

Artículo Científico

Variaciones morfológicas en el fruto y semillas de cuatro estadios del fruto de *Cylindropuntia spinosior* (Cactaceae)

Fruits and seeds morphological variations of four fruit stages of *Cylindropuntia spinosior* (Cactaceae)

Raquel González-Fernández¹, Miroslava Quiñones Martínez¹, José Valero-Galván^{1*}

¹Departamento 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.v17i3.1184>

Recibido: 28 de marzo de 2023; Aceptado: 05 de septiembre de 2023

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

Resumen

En la actualidad, las características externas de la semilla (masa, ancho, longitud y grosor), así como las características internas (área del embrión, endospermo, perispermo y grosor de la cubierta seminal) de muchas especies del género *Cylindropuntia* (Cactaceae) son desconocidas. En este estudio se analizaron las variaciones morfológicas de los frutos y las semillas en cuatro estadios de desarrollo del fruto de *Cylindropuntia spinosior*. Se recolectaron frutos de cuatro estadios de desarrollo y se extrajeron las semillas. Los frutos y semillas se caracterizaron tanto macroscópicamente como microscópicamente, evaluándose 32 variables morfológicas. El análisis de agrupamiento de esas variables mostró que las características morfológicas de los frutos y semillas del estadio II y estadio III presentaron las características morfológicas similares, mientras que el estadio IV fue el más distante. Además, el análisis de los primeros dos componentes principales mostró que las variables que mostraron las mayores variaciones para los cuatro estadios de desarrollo del fruto fueron el peso del fruto y cáscara, el número de semilla, número de semillas flotantes y el peso total de las semillas. Estas características morfológicas determinadas en el presente estudio sugieren que esta especie todavía no está domesticada debido a que estas características fueron similares a las observadas en frutos de varias especies silvestres de la familia Cactaceae. Estos resultados podrían ayudar en futuros estudios ecológicos basados en la caracterización e identificación de las especies del género *Cylindropuntia* cuando sólo se dispone de los frutos y semillas.

Palabras clave: *Cylindropuntia*, variabilidad, morfometría, frutos, semillas.

Abstract

At present, the external seed characteristics (mass, width, length, and thickness) as well as the internal characteristics (embryo area, endosperm, perisperm, and thickness of the seed coat) of many species of the genus *Cylindropuntia* (Cactaceae) are unknown. In this study, morphological variations of fruits and seeds at four stages of fruit development of *Cylindropuntia spinosior* were analyzed. Fruits of four developmental stages were collected and seeds were extracted. Fruits and seeds were characterized both macroscopically and microscopically, and 32 morphological variables were evaluated. The cluster analysis of these variables showed that the morphological characteristics of stage II and stage III fruits and seeds presented the similar morphological characteristics, while stage IV was the most distant. In addition, the analysis of the first two principal components showed that the variables that showed the greatest variations for the four stages of fruit development were fruit and shell weight, seed number, number of floating seeds and total seed weight. These morphological characteristics determined in the present study suggest that this species is not yet domesticated because these characteristics were similar to those observed in fruits of several wild species of the family Cactaceae. These results could help in future ecological studies based on the characterization and identification of species of the genus *Cylindropuntia* when only fruits and seeds are available.

Keywords: *Cylindropuntia*, variability, morphometry, fruits, seeds.

1. Introducción

Junto con las familias de Agavaceae, Crassulaceae y Euphorbiaceae, la familia de las cactáceas se identifica como plantas suculentas xerofíticas (Anderson, 2001). Algunos autores consideran que la familia Cactaceae puede estar compuesta por alrededor de 1500 a 1600 especies distribuidas entre 110 a 124 géneros (Lebgue *et al.*, 2011; Pinto y Scio, 2014). En México se han identificado alrededor de 669 especies, correspondientes a 63 géneros (Lebgue *et al.*, 2011), de las cuales los más abundantes son *Mammillaria*, *Ferocactus*, *Echinocereus*, *Coryphantha*, *Opuntia* y *Cylindropuntia* (Hunt, 2016). El género *Cylindropuntia* pertenece a la familia Cactaceae y es nativo de América del Norte. En México se han registrado aproximadamente 30 especies en las regiones áridas y semiáridas del desierto Chihuahuense (Guzmán *et al.*, 2003; Hunt, 2016). Las especies más abundantes son *C. leptocaulis*, *C. imbricata*, *C. kleiniae* y *C. spinosior* (Guzmán *et al.*, 2003).

