

Evaluación morfo-química de frutos de pitaya de la Zona Media de San Luis Potosí

Morphochemical evaluation of pitaya fruits from the Zona Media of San Luis Potosí

Enrique Maldonado-Cervantes¹ , Cristian López-Palacios^{1*} , Hugo Magdaleno Ramírez-Tobías² , Christian Michel-Cuello¹ 

¹Facultad de Estudios Profesionales Zona Media, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Carretera Rioverde-San Ciro Km. 4.0, colonia Puente del Carmen, CP. 79617. Rioverde, San Luis Potosí, México.

²Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Carretera San Luis Potosí-Matehuala Km. 14.5, Ejido Palma de la Cruz. Apartado postal 32. Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, México.

*Autor de correspondencia: cristian.lopez@uaslp.mx

Artículo científico

Recibido: 05 de septiembre 2024

Aceptado: 18 de abril 2026

RESUMEN. El género *Stenocereus* produce frutos llamados "pitayas", valorados por su apariencia y contenido nutricional. Aunque existen estudios sobre diversas especies de *Stenocereus*, hay una falta de investigaciones que caractericen estos frutos en la región media de San Luis Potosí. El objetivo de este estudio fue la caracterización morfoquímica de las variantes de pitaya Amarilla y Roja (*S. huastecorum*) y Blanca y Morada (*S. pruinosus*) en estado de madurez de consumo. Se evaluó el diámetro polar y ecuatorial, número de aréolas, grosor de cáscara, biomasa de fruto, pulpa y semillas, sólidos solubles totales y pH. También se extrajeron polisacáridos estructurales y proteínas de la pulpa y semillas deshidratadas. Los mucílagos, pectinas, hemicelulosa débilmente y fuertemente unida a la celulosa y celulosa fueron extraídos y cuantificados y se determinó la fibra dietética. El diseño experimental fue completamente al azar, con seis repeticiones. Los resultados mostraron diferencias ($p \leq 0.05$) en el diámetro polar, biomasa de semillas y número de semillas por fruto. La concentración de mucílago y pectina en la pulpa no difirió significativamente ($p > 0.05$) entre las variantes. En cuanto a las hemicelulosas y celulosa, se observó una tendencia de mayor contenido en las variantes Amarilla > Roja > Blanca > Morada. En semillas, la celulosa+lignina fue mayor en las variantes Blanca y Morada. El aporte de fibra y proteínas es mayor en semillas que en pulpa. Las albuminas, globulinas 11S y glutelinas de las semillas no varían entre las variedades de pitaya. Las globulinas 7S sí presentaron diferencias.

Palabras clave: Polisacáridos estructurales, proteína, *Stenocereus huastecorum*, *Stenocereus pruinosus*.

ABSTRACT. The *Stenocereus* genus produces fruits known as "pitayas," valued for their appearance and nutritional content. Although there are studies on various *Stenocereus* species, research characterizing these fruits in the Zona Media of San Luis Potosí is lacking. The aim of this study was to perform a morphochemical characterization of the pitaya variants Amarilla and Roja (*S. huastecorum*) and Blanca and Morada (*S. pruinosus*) at the consumption maturity stage. Polar and equatorial diameters, number of areoles, peel thickness, fruit, pulp, and seed biomass, total soluble solids, and pH were evaluated. Structural polysaccharides and proteins were also extracted from dehydrated pulp and seeds. Mucilage, pectins, loosely and tightly bound hemicelluloses, and cellulose were extracted and quantified, and dietary fiber content was determined. The experimental design was completely randomized with six replications. The results showed differences ($p \leq 0.05$) in polar diameter, seed biomass, and the number of seeds per fruit. The concentration of mucilage and pectin in the pulp did not differ significantly ($p > 0.05$) between the variants. Regarding hemicellulose and cellulose, a trend of higher content was observed in the variants Amarilla > Roja > Blanca > Morada. In seeds, cellulose+lignin was higher in the Blanca and Morada variants. The fiber and protein content is higher in seeds than in pulp. Seed albumins, globulins 11S, and glutelins did not vary among the pitaya varieties, but globulins 7S showed differences.

Keywords: Structural polysaccharides, protein, *Stenocereus huastecorum*, *Stenocereus pruinosus*.

INTRODUCCIÓN

Stenocereus spp. es un cactus columnar nativo de regiones áridas y semiáridas de México cuyos frutos son conocidos como "pitayas", valorados por su apariencia, flavor y valor nutrimental (Neder-Suárez *et al.* 2024). El género comprende 24 especies, de las cuales 21 son endémicas de México, de las que *S. stellatus* (Pfeiff.) Riccob., *S. griseus* (Haw.) Buxb., *S. thurberi* (Engelm.) Buxb., *S. pruinosus* (Otto ex Pfeiff.) Buxb. y *S. queretaroensis* (F.A.C.Weber ex Mathes.) Buxb. se encuentran en plantaciones comerciales (Noriega-Juárez *et al.* 2024). El resto de las especies se emplean como material de construcción, forraje, cerco vivo, combustible y alimento en poblaciones silvestres o de traspatio (Alvarado-Sizzo *et al.* 2019).

Los frutos de *Stenocereus* se distinguen por su diversidad de colores de pulpa, que van del rojo, morado, amarillo al blanco, los cuales poseen características organolépticas que los hacen atractivos para su consumo, además de sus componentes asociados entre los que se han identificado vitaminas, minerales, fibra cruda, betalainas, carotenoides y compuestos fenólicos (Noriega-Juárez *et al.* 2024). Estas características los hacen alimentos funcionales, ya que estimulan el sistema inmunológico y reducen la inflamación, el riesgo de enfermedades cardiovasculares, degenerativas y cáncer (Aryal *et al.* 2024).

Los frutos de diversas especies se han caracterizado fisicoquímicamente. Así, en frutos de *S. queretaroensis*, cosechados en plantaciones comerciales de Jalisco, México, se registra biomasa de 40.1 a 85.1 g, contenido de sólidos solubles totales de 10.5 a 12.1° Brix y pH de 3.78 a 4.6 (Gaytan-Andrade *et al.* 2020, Noriega-Juárez *et al.* 2024). Por su parte en frutos de coloración roja y naranja de *S. pruinosus* recolectados en plantaciones de traspatio de la mixteca poblana se ha registrado biomasa de fruto, mesocarpio y epicarpio de 177.0 a 180.9 g, de 128.6 a 130.6 g y de 50.3 a 48.4 g, respectivamente, y con diámetro ecuatorial y polar de 6.3 a 6.9 cm y de 7.9 a 8.5 cm (García-Cruz *et al.* 2013). En cuanto a sus características químicas, los mismos autores encontraron que poseen de 9.3 a 10.3° Brix y con contenido de ácido málico de 0.13 a 0.17 %. En otro estudio (Hinojosa-Gómez y Muy-Rangel 2023) realizado en frutos de variedades roja, amarilla, naranja y tinta de *S. thurberi* procedentes de poblaciones silvestres de Sinaloa, México, se registraron valores de 12.4 a 13.3° Brix.

