 ^b	0.080±0.00 ^a	0.110±0.00 ^b
Fenoles **	9.28±0.49 ^a	9.58±0.49 ^a	8.89±0.49 ^a
Flavonoides ***	3.31±0.30 ^b	2.96±0.30 ^{ab}	2.10±0.30 ^a
Azúcares reductores ****	116.25±1.13 ^a	115.08±1.13 ^a	129.42±1.13 ^b
FRAP *****	22.25±0.36 ^a	21.04±0.36 ^a	24.40±0.36 ^b
DPPH *****	21.89±0.25 ^a	22.17±0.25 ^a	22.13±0.25 ^a

*Datos expresados en mg·g⁻¹ de masa seca. ** mg de equivalentes de ácido gálico por g de masa seca (mg EAG·g⁻¹); *** mg de equivalentes de catequina por g de masa seca (mg EC·g⁻¹); **** mg equivalentes de glucosa por g de masa seca (mg EG·g⁻¹); ***** μM equivalentes de TROLOX por g de masa seca (μM ET·g⁻¹). Los valores se presentan como media ± desviación estándar y se analizaron mediante una ANOVA ($p < 0.05$). Diferentes letras (a-b) muestran los resultados de la prueba múltiple de Tukey, que indican diferencias significativas ($p < 0.05$). Fuente: Elaboración propia.

Los fitoquímicos de las plantas tienen polaridades variables, por lo que la elección del solvente es esencial para la mayor cantidad de estos compuestos. La eficiencia de su extracción depende de factores como la resistencia de la pared celular vegetal, el poder de penetración y las propiedades de solvatación del solvente, la duración de la extracción y el uso de métodos de disrupción mecánica (Islam *et al.*, 2024). Las propiedades ideales de un solvente de extracción deben incluir la buena solubilidad del compuesto de interés y volatilidad a bajas temperaturas, entre otras (Nortjie *et al.*, 2022). En relación con el agua, los solventes utilizados en este trabajo pueden ordenarse de menor a mayor polaridad, de la siguiente manera: acetona < etanol < metanol < agua (Sinha *et al.*, 2022). Los alcoholes, como el metanol y el etanol, son solventes orgánicos polares próticos (contienen un grupo -OH con un protón ácido que puede formar enlaces de hidrógeno), que se utilizan para extraer una amplia gama de fitoquímicos desde baja a alta polaridad; ambos son miscibles en agua, inocuos, previenen el crecimiento microbiano y solo se requiere una pequeña cantidad de calor para que volatilicen. La acetona es un solvente orgánico polar aprótico (no contiene protones ácidos por lo que no puede formar enlaces de hidrógeno), con capacidad de extraer moléculas tanto hidrofílicas

como lipofílicas; es miscible en agua, volátil y también presenta baja toxicidad (Sinha *et al.*, 2022). La capacidad de extracción de estos tres solventes se puede modular fácilmente añadiendo una pequeña cantidad de agua, lo que provoca un ligero aumento de su polaridad (Sinha *et al.*, 2022; Tungmunthum *et al.*, 2020). Además, cuanto menor sea el tamaño de partícula, mejor será el resultado de la extracción, ya que aumenta la permeación y la difusión del soluto, mejorando así la eficiencia de la extracción (Sinha *et al.*, 2022). De los tres solventes, el etanol es el menos tóxico para los humanos y cumple con los principios de la química verde (Tungmunthum *et al.*, 2020).

Las clorofilas están compuestas por un núcleo tetrapirrólico que contiene un átomo de Mg central y una cadena lateral unida al C17, que difiere según el tipo de clorofila (Tamiaki y Kichishima, 2025). Aunque son moléculas lipofílicas, existe una pequeña diferencia en la polaridad de los distintos tipos de clorofilas determinada por ciertos grupos funcionales que difieren en el anillo de porfirina. Las clorofilas a, b y d contienen en el C17 un grupo de fitiloxycarbonilo ($-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}$ -fitilo) y se diferencian en los siguientes sustituyentes: en el C7 del anillo de porfirina, la clorofila a contiene un grupo metilo ($-\text{CH}_3$) y la clorofila b un grupo formilo ($-\text{CHO}$); por otro lado, en el C3, la clorofila a contiene un grupo formilo ($-\text{CHO}$) y la clorofila d un grupo vinilo ($-\text{CH}=\text{CH}_2$). En la clorofila c, el anillo de porfirina no está reducido y contiene en el C17 un grupo *trans*-2-carboxietenilo ($-\text{CH}=\text{CHCOOH}$) en lugar del fitol, por lo que se puede considerar menos hidrofóbicas que los otros tres tipos de clorofilas (Tamiaki y Kichishima, 2025). Por tanto, por su naturaleza química, las clorofilas son insolubles en agua, pero soluble en solventes orgánicos, siendo los más utilizados para su extracción el etanol o la acetona (Sun *et al.*, 2024). Si se considera la extracción de las clorofilas totales en los estambres, en este trabajo el metanol acuoso fue el más eficiente (Tabla 1). Aunque no existen estudios sobre el contenido de clorofilas en estambres usando diferentes solventes, estos resultados se sustentan por medio del estudio de Vicaş *et al.* (2010). Estos autores en un estudio de los pigmentos de clorofila de hojas de *Viscum album* (muérdago) utilizando diferentes solventes (metanol, acetona y N,N-dimetilformamida) a partir de germoplasma rumano, indicaron que el metanol es el solvente con mayor capacidad de extracción de las clorofilas.

Los carotenoides son tetraterpenoides (contienen 40 átomos de carbono), por lo que son moléculas lipofílicas, solubles en disolventes orgánicos como la acetona y el etanol, entre otros. Existen alrededor de 600 carotenoides que pueden clasificarse como carotenos o carotenoides (que presentan en la estructura sólo átomos de carbono e hidrógeno) y xantofilas, que son compuestos hidrocarbonados oxigenados que tienen al menos un átomo de oxígeno, grupos hidroxilo, ceto, epoxi, metoxi o carboxilo, por lo que son menos hidrofóbicas que los carotenoides (Butnariu, 2016). En este estudio el metanol acuoso fue el más eficiente para la extracción de los carotenoides de los estambres (Tabla 1). Sin embargo, estos resultados contrastan con el contenido de carotenoides encontrado en hojas de *V. album* utilizando diferentes solventes (metanol, acetona y N,N-dimetilformamida), donde la acetona fue el solvente con mayor capacidad de extracción de estos compuestos (Vicaş *et al.*, 2010).

Las betalainas, que incluyen a las betaxantinas y betacianinas, son pigmentos nitrogenados derivados de la tirosina solubles en agua. En este análisis, la acetona acuosa fue la más eficiente en su extracción (Tabla 1). En estudios previos, se ha comprobado que las soluciones hidroalcohólicas de baja polaridad son más eficaces que los solventes polares para su extracción debido a las débiles interacciones electrostáticas en estos pigmentos, al producir un efecto inhibitorio sobre las enzimas endógenas en comparación con el agua y al reducir la coextracción de pectina y otras fibras (Eyshi *et al.*, 2024).