Cylindropuntia spinosior se caracteriza por ser de tipo arbustivo que varía entre 0.4 a 2 m de altura. Estas plantas están formadas por tallos (segmentos) dispuestos en verticilos con tamaño que varía entre 5 a 23 cm de largo y entre 1.3 a 3.5 cm de diámetro (Anderson, 2001). Los tallos pueden variar de color verde a ligeramente violáceo. Suelen presentar areolas en forma elíptica de color entre amarillo a bronce, con gloquidios de 1 a 2 mm de largo de color amarillo a marrón que tienen de 4 a 24 espinas (Anderson, 2001). Las flores pueden presentar variación en colores que van desde rosa a rojo púrpura, desde amarillo a bronce, o blanco, mientras que los frutos entre verde (frutos inmaduros) y amarillo (frutos maduros). Estos son de forma cilíndrica, carnosos, algunos presentan hoyuelos que van desde los 2 a los 5 cm de largo y tienen diámetro de 1.7 a 3 cm (Anderson, 2001). Los usos de las plantas de este género son diversos, desde cercas vivas para lindes de terrenos, hasta aprovecharse como forraje en temporadas de sequía. Además, los tallos secos se emplean en la fabricación de artesanías y la goma que produce la planta se ha utilizado como goma de mascar (Anderson, 2001). Por otra parte, los frutos ácidos y poco carnosos de varias especies del género

Cylindropuntia podrían ser una fuente alimenticia de interés debido a que contiene concentraciones altas de taninos condensados, taninos hidrolizables y ácidos fenólicos, por lo que podría ser una fuente de antioxidantes naturales con propiedades funcionales en la industria alimenticia (Coutiño-Laguna et al., 2022; Reyes-Corral et al., 2022). Además, en otro estudio se ha analizado la posible capacidad fungicida de los extractos acuosos y etanólicos de los cilindros tallos de *C. leptocaulis* y *C. imbricata* sobre en el crecimiento micelial de cepas de *Aspergillus sp.* y *Fusarium sp.*, no obstante, estos extractos de ambas especies parecieron estimular el crecimiento de estos hongos, más que inhibirlos (Cid et al., 2021).

Dentro de la subfamilia Opuntioideae existen varios estudios acerca de las variaciones de las características morfológicas de los frutos y semillas, principalmente de especies comerciales o silvestres del género *Opuntia* (Reyes-Agüero et al., 2005; Guerrero-Muñoz et al., 2006; López-Palacios et al., 2015; Núñez-Gastélum et al., 2018; González-Cortés et al., 2019; Valero-Galván et al., 2021). Estos estudios han permitido aumentar el conocimiento en: a) la riqueza de los bancos de germoplasma; b) la conservación *in situ* y *ex situ* y c) estudios de ecología y taxonómicos (Guerrero-Muñoz et al., 2006; López-Palacios et al., 2015; González-Cortés et al., 2018; Núñez-Gastélum et al., 2018; González-Cortés et al., 2019). Sin embargo, son escasos los estudios que muestren evidencias sobre las variaciones morfológicas en los frutos (peso, tamaño, forma, volumen número de semillas y semillas vanas) y semilla (características morfológicas externas e internas) dentro de un taxón, en especial para especies endémicas como *Cylindropuntia spinosior*. Para estudiar las características internas de las semillas del género *Opuntia* se ha retirado la testa y cobertura funicular usando medios mecánicos y el lijado (Flores y Engleman, 1978; Guerrero-Muñoz et al., 2006), permitiendo realizar la caracterización interna de la cubierta seminal, embrión, endospermo y perispermo de las semillas (Guerrero-Muñoz et al., 2006; González-Cortés et al., 2019). Aunque, se conocen las características generales del fruto y semillas de *C. spinosior* que se desarrollan en el desierto de Chihuahua, existen escasas referencias relacionadas a las variaciones morfológicas de fruto y las características morfológicas externas e internas de las semillas en diferentes estados de desarrollo del fruto de *C. spinosior* (Reyes-Corral et al., 2022). Por lo que en el presente estudio se realizó un análisis de la variación morfológica de los frutos y semillas en cuatro estadios de desarrollo del fruto de *C. spinosior* como un paso previo a conocer las estrategias reproductivas por medio de la semilla de esta especie.

2. Materiales y métodos

Material biológico y sitio de colección

Los frutos de *C. spinosior* se colectaron en el Parque Jardines del Valle ubicado en las coordenadas 31.300, -106.504 en el municipio de Ciudad Juárez, al extremo norte del Estado de Chihuahua, México. La zona se localiza a 1338 m de altitud, con precipitación pluvial anual de 208 mm y temperatura promedio de 18.3 °C. El clima se clasifica como muy seco, según la clasificación de Köppen se identifica con el tipo Bw_{kx}'(e'). La vegetación de esta región se conforma de matorrales del tipo micrófilo semiespinosos.