Los polisacáridos estructurales son macromoléculas clasificadas como pectinas, mucílagos, hemicelulosas y celulosas, cuyas funciones y concentraciones varían según la especie, órgano, tejido, etapa de desarrollo y ambiente (Reyes-Agüero *et al.* 2019). Aunque no se tiene información específica para frutos de pitaya (*Stenocereus* spp.), en tuna (*Opuntia* spp.) el contenido de polisacáridos solubles representa hasta el 50% de los polisacáridos estructurales totales (Peña-Valdivia *et al.* 2012).

La fibra dietética, compuesta por carbohidratos no digeribles como polisacáridos y oligosacáridos, se clasifica de acuerdo a su solubilidad en agua en fibra soluble, que incluye a los mucílagos, pectinas y hemicelulosas débilmente unidas a la celulosa, y fibra insoluble, que incluye a las hemicelulosas fuertemente unidas a la celulosa y celulosa (He *et al.* 2022). El contenido de fibra presente en la pitaya varía dependiendo de la especie, se ha registrado que los frutos de *S. queretaroensis* poseen de 3.9 a 5.3% en frutos (Noriega-Juárez *et al.* 2024) y en los de *S. thurberi* de 3.4 a 3.8% (Hinojosa-Gómez y Muy-Rangel 2023). En frutos de pitaya se tiene registro de hasta 2.2

g 100 g⁻¹ de peso fresco de proteína en la pulpa, lo que la hace rica en el contenido de proteína respecto a otros frutos (Ramírez-Rodríguez *et al.* 2020, Noriega-Juárez *et al.* 2024).

La zona Media de San Luis Potosí se ubica entre la Sierra Madre Oriental y la Sierra de Álvarez (INEGI 2024). En esta región las pitayas se recolectan de forma silvestre y se comercializan a orilla de carretera y en diversos mercados. La recolección se realiza por las mañanas con ayuda de pértiga o gancho elaborado con una rama de carrizo (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) seco de hasta 3 m, en la cual se les hace una horqueta de cuatro picos. En esta región se tiene abundancia de la especie *S. huastecorum* Alvarado-Sizzo y en menor escala *S. pruinosa*. Los índices de madurez empleados por los recolectores son los mismos que emplean los productores de *S. pruinosa* y *S. stellatus* de la mixteca poblana (García-Cruz *et al.* 2013), los cuales incluyen la abscisión de la espina, aspecto de hinchazón del fruto y cáscara de aspecto brillante con tonalidad de verde a rojizo. Si bien existen diversos estudios sobre diversas especies de *Stenocereus*, la mayoría de ellos se enfocan en las especies domesticadas o semidomesticada, pero se carecen estudios que caractericen los frutos en la región media de San Luis Potosí. Por tal motivo, el presente trabajo tiene por objetivo realizar la caracterización morfoquímica de frutos de *Stenocereus* de la región media de San Luis Potosí.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

Frutos de pitaya de *S. huastecorum* Alvarado-Sizzo, variantes Amarilla y Roja, y de *S. pruinosa* (Otto ex Pfeiff.) Buxb., variantes Blanca y Morada, se recolectaron durante mayo-junio de 2017 de poblaciones silvestres en el municipio San Cirilo de Acosta de San Luis Potosí, México (21°39' LN, 99°49' LO, 920 msnm) con clima BS1(h') hw (semiseco cálido con lluvias en verano) (García, 2004) con temperatura media de 22.6°C con máxima y mínima medias de 30.2 y 15.1°C, respectivamente, y con precipitación media anual de 531 mm (CONAGUA 2024). El índice de madurez se determinó cuando se desprendían fácilmente sus espinas.

Caracterización morfoquímica

Los frutos se trasladaron al Laboratorio de Procesos de la Facultad de Estudios Profesionales Zona Media de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí en donde se contabilizó el número de aréolas del fruto. El diámetro polar y ecuatorial del fruto y grosor de cáscara se midió con ayuda de un vernier pie de rey digital (Caliper-Mitutoyo, Japón). La biomasa de fruto fue medida en una balanza granataria (Ohaus, NVL2101/1, EE.UU.), luego se separó la cáscara y se determinó su biomasa. Para separar las semillas de la pulpa se centrifugó la pulpa a 34 g durante 3 min (Hermle Z206A, Alemania). Las semillas se precipitaron de manera intacta y el sobrenadante constituyó la pulpa, la cual se pesó para cuantificar su biomasa y se determinó el contenido de sólidos solubles totales (SST) con un refractómetro digital (DR201-95, KRÜSS Optronic, Alemania) y pH (Ohaus, ST3100, EE.UU.). Las semillas se secaron a temperatura ambiente (22 ± 4°C), se pesaron y cuantificaron.

En pulpa y semillas se determinó el contenido de polisacáridos estructurales y fibra dietética. Para la pulpa se determinó la proteína total y en semillas las fracciones de proteínas de reserva. Para ello

la pulpa se liofilizó y las semillas se secaron a temperatura ambiente ($22 \pm 4^\circ \text{C}$) y se molieron en mortero hasta obtener un polvo fino. El método utilizado para la extracción de polisacáridos fue descrito y utilizado para frutos xoconostle (*Opuntia matudae* Sheinvar) por Álvarez y Peña-Valdivia (2009). Los polisacáridos extraídos fueron mucílago, pectina, hemicelulosas débilmente y fuertemente unidas a la celulosa y celulosa. El método describe la extracción de polisacáridos en secuencia con agua caliente, solución acuosa de oxalato de amonio, solución acuosa de hidróxido de potasio, precipitación con etanol y purificación mediante diálisis (MWCO 12-14 kDa, ZelluTrans, Roth, Karlsruhe, Alemania) durante 48 h contra agua destilada para remover contaminantes de peso molecular bajo. La celulosa fue el residuo obtenido después de la extracción de los otros polisacáridos, en el caso de las semillas se consideró celulosa + lignina. Todos los polisacáridos se liofilizaron y pesaron para obtener su concentración. Los polisacáridos se extrajeron a partir de 1 g de pulpa liofilizada y de 0.5 g de harina de las semillas. Los resultados se expresaron como $\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$ de materia seca (MS). La fibra dietética soluble se determinó como el total del contenido de mucílagos, pectinas y hemicelulosas débilmente unidas a la celulosa y la insoluble como la suma de hemicelulosas fuertemente unidas a la celulosa y celulosa.