La extracción de compuestos fenólicos a partir de material vegetal depende principalmente de la naturaleza de la matriz de la muestra, pero también de las propiedades químicas de los compuestos fenólicos deseados, como el número de anillos aromáticos y grupos hidroxilo en su estructura, polaridad y concentración, por lo que es difícil seleccionar un único método para su extracción (Kumar y Goel, 2019). Las diferencias observadas entre el contenido de los compuestos fenólicos en diferentes solventes se relacionan principalmente con sus diferentes polaridades, es decir, la diferente solubilidad de los compuestos individuales en el solvente de extracción. Finalmente, se ha demostrado que los solventes alcohólicos, a pesar de tener menor polaridad que los acuosos, disuelve las paredes celulares vegetales de manera más efectiva que el agua, lo que resulta en una mayor liberación de polifenoles de las células. El metanol es el solvente óptimo para extraer compuestos polifenólicos debido a su capacidad para inhibir las reacciones de la polifenol oxidasa y su facilidad de evaporación en comparación con el agua (Tripathi *et al.*, 2025). En el presente estudio no se observaron diferencias con respecto al solvente para extraer fenoles, sin embargo, el metanol fue el mejor solvente para extraer flavonoides (Tabla 1). Estos resultados se respaldan por estudios previos, donde el metanol fue el solvente más adecuado para la extracción de fenólicos y flavonoides en diferentes tejidos y plantas (Ammar *et al.*, 2015; Yen *et al.*, 1996; Hertog *et al.*, 1993).

En el presente estudio el etanol acuoso fue el más eficiente en la extracción de los fenoles de los estambres de las especies de *Cylindropuntia*, mientras que el metanol acuoso lo fue en la de los flavonoides (Tabla 1). Estos resultados concuerdan parcialmente con los determinados en estambres de *Crocus sativus* L. (azafrán) donde se encontró que el metanol acuoso fue el solvente que obtuvo los mayores contenidos de compuestos fenólicos y flavonoides (Mamri *et al.*, 2024; Jadouali *et al.*, 2017). Sin embargo, Mohd-Zin *et al.* (2021) observaron valores más bajos del contenido de fenólicos en extractos metanólicos acuosos que los extractos de acetato de etilo acuosos en estambres de nenúfar (*Nymphaeaceae antares*).

La actividad antioxidante de los extractos vegetales no se debe evaluar con un solo método debido a la naturaleza compleja de los fitoquímicos, ya que su determinación depende en gran medida del mecanismo de reacción involucrado: el ensayo mediante FRAP se basa en una reacción de transferencia de electrones, mientras que el ensayo mediante DPPH se considera un método mixto ya que se basa tanto en la transferencia de electrones como de átomos de hidrógeno (Tungmunthum *et al.*, 2020). En el presente estudio, los extractos obtenidos con la acetona acuosa presentaron los valores mayores en la actividad antioxidante determinada por FRAP (Tabla 1). Estos resultados fueron contrarios a los determinados en estambres de *C. sativus* donde se encontró que los extractos metanólicos presentaron los valores más elevados en la actividad antioxidante determinada por DPPH y FRAP (Jadouali *et al.*, 2017).

Contenido de fitoquímicos y actividad antioxidante considerando a las especies

Con respecto a la determinación de las clorofilas en los estambres, *C. imbricata* presentó un contenido mayor de clorofila a, mientras que *C. arbuscula* el más bajo (Tabla 2). En *C. kleiniae* se encontró un contenido mayor de clorofila b, mientras que *C. spinosior*, *C. imbricata* y *C. arbuscula* presentaron los valores más bajos (Tabla 2). No se observaron diferencias significativas en los niveles de clorofila c entre los estambres de las cuatro especies (Tabla 2). Para la clorofila d, *C. imbricata* mostró un contenido mayor, comparado con el de las otras tres especies (Tabla 2). En el contenido

total de clorofila, *C. imbricata* presentó los valores más altos, mientras que *C. arbuscula* mostró los más bajos (Tabla 2).

En cuanto al contenido de los carotenoides en los estambres, *C. spinosior* presentó el contenido mayor de xantofilas, mientras que *C. kleiniae* y *C. arbuscula* el más bajo (Tabla 2). En las especies *C. kleiniae*, *C. imbricata* y *C. arbuscula* se encontraron contenidos mayores de carotenoides, que en *C. spinosior* (Tabla 2). Sin embargo, en esta última especie se encontró un contenido mayor de betacianinas, betaxantinas y betalaínas en comparación con las otras tres especies, de las cuales *C. arbuscula* presentó los valores más bajos (Tabla 2).

Los estambres de las especies *C. imbricata*, *C. kleiniae* y *C. arbuscula* presentaron un contenido más alto de fenólicos totales, en comparación con los de *C. spinosior* (Tabla 2). Por otro lado, se obtuvieron niveles similares en el contenido de flavonoides en las cuatro especies (Tabla 2).

Con respecto a los azúcares reductores, en *C. kleiniae* se encontró un contenido mayor que en las otras tres especies, siendo en *C. imbricata* donde se presentaron los valores más bajos (Tabla 2).

Tabla 2. Evaluación del contenido de fitoquímicos y actividad antioxidante en los estambres de cuatro especies del género *Cylindropuntia*, considerando exclusivamente la variación entre las especies.

Table 2. Evaluation of phytochemicals and antioxidant activity content in the stamens from four *Cylindropuntia* species, considering exclusively the variation among the species.

Pigmentos	Especies			
	<i>C. kleiniae</i>	<i>C. spinosior</i>	<i>C. imbricata</i>	<i>C. arbuscula</i>
Clorofila a*	18.88±1.07 ^b	19.63±1.07 ^b	49.51±1.07 ^c	12.58±1.07 ^a
Clorofila b*	20.08±1.84 ^b	11.86±1.84 ^a	11.38±1.84 ^a	11.83±1.84 ^a
Clorofila c*	14.15±2.25 ^a	18.03±2.25 ^a	12.97±2.25 ^a	10.04±2.25 ^a
Clorofila d*	9.47±1.91 ^a	8.57±1.91 ^a	15.24±1.91 ^b	9.24±1.91 ^a
Clorofila total*	62.57±4.07 ^b	58.11±4.07 ^{ab}	89.10±4.07 ^c	43.73±4.07 ^a
Xantofilas*	2.98±5.71 ^a	29.37±5.71 ^c	10.31±5.71 ^b	3.50±5.71 ^a
Carotenoides*	16.63±1.81 ^b	1.76±1.81 ^a	11.35±1.81 ^b	12.15±1.81 ^b
Betacianinas*	0.020±0.00 ^b	0.190±0.00 ^d	0.050±0.00 ^c	0.010±0.00 ^a
Betaxantinas*	0.020±0.00 ^a	0.080±0.00 ^c	0.030±0.00 ^b	0.010±0.00 ^a
Betalaínas*	0.040±0.00 ^a	0.270±0.00 ^c	0.080±0.00 ^b	0.020±0.00 ^a
Fenólicos **	9.77±0.57 ^b	7.37±0.57 ^a	10.97±0.57 ^b	8.91±0.57 ^{ab}
Flavonoides ***	2.52±0.31 ^a	2.98±0.31 ^a	2.57±0.31 ^a	3.78±0.31 ^a
Azúcares reductores ****	136.89±1.3 ^d	115.56±1.3 ^b	98.22±1.3 ^a	130.33±1.3 ^c
FRAP *****	24.52±0.42 ^c	21.63±0.42 ^b	26.00±0.42 ^c	18.08±0.42 ^a
DPPH *****	23.84±0.28 ^c	20.86±0.28 ^a	22.56±0.28 ^b	21.01±0.28 ^a