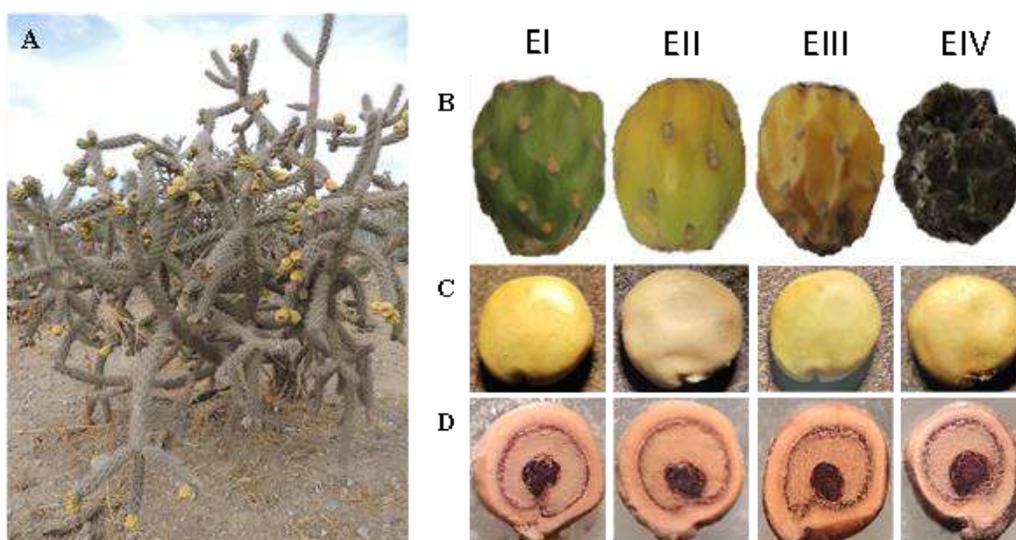


Figura 1. Ejemplar de planta de *C. spinosior* (A). Vista de los frutos (B), parte externa (C) y parte interna (D) de las semillas. EI: Estadio I, EII: Estadio II, EIII: Estadio III, EIV: Estadio EIV.

Figure 1. Plant specimen of *C. spinosior* (A). View of the fruits (B), external part (C) and internal part (D) of the seeds. EI: Stage I, IBD: Stage II, EIII: Stage III, EIV: Stage IV.

La colecta de los frutos se realizó usando la metodología usada por Núñez-Gastelum *et al.*, 2018. Brevemente, en el sitio de colecta se seleccionaron de forma aleatoria 5 plantas de *C. spinosior* (Fig. 1A), las cuales se monitorearon cada 15 días de abril hasta el 30 de agosto de 2018. Después de observar 15 días la floración, se documentó el desarrollo del fruto hasta su maduración. Para realizar el estudio se seleccionaron tres estadios de maduración basados en la coloración del fruto: EI, verde como estadio de desarrollo (fruto inmaduro 100 % de crecimiento), EII, amarillo (fruto maduro) y EIII, amarillo ocre (fruto pasado de madurez). Así mismo, se recolectaron frutos con un color oscuro (frutos secos) los cuales se encontraron en el suelo alrededor de la base de las plantas (EIV) (fruto seco) (Fig. 1B). Se recolectaron en total 50 frutos por estadio (10 frutos por 5 plantas independientes) sin daños causados por insectos y animales. Una vez recolectados, los frutos se colocaron en bolsas de plástico con cierre hermético y se transportaron al Laboratorio de Reproducción del Departamento de Químico Biológicas, Instituto de Ciencias Biomédicas, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

Análisis morfológico de los frutos y extracción de las semillas

En el laboratorio, los frutos se lavaron con agua corriente y se secaron con papel secante. Para realizar el análisis morfológico de los frutos, se tomaron de forma aleatoria 10 frutos por estadio (N=10 por cada estadio) y de forma independiente se pesaron en usando balanza analítica (Velab™, VE-204™, Estados Unidos, con precisión de ± 0.0001 g). Seguidamente, los 10 frutos de forma independiente se colocaron de forma horizontal en una hoja milimétrica y se tomó una fotografía digital con cámara digital (Nikon Coolpix P510, Japón) por cada estadio de forma independiente, la cual se utilizó para determinar el área y perímetro horizontal reflejada en la imagen, largo y ancho del fruto, por medio del programa de procesamiento de imagen digital ImageJ (National Institutes