Las proteínas de reserva albuminas, globulinas 7S, globulinas 11S y glutelinas de las semillas de pitaya fueron extraídas de acuerdo al método descrito por Barba-de-la-Rosa *et al.* (1992). La harina de las semillas se desengrasó con hexanos (1:10) con agitación constante (Orbital Shaker, TS-1000) durante 4 h. Las proteínas de reserva fueron extraídas de la harina desengrasada mediante solubilización selectiva con ciclos continuos de agitación, sonicación en baño y centrifugación, albuminas en agua desionizada; globulinas 7S en 0.1 M NaCl, 20mM PBS, 1 mM EDTA; globulinas 11S en 0.8 M NaCl, 20mM PBS, 1 mM EDTA; prolaminas en 70% etanol; glutelinas en 0.1 Tris pH 8.

Las proteínas totales de pulpa fueron extraídas de material liofilizado con una solución de extracción (NaCl 0.1M, Na_2HPO_4 35 mM, triton x-100 1%, β -ME 0.1%) en relación 1:10. La mezcla se agitó durante 10 min, se sonicó en baño por 15 min y se centrifugó 5 min a 13000 rpm y 4°C . El sobrenadante recuperado se precipitó con metanol-cloroformo. El precipitado se diluyó en amortiguador de fosfatos (PBS). La cuantificación de proteína se determinó con el método colorimétrico Bradford (Barba-de-la-Rosa *et al.* 1992) con albumina de suero bovino como estándar. Las mediciones se hicieron a 595 nm en espectrofotómetro y se expresaron como $\text{mg } \text{g}^{-1}$ MS.

Mediante electroforesis desnaturante SDS-PAGE en geles de poliacrilamida al 12% se fraccionaron las proteínas totales y al 16% las proteínas de reserva de semilla. Los geles se tiñeron con Coomassie coloidal, se fijaron con solución de etanol al 50% y ácido fosfórico al 2% durante 3 h. Después se agregó solución de equilibrio, metanol al 33%, sulfato de amonio al 17% y ácido fosfórico al 3%, y se dejó en la solución durante 1 h y se adicionó Coomassie G-250 al 6%; los geles fueron desteñidos con agua destilada.

Las bandas de cada gel se escindieron con bisturí sobre la placa del transiluminador, se colocaron en microtubos de 1.5 mL y se lavaron exhaustivamente con agua desionizada estéril durante 3 h. Las bandas se deshidrataron con acetonitrilo. La reducción se efectuó con DTT 10 mM en solución de bicarbonato de amonio, seguida de una alquilación con 50 mM de iodoacetamida. La digestión se efectuó con tripsina grado secuenciación (Promega, Madison, WI, USA) durante toda la noche.

Los fragmentos resultantes se extrajeron con solución de acetonitrilo y agua a relación 3:2 (v/v) que contenía 0.1% de ácido trifluoroacético. Cada sobrenadante fue concentrado para su secuenciación.

La espectrometría de masas se realizó en el equipo Synapt-HDMS (Waters corp., Milford MA., USA) acoplado en línea a UPLC. Los péptidos se cargaron dentro de una pre-columna de 20 mm x 180 μ m. La separación de péptidos se efectuó dentro de una columna analítica BEH130 C18, eludidos durante 30 min un flujo de 60 nL con gradiente lineal de fase móvil B, seguido de un lavado con 80% de la fase móvil B. La columna se equilibró a las condiciones iniciales durante 15 min con la fase móvil A (ácido fórmico al 0.01%). Para la determinación de péptidos, el espectrómetro fue operado en modo V. Todos los análisis fueron realizados usando ionización por electrospray en el modo de ion positivo ESI (+). La muestra proteínica de interés se analizó por MS/MS bajo los siguientes parámetros: tripsina como proteasa y tolerancia de péptidos de 10 ppm. Los datos obtenidos de la espectrometría MS/MS fueron analizados empleando el programa MASCOT (Matrix Science, Boston MA., USA) empleando la base de datos del National Center for Biotechnology Information (NCBI).

Diseño experimental

El diseño experimental empleado fue completamente al azar, con cuatro tratamientos (variantes) y seis repeticiones por tratamiento, donde un fruto fue una unidad experimental. Se verificó que los datos cumplieran con los supuestos de homocedasticidad, normalidad e independencia. El análisis de varianza (ANDEVA) y la prueba de comparaciones múltiples de medias de Tukey ($p \leq 0.05$) fueron realizados con el software RStudio versión 4.2.2.

RESULTADOS

Las variables morfológicas de número de areolas por fruto, anchura del fruto, grosor de cáscara y en las biomásas del fruto, pulpa y cáscara no mostraron diferencias intervarietales ($p > 0.05$) (Tabla 1). El largo de fruto de la pitaya Amarilla fue mayor en contraste con los de la variante Roja ($p \leq 0.05$). Los frutos de pitaya Roja fueron los más abundantes en semillas y representaron mayor biomasa de las mismas ($p \leq 0.05$).

Tabla 1. Variables morfológicas en frutos de cuatro variantes de pitaya (*Stenocereus* spp.).

Variante	Nare (núm.)	Dpol (mm)	Decu (mm)	Gcas (mm)	Bfru (g)	Bpul (g)	Bcas (g)	Bsem (g)	Nsem (núm.)
Amarilla	56.33 ^a	64.20 ^a	50.18 ^a	2.29 ^a	86.28 ^a	63.12 ^a	21.92 ^a	1.25 ^b	1011.67 ^b
Blanca	49.67 ^a	57.05 ^{ab}	51.68 ^a	2.74 ^a	80.08 ^a	53.27 ^a	24.76 ^a	2.05 ^{ab}	1060.33 ^b
Morada	44.67 ^a	57.49 ^{ab}	52.21 ^a	2.17 ^a	86.69 ^a	64.10 ^a	22.26 ^a	1.56 ^{ab}	943.50 ^b
Roja	54.85 ^a	54.12 ^b	52.06 ^a	2.32 ^a	80.44 ^a	56.12 ^a	22.08 ^a	2.23 ^a	1589.08 ^a

Nare: número de areolas por fruto. Dpol: diámetro polar del fruto; Decu: diámetro ecuatorial del fruto; Gcas: Grosor de cáscara; Bfru: biomasa del fruto; Bpul: biomasa de pulpa; Bcas: biomasa de cáscara; Bsem: biomasa de semillas totales; Nsem: número de semillas por fruto. Letras iguales en cada columna indican similitud estadística (Tukey, $p \leq 0.05$).

Los frutos de las variedades Amarilla y Morada fueron menos ácidos con un pH mayor en contraste con los de las otras variedades estudiadas ($p \leq 0.05$, Figura 1). En tanto los sólidos solubles totales sobresalieron en los frutos de la variedad Morada ($p \leq 0.05$, Figura 2). En cuanto a los polisacáridos estructurales de la pulpa presentaron diferencias intervarietales ($p > 0.05$) en el contenido de mucílago y pectina. En semilla sólo se presentaron diferencias ($p \leq 0.05$) en el contenido de celulosa+lignina. Las hemicelulosas fuertemente unidas a la celulosa y la celulosa de la pulpa tuvieron la tendencia Amarilla > Roja > Blanca > Morada ($p \leq 0.05$). El contenido total de celulosa+lignina de las semillas fue mayor en las variantes Blanca y Morada comparado con Amarilla.