* Datos expresados en mg por g de masa seca (mg·g⁻¹). ** mg de equivalentes de ácido gálico por g de masa seca (mg EAG·g⁻¹); *** mg de equivalentes de catequina por g de masa seca (mg EC·g⁻¹); **** mg equivalentes de glucosa por g de masa seca (mg EG·g⁻¹); ***** μM de equivalentes de TROLOX por g de masa seca (μM ET·g⁻¹). Los valores se presentan como media ± desviación estándar y se analizaron mediante una ANOVA ($p < 0.05$). Diferentes letras (a-d) muestran los resultados de la prueba múltiple de Tukey, que indican diferencias significativas ($p < 0.05$). Fuente: Elaboración propia.

La mayor actividad antioxidante determinada por FRAP se encontró en los estambres de *C. imbricata* y *C. kleiniae*, mientras que en los de *C. arbuscula* se encontró la menor (Tabla 2). Por otro lado, *C. kleiniae* mostró la mayor actividad antioxidante determinada por DPPH, mientras que en los de las especies *C. spinosior* y *C. arbuscula* se encontraron los niveles más bajos (Tabla 2).

En el presente estudio se observó una variación interespecífica significativa en los contenidos de clorofila a (de 12.58 a 49.51 mg·g⁻¹), clorofila b (de 11.38 a 20.08 mg·g⁻¹), clorofila d (de 9.24 a 15.24 mg·g⁻¹), clorofila total (de 43.73 a 89.10 mg·g⁻¹); xantofilas (de 2.98 a 29.37 mg·g⁻¹) y carotenoides (de 1.76 a 16.63 mg·g⁻¹); betacianinas (de 0.010 a 0.190 mg·g⁻¹), betaxantinas (de 0.010 a 0.080 mg·g⁻¹) y betalainas (de 0.020 a 0.270 mg·g⁻¹); fenólicos totales (de 7.37 a 10.97 mg GAE·g⁻¹); azúcares reductores (de 98.22 a 136.89 mg EG·g⁻¹) y actividad antioxidante determinada por FRAP (de 18.08 a 26.00 μM ET·g⁻¹) y DPPH (de 21.01 a 23.84 μM ET·g⁻¹) (Tabla 2). Aunque no existen estudios donde se haya cuantificado el contenido de fitoquímicos en estambres del género *Cylindropuntia*, en otro tipo de cactácea como es el del género *Opuntia* (Acosta, 2023), se observó una variación interespecífica entre *O. microdasys*, *O. macrocentra*, *O. engelmannii* y *O. arenaria* en extractos metanólicos acuosos de estambres en el contenido de clorofila a (de 5.84 a 14.76 mg·g⁻¹), clorofila b (de 11.28 a 25.02 mg·g⁻¹) y clorofila total (de 23.95 a 29.22 mg·g⁻¹), donde los valores observados fueron más bajos a los determinados en *Cylindropuntia*; en el contenido de xantofilas (de 1.66 a 4.85 mg·g⁻¹) y carotenoides (de 6.04 a 13.91 mg·g⁻¹), obteniéndose valores similares a los encontrados en el presente estudio; en el contenido de betacianinas (de 0.14 a 0.22 mg·g⁻¹), betaxantinas (de 0.010 a 0.02 mg·g⁻¹) y betalainas (de 0.16 a 0.23 mg·g⁻¹), con niveles semejantes a los determinados en el presente estudio; en el contenido de fenólicos totales (de 5.07 a 6.56 mg GAE·g⁻¹), con valores más bajos a los determinados en *Cylindropuntia*; en el contenido de flavonoides (de 3.66 a 4.81 mg CE·g⁻¹), siendo superiores a los determinados en el presente estudio; en el contenido de azúcares reductores (de 86.14 a 159.28 mg EG·g⁻¹), siendo valores similares a los de las especies de *Cylindropuntia*; y en la actividad antioxidante determinada por FRAP (de 18.46 a 27.47 μM ET·g⁻¹) y DPPH (de 10.64 a 17.42 μM ET·g⁻¹), obteniéndose niveles similares para los determinados por FRAP, pero inferiores a los determinados por DPPH (Acosta, 2023).

Comparando el contenido de fitoquímicos obtenido en los estambres de *Cylindropuntia* con los datos presentados en estudios previos de estambres de otro tipo de plantas, el contenido de carotenoides fue menor (de 1.76 a 16.63 mg·g⁻¹) (Tabla 2) que el reportado por Azghandi-Fardaghi et al. (2021) y Mamri et al. (2024) en estambres de *C. sativus* (159.14 mg·g⁻¹ y 152.97 Eq β-C mg·g⁻¹, respectivamente). Igualmente, el contenido de los fenoles totales fue menor (de 5.07 a 6.56 mg GAE·g⁻¹) (Tabla 2) que lo descrito por Jadouali et al. (2017) (35.69 mg GAE·g⁻¹) y por Mamri et al. (2024) (126.31 mg GAE·g⁻¹) en estambres de *C. sativus* y por Mohd-Zin et al., (2021) en estambres de *N. antares* (118.83 mg GAE·g⁻¹). El contenido de flavonoides también fue menor en los estambres de *Cylindropuntia* (2.52 a 3.78 mg CE·g⁻¹) (Tabla 2) que lo reportado por Jadouali et al. (2017) (14.10 mg CE·g⁻¹) y Mamri et al. (2024) (0.66 mg RE·g⁻¹) en estambres de *C. sativus*, por Mohd-Zin et al., (2021) en estambres de *N. antares* (82.23 mg CE·g⁻¹), por Tungmunthum et al., (2020) en estambres de *Nymphaea lotus* L. (loto egipcio blanco) (230.74 mg·g⁻¹) y por Zhang et al., (2023) en estambres de dos cultivares de *Punica granatum* (granada) (99.10 mg RE·g⁻¹ y 105.97 mg RE·g⁻¹); sin embargo, en un estudio más reciente realizado en estambres de *C. sativus* el contenido de flavonoides fue inferior (0.66 mg RE·g⁻¹) (Mamri et al., 2024) que el encontrado en las especies de *Cylindropuntia*. Finalmente, los estambres de *Cylindropuntia* tuvieron una capacidad antioxidante menor determinada por DPPH que los estambres de *Paeonia suffruticosa* (peonía arbórea) (207.80 μM ET·g⁻¹) (Xiang et al., 2019).