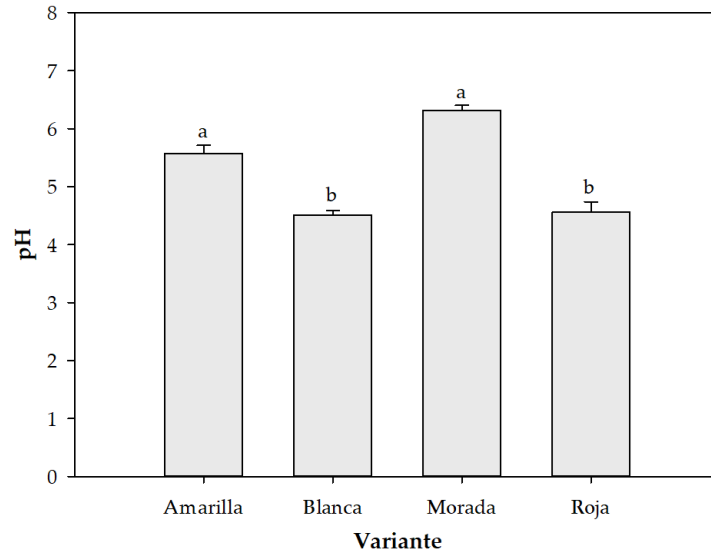


Figura 1. pH de pulpa de los frutos de cuatro variantes de pitaya (*Stenocereus* spp.). Las barras indican el error estándar, letras diferentes indican diferencias estadísticas (Tukey; $p \leq 0.05$).

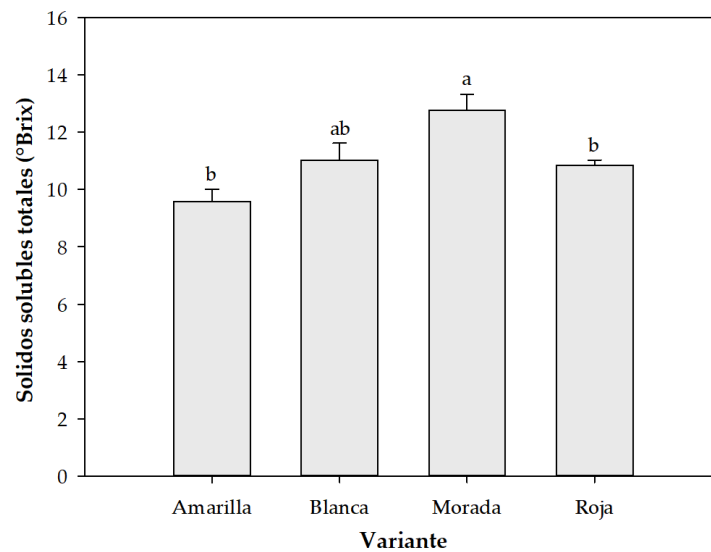


Figura 2. Sólidos solubles totales (°Brix) de pulpa de los frutos de cuatro variantes de pitaya (*Stenocereus* spp.). Las barras indican el error estándar, letras diferentes indican diferencias estadísticas (Tukey; $p \leq 0.05$).

Entre las estructuras estudiadas, independientemente de la variedad, las semillas tuvieron hasta 53 % menos mucílago y 25, 64 y 52% más pectinas, hemicelulosas débilmente y fuertemente unidas a la celulosa, respectivamente. El contenido de celulosa en semillas representó hasta un 99% del contenido total de celulosas en los frutos de las cuatro variedades estudiadas, ya que constituyó la celulosa+lignina (Tabla 2).

Tabla 2. Contenido de polisacáridos estructurales y fibra dietética soluble e insoluble (g 100 g⁻¹ MS) en frutos de cuatro variantes de pitaya (*Stenocereus* spp.).

Variante	Mucílago	Pectina	HDU	HFU	Cel+Lig [†]	FDS	FDI
<i>Pulpa</i>							
Amarilla	1.753 ^a	0.907 ^a	2.377 ^a	0.300 ^a	0.427 ^a	5.037 ^b	0.727 ^c
Blanca	2.490 ^a	0.250 ^a	1.413 ^{ab}	0.210 ^a	0.250 ^{ab}	4.150 ^{ab}	0.460 ^b
Morada	1.600 ^a	0.500 ^a	0.010 ^b	0.004 ^b	0.003 ^b	1.860 ^a	0.007 ^a
Roja	1.650 ^a	1.837 ^a	1.767 ^a	0.270 ^a	0.307 ^a	5.253 ^b	0.577 ^{bc}
<i>Semilla</i>							
Amarilla	0.533 ^a	0.510 ^a	2.067 ^a	0.320 ^a	22.220 ^b	3.110 ^a	22.540 ^b
Blanca	0.687 ^a	0.553 ^a	2.237 ^a	0.393 ^a	19.183 ^a	3.477 ^a	19.577 ^{ab}
Morada	0.897 ^a	0.757 ^a	2.877 ^a	0.530 ^a	17.910 ^a	4.530 ^a	18.440 ^a
Roja	0.600 ^a	0.347 ^a	2.290 ^a	0.403 ^a	19.243 ^{ab}	3.237 ^a	19.647 ^{ab}

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey; $p \leq 0.05$). HDU: hemicelulosas débilmente unidas a la celulosa; HFU: hemicelulosas fuertemente unidas a la celulosa; Cel+Lig: celulosa y lignina; FDS: fibra dietética soluble; FDI: fibra dietética insoluble. [†]En pulpa se cuantificó como celulosa.

El contenido de fibra dietética de los tejidos comestibles (pulpa + semilla) frutos de *Stenocereus* fue diferente ($p \leq 0.05$) entre las variantes estudiadas (Figura 3). Las semillas de la variante Amarilla presentaron el contenido mayor de fibra dietética comparado con las otras variantes. La pulpa de las cuatro variantes tuvo contenido similar de fibra dietética ($p > 0.05$) con contenido promedio de 4.92 g 100 g⁻¹ MS. La fibra dietética insoluble (FDI) en pulpa, semilla y total se presentó en diferentes concentraciones ($p \leq 0.05$) entre las variantes de pitaya estudiadas. La variante Amarilla tuvo el contenido mayor en pulpa, semilla y total. Las variantes Blanca y Morada tuvieron 15% menos FDI en el fruto ($p \leq 0.05$). En tanto que en semilla y frutos las variantes Morada y Blanca presentaron hasta 18 y 37%, respectivamente, menos FDI que la Amarilla. El contenido de fibra dietética soluble (FDS) en semilla, pulpa y total no registró diferencias intervarietales ($p > 0.05$), con valores promedio de 7.18, 4.31 y 11.49 g 100 g⁻¹ MS respectivamente.

El contenido de proteína en pulpa y total fue diferente ($p > 0.05$) entre las cuatro variantes de pitaya, con valores promedio de 2.28 y 33.21 mg g⁻¹ MS, respectivamente (Figura 4). Las semillas presentaron hasta 92% más proteína que la pulpa. Las fracciones proteicas no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$), excepto las globulinas 7S que si presentaron diferencias ($p \leq 0.05$); siendo las semillas de la variante Amarilla las que presentaron mayor concentración en comparación con las de la variante Blanca (Tabla 3).

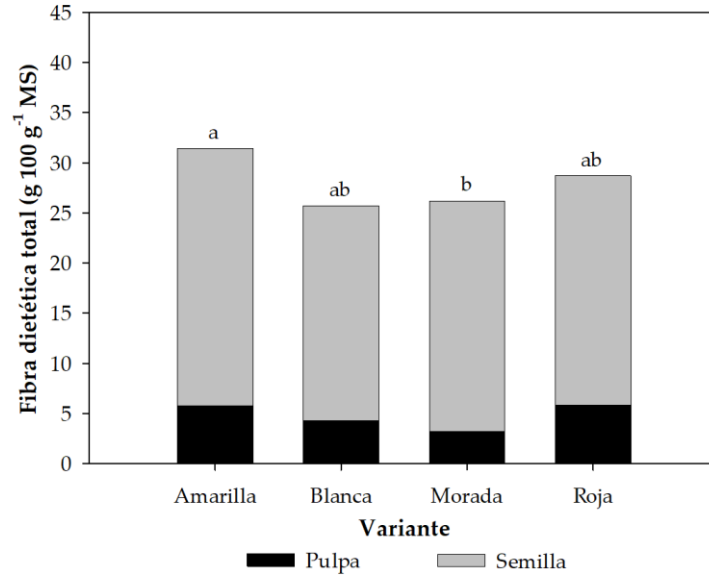


Figura 3. Contenido de fibra dietética total (g 100 g⁻¹ MS) en frutos de cuatro variantes de pitaya (*Stenocereus* spp.). Letras diferentes indican diferencias estadísticas (Tukey; $p \leq 0.05$).

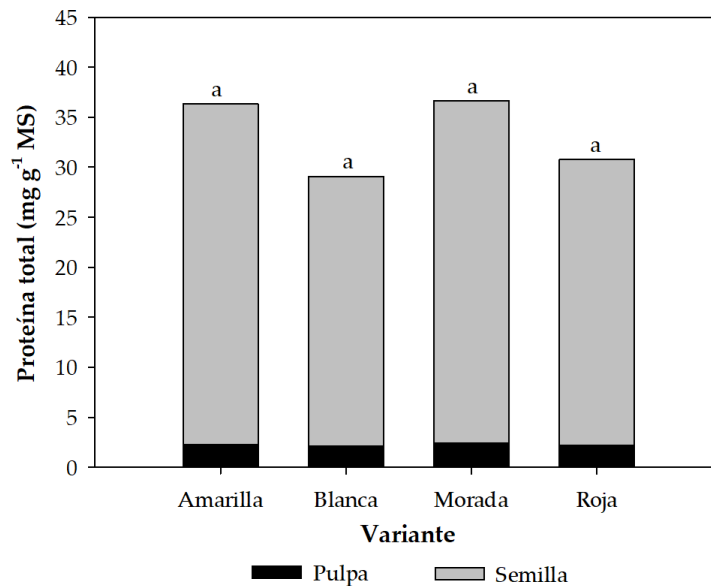


Figura 4. Contenido de proteína total (mg g⁻¹ MS) en frutos de cuatro variantes de pitaya (*Stenocereus* spp.). Letras diferentes indican diferencias estadísticas (Tukey; $p \leq 0.05$).

Tabla 3. Contenido de proteínas (mg g⁻¹ MS) en semillas de cuatro variantes de pitaya (*Stenocereus* spp.).

Variante	Albuminas	Globulinas 7S	Globulinas 11S	Glutelinas
Amarilla	6.375 ^a	7.453 ^a	7.781 ^a	12.435 ^a
Blanca	5.627 ^a	5.489 ^b	7.500 ^a	8.301 ^a
Morada	6.525 ^a	6.244 ^{ab}	9.147 ^a	12.307 ^a
Roja	6.832 ^a	6.270 ^{ab}	7.447 ^a	8.007 ^a

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

Los patrones electroforéticos de proteína de pulpa de las variantes Amarilla, Blanca y Roja muestran diferencias en el patrón de bandeo (Figura 5). Mientras que Amarilla y Blanca muestran un patrón de bandeo muy similar entre sí. Se identificaron cuatro proteínas, una de cada fracción de proteínas de reserva del grano. En albumina la proteína Fosfoenolpiruvato Carboxilasa (PEPC) tiene mayor expresión en Morada y Roja (Figura 5A). En las fracciones de Globulinas 7S de las semillas de las variantes Morada y Roja se identificó el Citocromo C Oxidasa subunidad 2 (Figura 5B), mientras que el Citocromo C Oxidasa Subunidad 1 se identificó en la fracción de las Globulinas 11S de las variantes Blanca y Amarilla (Figura 5C). La proteína Maturase K (matK) fue identificada en Blanca, Roja y Morada en la fracción de las glutelinas (Figura 5D).