La variabilidad en los contenidos de los fitoquímicos entre los diferentes géneros y especies se asocia con la adaptación de las plantas, potencialmente impulsada por factores genéticos o ambientales, y contribuir a una mayor protección contra el estrés oxidativo (Zhang *et al.*, 2023). En general, los compuestos fenólicos son responsables de muchas interacciones entre las plantas y su entorno biótico y abiótico (Cárdenas-Sandoval *et al.*, 2012). Asimismo, estos compuestos tienen una distribución orgánica específica y se acumulan diferencialmente durante la ontogénesis y bajo la influencia de factores ambientales (Cárdenas-Sandoval *et al.*, 2012; Ayan *et al.*, 2007). Además, la biosíntesis de compuestos fenólicos está compartimentada subcelularmente y el papel de los compartimentos celulares no se ha dilucidado totalmente (Cárdenas-Sandoval *et al.*, 2012).

Los resultados mostraron que el contenido en fitoquímicos varió dependiendo de la especie. Estas diferencias en la concentración de compuestos fenólicos y actividad antioxidante entre las cuatro especies de *Cylindropuntia* pueden ser el resultado de procesos de adaptación de las plantas a las condiciones ambientales y a variaciones genéticas. Varios estudios han mostrado diferencias en las concentraciones de fitoquímicos entre variedades dentro de un mismo género (Zhang *et al.*, 2023); también influyen la fase fenológica y las diferentes condiciones de crecimiento de las plantas (Feng *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2023; Cárdenas-Sandoval *et al.*, 2012). Otros estudios indican que plantas desarrolladas en condiciones climáticas más extremas como en altitudes altas hacen que estén expuestas a intensidades de luz mayores, por lo que un mecanismo para prevenir el daño oxidativo causado por la fotooxidación podría ser el aumento de la concentración de fenólicos y flavonoides en ciertos órganos/tejidos de las plantas (Zhang *et al.*, 2023; Cárdenas-Sandoval *et al.*, 2012). Sin embargo, los resultados del presente trabajo al coleccionar las muestras en el mismo ambiente sugieren que las variaciones genéticas de cada especie podrían determinar las cantidades/perfiles de metabolitos secundarios para las especies estudiadas.

Análisis de funciones discriminantes canónicas

El análisis de funciones discriminantes canónicas mostró que las dos primeras funciones explicaron el 99.6 % de la variación total en el contenido de pigmentos. La primera función explicó el 81.8 % de la variación total, la cual se correlacionó con el contenido de betalaínas, betacianinas y betaxantinas. La segunda función, explicó el 17.8 % de la variación total y mostró una correlación con el contenido de la clorofila a y la clorofila total. Este análisis también mostró que las especies que presentaron perfiles de pigmentos más similares fueron *C. kleiniae* (1) y *C. arbuscula* (4), las cuales se agruparon hacia la parte inferior izquierda del diagrama, mientras que las otras dos especies fueron más diferentes en los contenidos de pigmento debido a que *C. spinosior* (2) se separó significativamente hacia la derecha del diagrama y *C. imbricata* (3) se separó hacia la parte superior del diagrama (Fig. 1).

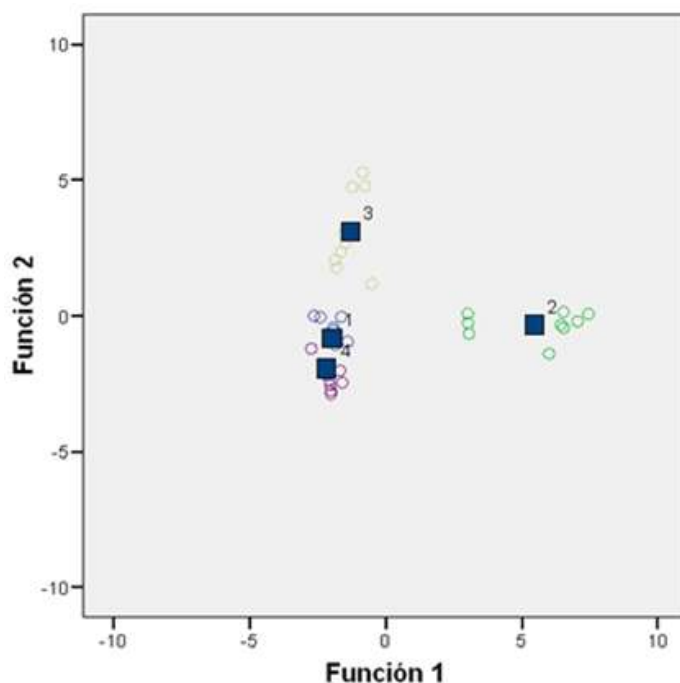


Figura 1. Diagrama de dispersión de las funciones discriminantes canónicas sobre el contenido de pigmentos de los estambres y pólenes de *C. kleiniae* (1), *C. spinosior* (2), *C. imbricata* (3) y *C. arbuscula* (4). Cada punto representa una muestra individual y su distribución está determinada por las funciones discriminantes. Fuente: Elaboración propia.

Figure 1. Scatter plot of canonical discriminant functions on the pigment content of stamens and pollens from *C. kleiniae* (1), *C. spinosior* (2), *C. imbricata* (3), and *C. arbuscula* (4). Each point represents an individual sample, and its distribution is determined by the discriminant functions. Source: Own elaboration.

Por otro lado, el análisis de las dos funciones discriminantes canónicas basadas en el contenido de fitoquímicos y actividad antioxidante explicaron el 92.7 % de la variación total. La primera función explicó el 69.9 % de la variancia total y se correlacionó con la actividad antioxidante determinada por DPPH y una correlación negativa con el contenido de flavonoides. La segunda función explicó el 22.8 % de la variación total y se correlacionó con los azúcares reductores. Ambas funciones mostraron que las especies que presentan perfiles de fitoquímicos más similares fueron *C. spinosior* (2) y *C. arbuscula* (4), mientras que la más diferente fue *C. kleiniae* (1), que se separó hacia la parte superior derecha del diagrama, y *C. imbricata* (3), que se separó hacia la parte inferior derecha del diagrama (Fig. 2).