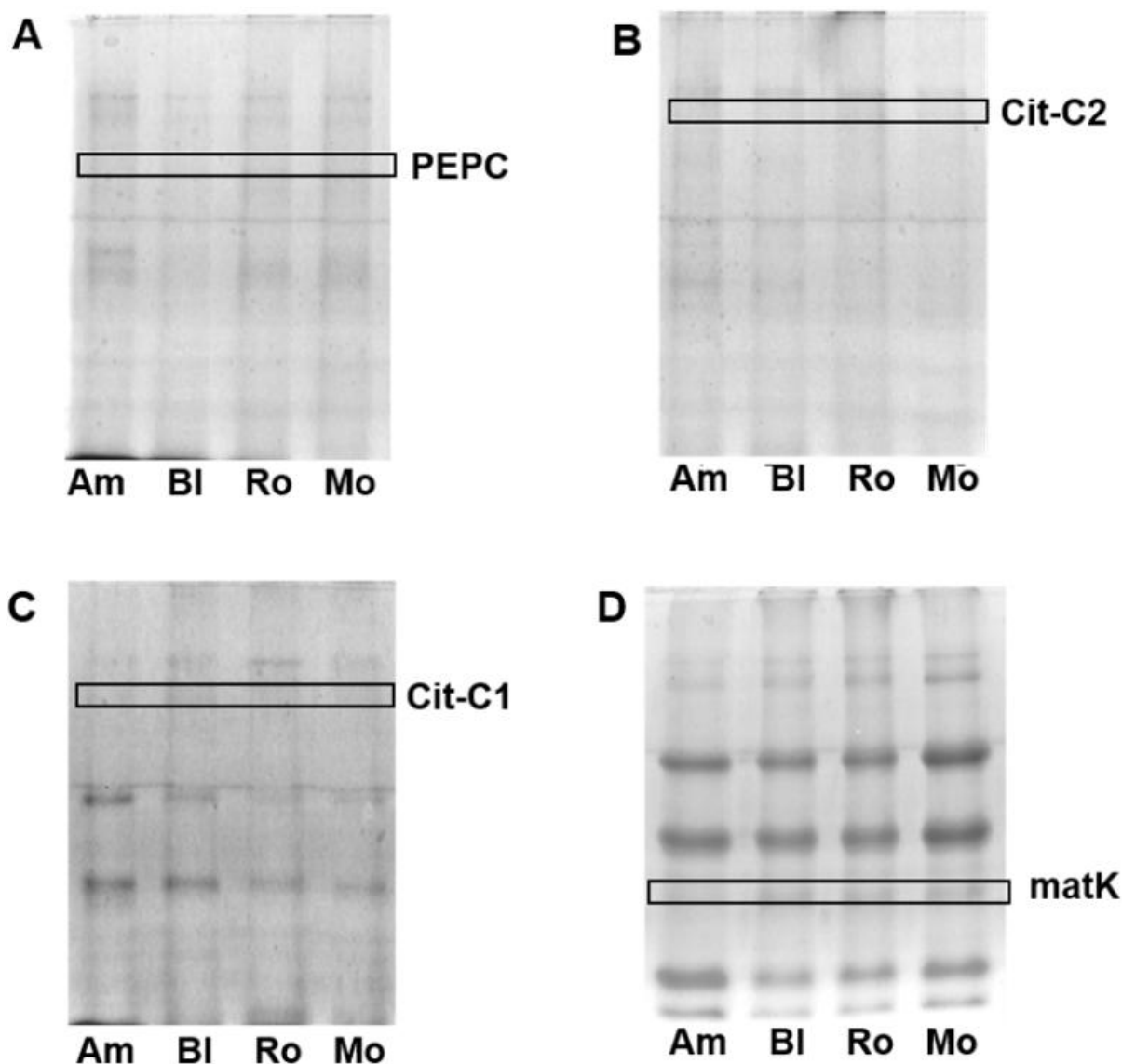


Figura 5. Análisis electroforético SDS-PAGE de las fracciones proteicas de semillas de cuatro variantes de pitaya (*Stenocereus* spp.): albuminas (A), globulinas 7S (B), globulinas 11S (C) y glutelinas (D). Am: amarilla; Bl: blanca; Ro: roja; Mo: morada; PEPC: fosfoenolpiruvato carboxilasa; Cit-C1: citocromo C oxidasa subunidad 1; Cit-C2: citocromo C oxidasa subunidad 2; matK: maturase K.

DISCUSIÓN

La biomasa del fruto y los diámetros polar y ecuatorial de las variantes estudiadas fueron similares a los reportado para frutos de *S. queretaroensis* (Gaytán-Andrade *et al.* 2020, Noriega-Juárez *et al.* 2024), pero también menores a los reportados para los de *S. pruinosus* de plantaciones comerciales de la mixteca poblana (García-Cruz *et al.* 2013). Estas diferencias pueden deberse a que los frutos de este estudio proceden de poblaciones silvestres, las cuales no están sometidas a la presión de selección como lo están las poblaciones de la mixteca poblana. En cuanto al número de semillas fue similar a lo registrado en frutos de *S. pruinosus* (Luna-Morales y Aguirre 2001). Sin embargo, la variación encontrada entre las variantes puede ser una estrategia evolutiva para el establecimiento de cada una de ellas, así la variante Roja, que tuvo el contenido de semillas mayor (Tabla 1) respecto a las otras variantes, puede estar relacionada con el éxito en el establecimiento de nuevos individuos (Ayala-Cordero *et al.* 2004), lo que se observa con las grandes poblaciones de *S. huastecorum* var. Roja presente en la región de estudio.

El contenido de sólidos solubles totales resulto similar a lo encontrado para frutos de *S. thurberi*, *S. pruinosus* y *S. queretaroensis* (Luna-Morales y Aguirre 2001, Gaytán-Andrade *et al.* 2020, Hinojosa-Gómez y Muy-Rangel 2023, Noriega-Juárez *et al.* 2024). En tanto los frutos de las variantes Blanca y Roja fueron similares a lo registrado para frutos de *S. queretaroensis* (Noriega-Juárez *et al.* 2024) en tanto que las otras variantes fueron mayores. Las diferencias intervarietales encontradas en el contenido de sólidos solubles totales y pH (Figuras 1 y 2) se debe a condiciones ambientales y genotípicas, las variantes Roja y Amarilla son la de mayor aprecio en la región por lo que también tenga efecto sobre las características fisicoquímicas de los frutos.

La concentración de mucílagos y hemicelulosas fuertemente unidas a la celulosa fue menor, pero similares para las hemicelulosas débilmente unidas a la celulosa, a los valores reportados en brotes florales de *N. cochenillifera*, cladodios jóvenes de *Opuntia* spp. y cáscara de *O. matudae* (Álvarez y Peña-Valdivia 2009, López-Palacios *et al.* 2012, Peña-Valdivia *et al.* 2012, Reyes-Agüero *et al.* 2019). El contenido de pectinas fue similar a lo encontrado en cladodios jóvenes (López-Palacios *et al.* 2012, Peña-Valdivia *et al.* 2012) e inferior a lo reportado para brotes florales y cáscara de *O. matudae* (Álvarez y Peña-Valdivia 2009, Reyes-Agüero *et al.* 2019). Los estudios realizados en estas especies han demostrado que el contenido de mucílago disminuye y sus características fisicoquímicas se modifican con la etapa de maduración de los tejidos (Reyes-Agüero *et al.* 2019). Aunque este estudio no evaluó el efecto de la maduración de los frutos de pitaya sobre estos polisacáridos, es probable que la pulpa de los frutos en madurez fisiológica y de consumo presenten concentración de mucílago menor y de pectinas mayor respecto a frutos en desarrollo.

Se ha documentado la presencia de este polisacárido en semillas de especies de zonas áridas (Hu *et al.* 2019) y se ha relacionado con su capacidad germinativa, de adsorción de agua y como coadyuvante en el establecimiento de la plántula (Mascot-Gómez *et al.* 2020). En *S. queretaroensis* se tiene registro de la presencia de mucílago en la semilla el cual incrementa hasta un 50% la germinación (Mascot-Gómez *et al.* 2020). En algunas especies el mucílago de las semillas tiene un efecto positivo sobre el microbiota del suelo, a favor de los hongos, y protege a la plántula de patógenos y sequía (Hu *et al.* 2019), lo que se ha observado en semillas de *O. streptacantha*. En tanto las pectinas y hemicelulosas se bioacumulan en las semillas durante la maduración del fruto y

actúan como sustancias de reserva de las semillas (Reyes-Agüero *et al.* 2019). Estos compuestos también están relacionados con el balance hídrico de la semilla y con funciones hidrotectoras del embrión, lo cual puede estar más relacionado con las hemicelulosas débilmente unidas a la celulosa clasificadas como gomas (López-Palacios *et al.* 2012). Si bien no existen antecedentes de esto en semillas de *Stenocereus*, es probable que el mucílago y su interacción con los otros constituyentes de la pared celular tengan efecto sobre la germinación y el establecimiento de plántulas en los ambientes áridos en los que se desarrolla, lo cual podría explicar los contrastes entre los tejidos estudiados (Tabla 2).

Las diferencias intervarietales en el contenido de hemicelulosas fuertemente unidas a la celulosa que tuvieron las variedades de pitaya, se presentaron también en variantes de *Opuntia* donde el contenido de estas hemicelulosas fue distinto entre las variedades (López-Palacios *et al.* 2012), lo que puede indicar que su concentración es dependiente de la variedad. El contenido de hemicelulosas fuertemente unidas a la celulosa también está relacionado con la disponibilidad de agua durante su desarrollo, cuando ocurre un cambio significativo en el potencial de agua del suelo puede ocasionar un incremento de hemicelulosas (Reyes-Agüero *et al.* 2019). Sin embargo, no podemos asegurar que para el caso de *Stenocereus* estos supuestos sean aceptables, pues habría que evaluar las condiciones a las que el fruto estuvo expuesto durante su desarrollo. En cuanto al contenido de la celulosa, en promedio la pulpa presentó valores inferiores a los reportados para cáscara de xoconostle (*O. matudae*), nopalitos (*Opuntia* spp.) y tunita (*N. cochenillifera*) (Álvarez y Peña-Valdivia 2009, López-Palacios *et al.* 2012, Reyes-Agüero *et al.* 2019). Al igual que las hemicelulosas débilmente unidas, la celulosa de la pulpa mostró una tendencia mayor en las variantes de *S. huastecorum* (Amarilla y Roja), por lo que la bioacumulación de estos compuestos puede ser efecto de una respuesta de adaptación de esta especie al ambiente en donde se desarrolla la planta. Si bien la lignina no es un polisacárido, es un componente presente en la fibra dietética y su aporte nutrimental es importante considerando las abundantes semillas que poseen las pitayas, por lo cual se cuantificó junto a las celulosas. En este estudio se observó que, al igual que en la pulpa, las variantes de *S. huastecorum* presentaron la concentración mayor de estos compuestos.

El contenido de fibra encontrado fue alto en comparación con lo reportado en *S. queretaroensis* (Noriega-Juárez *et al.* 2024). Estos contenidos también fueron superiores a lo reportados para frutos de *Opuntia matudae* (Álvarez y Peña-Valdivia 2009) y brotes florales de *N. cochenillifera* (Reyes-Agüero *et al.* 2019) otras cactáceas de interés antropocéntrico. El contenido de fibra dietética se concentra en la semilla, el cual es 90% mayor que el contenido en pulpa, en la que las semillas aportan hasta un 98% más FDI. Similares observaciones se han hecho en tunas de *O. ficus-indica*, en donde las semillas contienen 80% más fibra dietética que la pulpa (Jiménez-Aguilar *et al.* 2015). La FDS se presentó en proporción 1:1 (semilla:pulpa) en las variantes Roja y Amarilla, pero hubo mayor proporción en las semillas de las variantes Blanca y Morada, en esta última la proporción fue de 4:1 (Tabla 2).

Los valores obtenidos de proteína (Figura 4) en pulpa fueron mayores a los reportados para frutos de *S. queretaroensis* (Noriega-Juárez *et al.* 2024). Existen factores abióticos (*i.e.* nutrientes en el suelo, disponibilidad de agua y temperatura) que determinan el aumento o disminución en el contenido de proteína en las plantas y la variante (Noriega-Juárez *et al.* 2024). El contenido de albuminas 7S en semilla de pitaya puede estar involucrado con la capacidad germinativa de la semilla

postulando que las semillas de Amarilla y en las variantes Roja y Blanca tendrán un porcentaje mayor de germinación, lo cual concuerda con el mayor contenido de semillas de la variante Roja.

La PEPC, además de participar en las funciones fotosintéticas, también cumple con funciones no fotosintéticas y se encuentra en diferentes concentraciones en semillas en desarrollo y durante el proceso germinativo. El aumento de la actividad de PEPC coincide con el proceso de bioacumulación de sustancias de reserva (Yamamoto *et al.* 2020), lo cual explica su presencia en las semillas de *Stenocereus* spp.

Las subunidades 1 y 2 de la Citocromo C Oxidasa forman el núcleo funcional del complejo enzimático y están codificadas en la mitocondria (Mansilla *et al.* 2018), las cuales se han identificado en levaduras, animales y plantas. Las subunidades 1 y 2 provenientes de *Stenocereus* spp. se encontraron en organismos como escarabajos (*Carcinops consors* J.L. LeConte) y nematodos (*Meloidogyne enterolobii* Yang & Eisenback), respectivamente, a pesar de que la identidad entre estas es alrededor del 100%, tiene un porcentaje de cobertura bajo. Esto indica que se trata de proteínas análogas que se expresan en organismos completamente diferentes, pero que desempeñan la misma función. La expresión de matK está influenciada por la luz y la etapa de desarrollo de algunas especies, siendo la luz un factor importante para que la proteína codifique o no en independencia del gen trnK (Zhang *et al.* 2022), la intensidad lumínica podría ser el factor que determina la expresión de esta proteína entre las variantes de *Stenocereus* spp., pero serán necesarios estudios más detallados que lo demuestren.