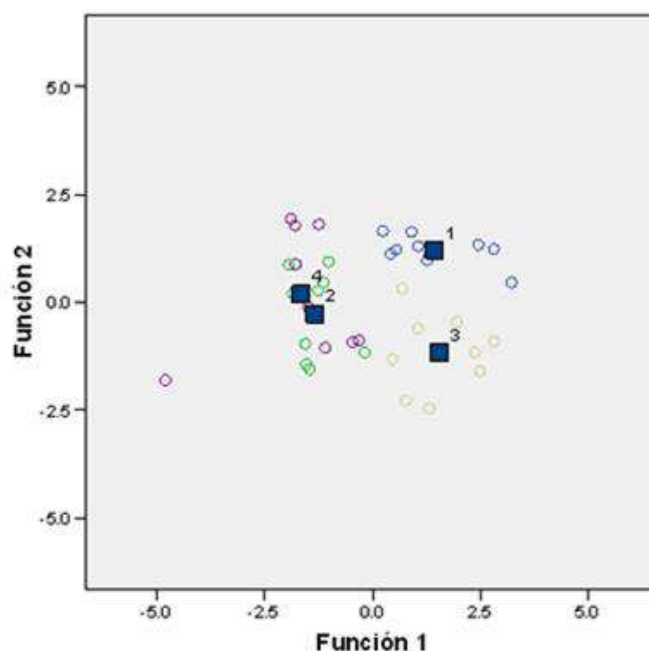


Figura 2. Diagrama de dispersión de las funciones discriminantes canónicas sobre el contenido de fitoquímicos y evaluación de la actividad antioxidante de los estambres y pólenes de *C. kleinioides* (1), *C. spinosior* (2), *C. imbricata* (3) y *C. arbuscula* (4). Cada punto representa una muestra individual y su distribución está determinada por las funciones discriminantes. Fuente: Elaboración propia.

Figure 2. Scatter plot of canonical discriminant functions on the phytochemical content and antioxidant activity assessment of stamens and pollen from *C. kleinioides* (1), *C. spinosior* (2), *C. imbricata* (3), and *C. arbuscula* (4). Each point represents an individual sample, and its distribution is determined by the discriminant functions. Source: Own elaboration.

Las Figs. 1 y 2, confirman las diferencias interespecíficas en la composición de fitoquímicos y capacidad antioxidante de los estambres de las cuatro especies estudiadas, permitiendo una mejor comprensión de las adaptaciones ecológicas y evolutivas de estas especies. Dentro de las variables que mostraron una mayor correlación a la diferenciación de las especies en los contenidos de los fitoquímicos fueron las clorofilas a y totales, betalainas, flavonoides, azúcares reductores y la actividad antioxidante determinada por DPPH.

C. imbricata presentó los valores más altos en el contenido de estas dos clorofilas seguido de *C. spinosior*, *C. kleinioides* y *C. arbuscula*. Las clorofilas, aunque su función principal es la fotosíntesis en las hojas, también pueden estar presentes en los pétalos y el polen, donde contribuyen a la absorción de luz y posiblemente a la protección contra el estrés lumínico (Narbona *et al.*, 2014; Manrique-Reol, 2003). Posiblemente, los estambres de *C. imbricata* presenten mejores mecanismos para captar con mayor eficiencia la absorción de luz y posiblemente en la protección contra el estrés lumínico. Asimismo, *C. spinosior* presentó los valores más elevados en el contenido de betalainas, seguida de *C. imbricata*, *C. kleinioides* y, por último, de *C. arbuscula*. Las betalainas, además de su función antioxidante, influyen en la coloración de las flores y en la atracción polinizadores (Stintzing y Carle, 2004). Posiblemente, los estambres de *C. spinosior* presenten mejores mecanismos para intensificar la

coloración de los estambres para atraer más polinizadores a sus flores. El contenido de fenoles y la actividad antioxidante determinada por DPPH fue superior en *C. kleiniae*, seguido de *C. imbricata*, *C. arbuscula* y, por último, de *C. spinosior*. Los compuestos fenólicos en los estambres podrían estar protegiendo al polen del daño por radiación UV y estrés oxidativo (Taylor y Hepler, 1997). También, el contenido de azúcares reductores fue más alto en los estambres de *C. kleiniae*, seguido de *C. arbuscula*, *C. spinosior* y *C. imbricata*. Los azúcares reductores proporcionan energía para la germinación del polen y el crecimiento del tubo polínico (Pacini, 1996).

Algunos estudios previos han utilizado los análisis discriminantes para dilucidar la similitud entre poblaciones o especies y el patrón de estas asociaciones a las variables medidas como el contenido de fitoquímicos y la actividad antioxidante (González-Fernández et al., 2025, Reyes-Corral et al., 2022; Berrabah et al., 2019). Concretamente, el análisis de funciones discriminantes encuentra funciones lineales de variables cuantitativas que separan al máximo grupos de individuos (procedencias) mientras mantienen la variación dentro de las procedencias lo más pequeña posible. Este enfoque distingue varias funciones discriminantes canónicas no correlacionadas. Se trata de combinaciones lineales de las variables originales que separan mejor las medias de los grupos de observaciones en relación con la variación dentro del grupo. Sin embargo, los resultados de estos estudios son complicados de comparar con los resultados obtenidos en el presente estudio, debido a que no pertenecen a las mismas especies, tipos de solventes o bien diferente tipo de análisis discriminante.

Los resultados obtenidos en el presente estudio fueron semejantes a los determinados por González-Fernández et al. (2025) sobre la caracterización del contenido de fitoquímicos y actividad antioxidante de semillas de *Echinocereus stramineus* (Cactaceae) en el municipio de Ciudad Juárez, Chihuahua, México, encontrándose que las dos primeras funciones del análisis discriminante canónico explicaron el 99.2 % de la varianza total y las variables que correlacionaron con estas dos primeras funciones también fueron los azúcares reductores, flavonoides y la actividad antioxidante determinada por DPPH. Reyes-Corral et al. (2022) en un estudio de la caracterización morfológica, germinación, contenido fitoquímico y actividad antioxidante en semillas de tres especies del género *Cylindropuntia* procedentes del municipio de Ciudad Juárez, Chihuahua, México, mencionaron que los dos primeros componentes principales explicaron el 99.9 % de la varianza total y dentro de las variables fitoquímicas que aportaron a la variación interespecífica de las tres especies analizadas fueron el contenido de proteína y la actividad antioxidante determinada por DPPH. Berrabah et al. (2019) en un estudio de la composición fitoquímica y propiedades antioxidantes de las flores de *Opuntia ficus-indica* a partir de germoplasma argelino, indicaron que las dos primeras funciones discriminantes explicaron el 90 % de la variancia total, mientras que las variables que correlacionaron para separar a las poblaciones estudiadas para ambas funciones también fueron los azúcares solubles y la actividad antioxidante. Estos resultados de alguna forma soportan los resultados obtenidos en el presente estudio.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente estudio constituyen la primera información sobre la composición fitoquímica y la actividad antioxidante de los estambres de cuatro especies del género *Cylindropuntia*. Se demostró que el solvente metanólico acuoso fue el más eficiente para extraer clorofilas, carotenoides, betalaínas y flavonoides, mientras que el acetónico acuoso fue el mejor para extraer azúcares reductores. El análisis de funciones discriminantes canónicas mostró que las

especies que presentan perfiles de pigmentos más similares fueron *C. kleiniae* y *C. arbuscula*, mientras que las más distantes fueron *C. spinosior* (2) y *C. imbricata* (3). Dentro de las variables que mostraron una mayor correlación a la diferenciación de las especies en los contenidos de los pigmentos fueron el contenido de betalainas, clorofila a y total. Sin embargo, *C. spinosior* (2) y *C. arbuscula* presentaron los perfiles de fitoquímicos más similares, mientras que los más diferentes fueron *C. kleiniae* y *C. imbricata*. Las variables que presentaron un mayor peso en esta diferenciación fueron el contenido de flavonoides, azúcares reductores y la actividad antioxidante determinada por DPPH. En general, nuestros hallazgos sugieren que los estambres de *C. imbricata* y *C. spinosior* podrían constituir una buena fuente de sustancias biológicamente activas. Estos resultados también sientan las bases para realizar estudios más detallados para la identificación y cuantificación de los metabolitos secundarios más abundantes que estas especies producen en los estambres para dar esas aplicaciones en un futuro.