CONCLUSIONES

Los frutos mostraron características morfológicas similares entre las variantes estudiadas. La riqueza de semillas por fruto de las variantes Roja y Amarilla es concordante con las amplias poblaciones de estas en la zona Media de San Luis Potosí y en la cual pueden estar involucradas en el contenido de globulinas 7S encontradas en las semillas. Los frutos de pitaya (*Stenocereus* spp.) no presentaron diferencias intervarietales en el contenido de polisacáridos estructurales solubles y proteína. Las semillas de *Stenocereus* spp. tuvieron diferencias intervarietales en el contenido total de fibra dietética, mientras que en pulpa fue constante su contenido. El aporte de fibra y proteínas es mayor en semillas que en pulpa. Las albuminas, globulinas 11S y glutelinas de las semillas no varían entre las variedades de pitaya, en cambio, las globulinas 7S sí presentaron diferencias.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo de la M. en C. María Esther Romero Hernández de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por su apoyo en la cuantificación de polisacáridos estructurales. Se agradece también a los Ing. Erika Nohemí Álvarez Contreras y Reyes Govea Hernández por su apoyo en la etapa de recolección de frutos y análisis de datos.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Alvarado-Sizzo H, Casas A, González-Rodríguez A, Arreola-Nava HJ, Terrazas T (2019) Clave dicotómica y distribución del complejo de especies de *Stenocereus griseus* (Cactaceae). *Revista Mexicana de Biodiversidad* 90(2019): 1-16. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v17i.60>
- Álvarez AR, Peña-Valdivia CB (2009) Structural polysaccharides in xoconostle (*Opuntia matudae*) fruits with different ripening stages. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 11: 26-44.
- Aryal D, Joshi S, Thapa NK, Chaudhary P, Basaula S, Joshi U, Bhandari D, Rogers HM, Bhattarai S, Sharma KR, Regmi BP, Parajuli N (2024) Dietary phenolic compounds as promising therapeutic agents for diabetes and its complications: a comprehensive review. *Food Science and Technology* 12(5): 3025-3045. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3983>
- Ayala-Cordero G, Terraza T, López-Mata L, Trejo C (2004) Variación en el tamaño y peso de la semilla y su relación con la germinación en una población de *Stenocereus beneckeii*. *Interciencia* 29(12): 692-697.
- Barba-de-la-Rosa AP, Paredes-López O, Gueguen J (1992) Characterization of amaranth globulins by ultracentrifugation and chromatographic techniques. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 40(6): 937-940. <https://doi.org/10.1021/jf00018a003>
- CONAGUA (2024) Normales climatológicas. https://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Normales_Climatologicas/Med-Extr/slp/medex24054.TXT. Fecha de consulta: 22 de agosto de 2024.
- García E (2004) Modificaciones al Sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía-Universidad Nacional Autónoma de México. México. 90p.
- García-Cruz L, Valle-Guadarrama S, Salinas-Moreno Y, Joaquín-Cruz E (2013) Physical, chemical, and antioxidant activity characterization of pitaya (*Stenocereus pruinosus*) fruits. *Plant Foods for Human Nutrition* 68: 403-410. <https://doi.org/10.1007/s11130-013-0391-8>
- Gaytán-Andrade JJ, Cobos-Puc LE, Iliná A, Moreno-Dávila IMM, Aguilar CN, Silva-Belmares SY (2020) Characterization, digestibility and prebiotic effect of the fruit extract of *Stenocereus queretaroensis* F. A. C. Weber Buxbaum. *Revista Fitotecnia Mexicana* 43(3): 325-333.
- He Y, Wang B, Wen L, Wang F, Yu H, Chen D, Su X, Zhang C (2022) Effects of dietary fiber on human health. *Food Science and Human Wellness* 11(1): 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.fshw.2021.07.001>
- Hinojosa-Gómez J, Muy-Rangel MD (2023) Caracterización fisicoquímica y compuestos bioactivos en los frutos de pitaya (*Stenocereus thurberi*) de cuatro colores. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 26: 1-9. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2023.561>
- Hu D, Zhang S, Baskin JM, Baskin CC, Wang Z, Liu R, Du J, Yang X, Huang Z (2019) Seed mucilage interacts with soil microbial community and physiochemical processes to affect seedling emergence on desert sand dunes. *Plant, Cell & Environment* 42(2): 591-605. <https://doi.org/10.1111/pce.13442>
- INEGI (2024) Información por entidad. <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/slp/default.aspx?tema=me&e=24> Fecha de consulta: 22 de agosto de 2024.
- Jiménez-Aguilar DM, López-Martínez JM, Hernández-Brenes C, Gutiérrez-Urbe JA, Welte-Chanes J (2015) Dietary fiber, phytochemical composition and antioxidant activity of Mexican commercial varieties of cactus pear. *Journal of Food Composition and Analysis* 41: 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.01.017>

- López-Palacios C, Peña-Valdivia CB, Reyes-Agüero JA, Rodríguez-Hernández AI (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>
- Luna-Morales CC, Aguirre JR (2001) Clasificación tradicional, aprovechamiento y distribución ecológica de la pitaya mixteca en México. *Interciencia* 26(1): 18-24.
- Mansilla N, Racca S, Gras DE, González DH, Welchen E (2018) The complexity of mitochondrial complex IV: an update of cytochrome c oxidase biogenesis in plants. *International Journal of Molecular Sciences* 19(3): 662-696. <https://doi.org/10.3390/ijms19030662>
- Mascot-Gómez E, Flores J, López-Lozano NE, Yáñez-Espinosa L (2020) Seed germination of Southern Chihuahuan desert cacti: effect of mucilage, light and phytohormones. *Flora* 263: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2019.151528>
- Noriega-Juárez AD, Nolasco-González Y, Vázquez-Mora J, García-Magaña ML, Montalvo-González E (2024) Physicochemical characterization, bioactive compounds, and antioxidant capacity from *Stenocereus queretaroensis*: mexican endemic fruits with high potential functionality. *Horticulturae* 10(5): 451-463. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10050451>
- Peña-Valdivia CB, Trejo C, Arroyo-Peña VB, Sánchez-Urdaneta AB, Balois-Morales R (2012) Diversity and unavailable polysaccharides and dietary fiber in domesticated nopalito and cactus pear fruit (*Opuntia* spp.). *Chemistry & Biodiversity* 9(8): 1599-1610. <https://doi.org/10.1002/cbdv.201200047>
- Ramírez-Rodríguez Y, Martínez-Huélamo M, Pedraza-Chaverri J, Ramírez V, Martínez-Tagüena N, Trujillo J (2020) Ethnobotanical, nutritional and medicinal properties of Mexican drylands Cactaceae fruits: recent findings and research opportunities. *Food Chemistry* 312: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126073>
- Reyes-Agüero JA, López-Palacios C, Romero-Hernández ME, Ramírez Tobías HM, Michel-Cuello Ch (2019) Polisacáridos estructurales y fibra dietética en brotes florales (Tunitas) de *Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dick de diferente estadio de desarrollo. *Agrociencia* 53(4): 605-616.
- Yamamoto N, Sugimoto T, Takano T, Sasou A, Morita S, Yano K, Masumura T (2020) The plant-type phosphoenolpyruvate carboxylase Gmppc2 is developmentally induced in immature soy seeds at the late maturation stage: a potential protein biomarker for seed chemical composition. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry* 84(3): 552-562. <https://doi.org/10.1080/09168451.2019.1696179>
- Zhang Z, Shi X, Li R, Qiang S (2022) A new technique for stain-marking of seeds with safranin to track seed dispersal and seed bank dynamics. *Frontiers in Plant Science* 13: 1-15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.959046>