Agradecimientos

La presente investigación fue realizada con el apoyo de la infraestructura de los laboratorios del Departamento de Ciencias Químicas Biológicas del Instituto de Ciencias Biomédicas de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Conflicto de interés

Los autores no tienen conflictos de intereses en la publicación de estos resultados.

5. Referencias

- Acosta, Z.J. (2024). Análisis fitoquímico, antioxidante y caracterización del polen de *Opuntia microdasys*, *O. macrocentra*, *O. engelmannii* y *O. arenaria* de la sierra de Samalayuca, Tesis de pregrado, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.
- Agostini-Costa, T.S. (2022). Genetic and environment effects on bioactive compounds of *Opuntia cacti*—a review. *Journal of Food Composition and Analysis* 109: 104514. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104514>
- Aispuro-Hernández, E., Vergara-Jiménez, M. J., Cárdenas-Torres, F. I., Martínez-Téllez, M. A., & Ontiveros, N. (2022). Cactaceae plants as sources of active bioavailable phytochemicals. *Food & Function*, 13(19): 9720-9733. <https://doi.org/10.1039/D2FO01863B>
- Ammar, I., Ennouri, M., & Attia, H. (2015). Phenolic content and antioxidant activity of cactus (*Opuntia ficus-indica* L.) flowers are modified according to the extraction method. *Industrial Crops and Products* 64: 97-104. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.11.030>
- Arvayo-Enríquez, H., Mondaca-Fernández, I., Gortáez-Moroyoqui, P., López-Cervantes, J., & Rodríguez-Ramírez, R. (2013). Carotenoids extraction and quantification: a review. *Analytical Methods*, 5(12): 2916-2924. <https://doi.org/10.1039/C3AY26295B>
- Ávila-Núñez, R., Rivas-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. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90424216002>

- Ayan, A.K., Yanar, O., Cirak, C., & Bilgener, M. (2007). Morphogenetic and diurnal variation of total phenols in some *Hypericum* species from Turkey during their phenological cycles. *Bangladesh Journal of Botany* 36(1): 39-46. <https://doi.org/10.3329/bjb.v36i1.1547>
- Azghandi-Fardaghi, A., Es-haghi, A., Feizy, J., & Lakshmipathy, R. (2021). Antioxidant capacity and chemical composition of different parts of saffron flowers. *Journal of Food and Bioprocess Engineering* 4(1): 69-74. <https://doi.org/10.22059/jfab.2021.316326.1078>
- Balandrán-Quintana, R. R., González-León, A., Islas-Rubio, A. R., Madera-Santana, T.J., Soto-Valdez, H., Mercado-Ruiz, J. N., Peralta, E., Robles-Osuna, L.E., Vásquez-Lara, F., Carvallo-Ruiz, T., Granados-Nevárez, M. C., Martínez-Núñez, Y.Y., & Montoya-Ballesteros, L. C. (2018). An overview of cholla (*Cylindropuntia* spp.) from Sonora, Mexico. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 20: 162-177. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v20i.35>
- Berrabah, H., Taïbi, K., Abderrahim, L. A., & Boussaid, M. (2019). Phytochemical composition and antioxidant properties of prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L.) flowers from the Algerian germplasm. *Food Measurement and Characterization* 13: 1166-1174. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00032-8>
- Bustamante, E., & Burquez, A. (2005). Fenología y biología reproductiva de las cactáceas columnares. *Cactaceas y Suculentas mexicanas* 50(3): 68-88. https://web.ecologia.unam.mx/cactsucmex/CACTACEAS2005_3.pdf
- Butnariu, M. (2016). Methods of analysis (extraction, separation, identification and quantification) of carotenoids from natural products. *Journal of Ecosystems & Ecography* 6: 193. <https://doi.org/10.4172/2157-7625.1000193>
- Cardenas-Sandoval, B.A., López-Laredo, A.R., Martínez-Bonfil, B.P., Bermúdez-Torres, K., & Trejo-Tapia, G. (2012). Advances in the phytochemistry of *Cuphea aequipetala*, *C. aequipetala* var. *hispida* and *C. lanceolata*: Extraction and quantification of phenolic compounds and antioxidant activity. *Revista mexicana de ingeniería química*, 11(3): 401-413. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S166527382012000300005&lng=es&tlng=en
- Castellanos-Santiago, E., & Yahia, E.M. (2008). Identification and quantification of betalains from the fruits of 10 mexican prickly pear cultivars by high-performance liquid chromatography and electrospray ionization mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56(14): 5758-5764. <https://doi.org/10.1021/jf800362t>
- Chandrasekara, A., & Shahidi, F. (2018). Herbal beverages: Bioactive compounds and their role in disease risk reduction - A review. *Journal of Traditional and Complementary Medicine* 8(4): 451-458. <https://doi.org/10.1016/j.jtcme.2017.08.006>
- Das, G., Lim, K.J., Tantengco, O.A.G., Carag, H.M., Gonçalves, S., Romano, A., Das, S.K., Coy-Barrera, E., Shin, H.S., Gutiérrez-Grijalva, E.P., Heredia, J.B., & Patra, J.K. (2021). Cactus: Chemical, nutraceutical composition and potential bio-pharmacological properties. *Phytotherapy Research: PTR* 35(3): 1248-1283. <https://doi.org/10.1002/ptr.6889>
- de Castro Campos Pinto, N., & Scio, E. (2014). The biological activities and chemical composition of *Pereskia* species (Cactaceae) a review. *Plant Foods for Human Nutrition* 69(3): 189-95. <https://doi.org/10.1007/s11130-014-0423-z>
- Deltoro-Torró, V., Gómez-Serrano, M.A., Laguna-Lumbreras, E., & Novoa-Pérez, A. 2014. Bases para el control del cactus invasor *Cylindropuntia pallida*. Colección Manuales Técnicos de Biodiversidad, 5. Conselleria d'Infraestructures, Territori i Medi Ambient. Generalitat Valenciana. Valencia, España. https://www.oriuela.es/wp-content/uploads/2016/12/control_cactus_invasor.pdf

- Eyshi, S., Ghareaghajlou, N., Afshar Mogaddam, M.R., & Ghasempour, Z. (2024). Red beet betalains extraction process: A comprehensive review of methods, applications, and physicochemical properties. *Food Science & Nutrition* 12(11): 8540-8558. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4458>
- Feng, Y., Zhao, K., Li, J., Wang, M., Yin, H., Fan, Z., Li, X., & Liu, W. (2024). Transcriptome and pigment analyses provide insights into carotenoids and flavonoids biosynthesis in *Camellia nitidissima* stamens. *Horticulturae* 10(4): 420. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10040420>
- Fontenele, R.S., Salywon, A.M., Majure, L.C., Cobb, I.N., Bhaskara, A., Avalos-Calleros, J.A., Argüello-Astorga, G.R., Schmidlin, K., Khalifeh, A., Smith, K., Schreck, J., Lund, M.C., Köhler, M., Wojciechowski, M.F., Hodgson, W.C., Puente-Martinez, R., Van-Doorslaer, K., Kumari, S., Oyeniran, K.A., & Varsani, A. (2021). New world Cactaceae plants harbor diverse Geminiviruses. *Viruses* 13(4): 694. <https://doi.org/10.3390/v13040694>
- Galván-Gutiérrez, R.A. (2019). Aislamiento de inhibidores de la ureasa presentes en un extracto metanólico de raíz de cholla (*Cylindropuntia cholla*) por cromatografía en columna. Tesis. Universidad Abierta y a Distancia de México, *Repositorio institucional de la Univer.* <http://www.repositorio.unadmexico.mx:8080/xmlui/handle/123456789/182>
- 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>
- González-Fernández, R., Quiñones-Martínez, M., & Valero-Galván, J. (2023). Variaciones morfológicas en el fruto y semillas de cuatro estadios del fruto de *Cylindropuntia spinosior* (Cactaceae). *TECNOCENCIA Chihuahua*, 17(3): e1184. <https://doi.org/10.54167/tch.v17i3.1184>
- Gonzalez-Fernández, R., Quiñones-Martínez, M., Osuna-Avila, P., & Valero-Galván, J. (2025). Study on fruit seed morphology and morphometry, seed phytochemicals, and germination characterization in three populations of *Echinocereus stramineus* (Cactaceae) at Ciudad Juarez Municipality, Chihuahua, Mexico. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 27: 35-55. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v27i.574>
- Grodzicki, W., & Dziendzikowska, K. (2020). The Role of selected bioactive compounds in the prevention of Alzheimer's Disease. *Antioxidants (Basel, Switzerland)* 9(3): 229. <https://doi.org/10.3390/antiox9030229>
- Guzmán, U., Arias, S., & Dávila-Aranda, P.D. (2003). Catálogo cactáceas mexicanas. Universidad Autónoma de México. CONABIO, México. <https://www.worldcat.org/es/title/catalogo-de-cactaceas-mexicanas/oclc/948238461>
- Hertog, M.G.L., Hollman, P.C.H., & Van de Putte, B. (1993). Content of potentially anticarcinogenic flavonoids of tea infusions, wines, and fruit juices. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 41(8): 1242-1246. <https://doi.org/10.1021/jf00032a015>
- Hoang, T., & Kim, J. (2021). Phytonutrient supplements and metabolic biomarkers of cardiovascular disease: An umbrella review of meta-analyses of clinical trials. *Phytotherapy Research: PTR* 35(8): 4171-4182. <https://doi.org/10.1002/ptr.7079>
- Hunt, D. (2016). *CITES. Cactaceae Checklist* (3rd ed.). Royal Botanic Gardens Kew & International Organization for Succulent Plant Study. <https://www.kew.org/sites/default/files/2019-02/CITES%20Cactaceae%20Checklist%20Third%20Edition.pdf>
- Islam, M.S., Rahman, M.S., Khatun, M., Hajibeigy, M., Uddin, M.N., & Khatun, M.M. (2024). Extraction of organic pigments from tomato (*Solanum lycopersicum* L.), turmeric (*Curcuma longa* L.) and red amaranth (*Amaranthus tricolor* L.) for safe use in agroproducts. *Heliyon* 10(3): e25278. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25278>
- Jadouali, S.M., BouzoubaÃ¢, Z., Majourhat, K., Mamouni, R., Gharby, S., & Atifi, H. (2017, November). Polyphenols content, flavonoids and antioxidant activity of petals, stamens, styles

- and whole flower of *Crocus sativus* of Taliouine. *Acta Hort.* 1184: 301-308. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1184.43>
- Jiménez-Sierra, C.L. (2011). Las cactáceas mexicanas y los riesgos que enfrentan. *Revista Digital Universitaria* 12(1): 1-23. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/las-cactaceas-mexicanas-y-los-riesgos-que-enfrentan-5040758>
- Kumar, N., & Goel, N. (2019). Phenolic acids: Natural versatile molecules with promising therapeutic applications. *Biotechnology Reports (Amsterdam, Netherlands)* 24: e00370. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00370>
- 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)
- Malusa, J., Felger, R., Rutman, & Baker, M. (2014). Ajo peak to tinajas altas: A flora in southwestern Arizona. Part 7. Eudicots: Cactaceae – Cactus Family. *Phytoneuron* 69: 1-95. <https://www.phytoneuron.net/2014Phytoneuron/69PhytoN-SWArizCacti.pdf>
- Mamri, S., Daoudi, N.E., Baraich, A., Ouahhoud, S., Khoulati, A., Choukri, M., Asehraou, A., Bnouham, M., Jaouadi, B., Abousalham, A., Dabiellil, F., Salamatullah, A.M., & Saalaoui, E. (2024). Comprehensive analysis of bioactive compounds in *Crocus sativus* stamens extracts by HPLC-DAD: investigating antidiabetic activity via in vitro, in vivo, and molecular docking simulation. *Frontiers in Chemistry* 12:1419120. <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1419120>
- Márquez-Rangel, I., Cruz, M., Neira-Vielma, A.A., Ramírez-Barrón, S.N., Aguilar-Zarate, P., & Belmares, R. (2025). Plants from arid zones of Mexico: Bioactive compounds and potential use for food production. *Resources* 14(1): 13. <https://doi.org/10.3390/resources14010013>
- Manrique-Reol, E. (2003). Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de luz para la fotosíntesis. *Ecosistemas* 12(1). <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/250>
- Martínez, R.M., Melo, C.P.B., Pinto, I.C., Mendes-Pierotti, S., Vignoli, J.A., Verri, W.A., & Casagrande, R. (2024). Betalains: a narrative review on pharmacological mechanisms supporting the nutraceutical potential towards health benefits. *Foods* 13(23): 3909. <https://doi.org/10.3390/foods13233909>
- Mohd-Zin, Z., Sanuri, A.Z.M., Bashah, N., Ibrahim, K., Yahya, H., & Zainol, M.K. (2021). Effect of different extraction solvents on antioxidant properties of water lily (*Nymphaeaceae antares*) flower petal and stamen. *Food Research* 5(3): 359-368. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.5\(3\).653](https://doi.org/10.26656/fr.2017.5(3).653)
- Moreno-Escamilla, J.O., Álvarez-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>
- Nagarajan, J., Wah-Heng, W., Galanakis, C. M., Nagasundara-Ramanan, R., Raghunandan, M.E., & Sun, J. (2016). Extraction of phytochemicals using hydrotropic solvents. *Separation Science and Technology* 51(7): 1151-1165. <https://doi.org/10.1080/01496395.2016.1143842>
- Narbona, E., Buide, M.L., Casimiro-Soriguer, I., & Del Valle, J.C. (2014). Polimorfismos de color floral: causas e implicaciones evolutivas. *Ecosistemas* 23(3): 36-47. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2014.23-3.06>
- Ngo, T.V., Scarlett, C.J., Bowyer, M.C., Ngo, P.D., & Vuong, Q.V. (2017). Impact of different extraction solvents on bioactive compounds and antioxidant capacity from the root of *Salacia chinensis* L. *Journal of food quality* 1(1): 9305047. <https://doi.org/10.1155/2017/9305047>

- Nortjie, E., Basitere, M., Moyo, D., & Nyamukamba, P. (2022). Extraction methods, quantitative and qualitative phytochemical screening of medicinal plants for antimicrobial textiles: A review. *Plants (Basel, Switzerland)* 11(15): 2011. <https://doi.org/10.3390/plants11152011>
- Ortega-Baes, P., & Godínez-Álvarez, H. (2006). Global diversity and conservation priorities in the Cactaceae. *Biodiversity & Conservation* 15: 817-827. <https://doi.org/10.1007/s10531-004-1461-x>
- Pacini, E. (1996). Types and meaning of pollen carbohydrate reserves. *Sexual Plant Reproduction* 9: 362-366. <https://doi.org/10.1007/BF02441957>
- Ramírez-Rodríguez, Y., Martínez-Huélamo, M., Pedraza-Chaverri, J., Ramírez, V., Martínez-Tagüña, N., & Trujillo, J. (2020). Ethnobotanical, nutritional and medicinal properties of Mexican drylands Cactaceae Fruits: Recent findings and research opportunities. *Food Chemistry* 312: 126073. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126073>
- Rangel-Huerta, O.D., Pastor-Villaescusa, B., Aguilera, C.M., & Gil, A. (2015). A systematic review of the efficacy of bioactive compounds in cardiovascular disease: Phenolic compounds. *Nutrients* 7(7): 5177-5216. <https://doi.org/10.3390/nu7075177>
- Reyes-Corral, V. I., González-Fernández, R., Quiñones-Martínez, M., Rodrigo-García, J., Iván-Garza, G., & Valero-Galván, J. (2022). Characterization of the morphometry, germination process, phytochemicals, and antioxidant capacity of seeds of three species of the genus *Cylindropuntia* (Cactaceae) of Chihuahua state. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 24: 251-268. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v24i.506>
- 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(1): 115-126. <https://doi.org/10.1007/s11099-008-0019-7>
- Santos-Díaz, M. del S., & Camarena-Rangel, N.G. (2019). Cacti for production of metabolites: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology* 103: 8657-8667. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10125-5>
- Sinha, D., Mukherjee, S., & Chowdhury, S. (2022). Methods of extraction of phytochemicals. In Singh, A. (Ed.) *Isolation, Characterization, and Therapeutic Applications of Natural Bioactive Compounds* IGI Global. pp. 250-279. <http://dx.doi.org/10.4018/978-1-6684-7337-5.ch010>
- Stintzing, F.C., & Carle, R. (2004). Functional properties of anthocyanins and betalains in plants, food, and in human nutrition. *Trends in Food Science & Technology* 15(1): 19-38. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.07.004>
- Sun, D., Wu, S., Li, X., Ge, B., Zhou, C., Yan, X., Ruan, R., & Cheng, P. (2024). The structure, functions and potential medicinal effects of chlorophylls derived from microalgae. *Marine Drugs* 22(2): 65. <https://doi.org/10.3390/md22020065>
- Tamiaki, H., & Kichishima, S. (2025). Chlorophyll pigments and their synthetic analogs. *Plant & cell physiology* 66(2): 153-167. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcae094>
- Tripathi, S., Singh, S., Mishra, N., & Mishra, N. (2025). The impact of solvent polarity on the phenolic and antioxidant capacity of green coffee beans (*Robusta species*) extracts. *Nutrition Food Science* 13(2). <https://bit.ly/3XJs66v>
- Tungmunnithum, D., Drouet, S., Kabra, A. & Hano, C. (2020). Enrichment in antioxidant flavonoids of stamen extracts from *Nymphaea lotus* L. using ultrasonic-assisted extraction and macroporous resin adsorption. *Antioxidants* 9(7): 576. <https://doi.org/10.3390/antiox9070576>
- Taylor, L.P., & Hepler, P.K. (1997). Pollen germination and tube growth. *Annual review of plant biology* 48: 461-491. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.48.1.461>
- Valero-Galván, J., Garza-Vallejo, G.I., Quiñones-Martínez, M., & González-Fernández, R. (2024). Seed morphometry and NaCl and sucrose effect on germination rates and phytochemicals in sotol

- (*Dasyilirion acrotrichum*) from the Chihuahua state, Mexico. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 26: 87-106. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v26i.554>
- Vicas, S. I., Laslo, V., Pantea, S., & Bandici, G.E. (2010). Chlorophyll and carotenoids pigments from Mistletoe (*Viscum album*) leaves using different solvents. *Analele Universitatii din Oradea, Fascicula Biologie*, 17(2), 213-218. <https://bioresearch.ro/2010-2/213-218%20-%20VICAS%20S.I.%20-%20U.O.Prot.Med.Ro.%20-%20Chlorophyll%20and%20carotene.pdf>
- Xiang, J., Yang, C., Beta, T., Liu, S., & Yang, R. (2019). Phenolic profile and antioxidant activity of the edible tree peony flower and underlying mechanisms of preventive effect on H₂O₂-induced oxidative damage in caco-2 cells. *Foods* 8(10): 471. <https://doi.org/10.3390/foods8100471>
- Yen, G.C., Wu, S.C., & Duh, P.D. (1996). Extraction and identification of antioxidant components from the leaves of mulberry (*Morus alba* L.). *Journal of agricultural and food chemistry*, 44(7): 1687-1690. <https://doi.org/10.1021/jf9503725>
- Zhang, H., Wang, M., Yu, G., Pu, J., Tian, K., Tang, X., & Deng, Q. (2023). Comparative analysis of the phenolic contents and antioxidant activities of different parts of two pomegranate (*Punica granatum* L.) Cultivars: 'Tunisia' and 'Qingpi'. *Frontiers in Plant Science* 14: 1265018. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1265018>

2025 TECNOCIENCIA CHIHUAHUA.

Esta obra está bajo la Licencia Creative Commons Atribución No Comercial 4.0 Internacional.