of Health, Estados Unidos; <https://imagej.nih.gov/ij/index.html>). A continuación, los frutos se cortaron longitudinalmente, se separó la cáscara de la pulpa y se pesó la cáscara individualmente para cada uno de los frutos y estadios usando balanza analítica (Velab™, VE-204™, Estados Unidos, con precisión de ± 0.0001 g). Posteriormente, se recuperaron las semillas de la pulpa de los frutos. Para ello, se colocaron en un cedazo y se lavaron con agua destilada hasta eliminar restos vegetales y de pulpa (Fig. 1C). Después, se desinfectaron con hipoclorito de sodio al 5 % (v/v) por 5 min; enseguida se realizaron dos lavados con agua destilada y finalmente se dejaron secar por una hora a temperatura ambiente (27 °C).

Análisis morfológico de las semillas

El peso total de las semillas por cada fruto y estadio se determinó usando la balanza analítica (Velab™, VE-204™, Estados Unidos, con precisión de ± 0.0001 g). También, se contó el número total de semillas normales y el número de semillas vanas por cada fruto y estadio. Para determinar el volumen, se seleccionaron 20 semillas al azar por cada fruto y estadio y se determinó el peso utilizando la balanza analítica (Velab™, VE-204™, Estados Unidos, con precisión de ± 0.0001 g) y su volumen, mediante el método de la probeta con agua, el cual consistió en colocar 100 mL de agua destilada en una probeta, se depositaron las 20 semillas en la probeta con agua y se midió el volumen desplazado; después, el volumen se calculó como la diferencia entre el volumen inicial y el desplazado al introducir las 20 semillas; finalmente, se determinó la densidad de las 20 semillas, dividiendo la masa medida de 20 semillas entre su volumen (Garnero, 2012). Una vez concluidas dichas determinaciones, las semillas se secaron y se conservaron en microtubos (Eppendorf™) a temperatura ambiente (27 °C).

Para establecer las características cualitativas externas de las semillas, se seleccionaron de forma aleatoria 100 semillas de cada estadio (N=100 semillas por estadio) y se observaron individualmente con estereoscopio (VanGuard, 1275ZP, China), evaluándose la forma, entrelamado liso, tipo de borde y color de la semilla. El análisis morfológico de la semilla se evaluó seleccionando aleatoriamente 100 semillas de cada estadio (N=100 semillas por estadio) y se determinó el peso de forma individual utilizando la balanza analítica (Velab™, VE-204™, Estados Unidos, con precisión de ± 0.0001 g). Posteriormente, las 100 semillas por cada estadio se colocaron de forma ventral en una hoja milimétrica y se fotografiaron con cámara digital (Nikon Coolpix P510, Japón). Las fotografías se utilizaron para determinar el área, perímetro, largo y ancho de cada semilla por medio del software de procesamiento de imagen digital ImageJ (National Institute of Health, Estados Unidos; <https://imagej.net/ij/index.html>) usando la metodología propuesta por Núñez-Gastélum *et al.* 2018.

Las características morfológicas internas de las semillas se determinaron usando la metodología propuesta por Guerrero-Muñoz *et al.*, 2006. Se seleccionaron 10 semillas de forma aleatoria de cada uno de los estadios (N=10 por estadio) y cuando se obtuvieron los planos medianos mediante frotación de la semilla con lija número 400 (Fig. 1D), se fotografiaron con cámara digital (Nikon Coolpix P510, Japón) y las fotografías se utilizaron para medir el grosor de la testa zona dorsal y ventral, área de la semilla, área del embrión por medio del programa de procesamiento de imagen digital ImageJ (National Institute of Health, Estados Unidos; <https://imagej.nih.gov/ij/index.html>) usando la metodología propuesta por Guerrero-Muñoz *et al.*, 2006. El porcentaje de área de embrión respecto a la semilla se determinó al dividir el área del embrión y el área de la semilla y se multiplicó

por 100. El porcentaje del área de perispermo respecto a la semilla se determinó al dividir el área del perispermo y el área de la semilla y se multiplicó por 100. La relación del grosor de la cubierta funicular zona ventral/zona dorsal se determinó al realizar la división de ambos datos. La relación área semilla/área de embrión se determinó al realizar la división de ambos datos. La relación área semilla/área de perispermo se determinó al realizar la división de ambos datos y la relación área embrión/área perispermo se determinó al realizar la división de ambos datos.

Análisis estadístico

Previo al análisis estadístico los datos se analizaron a través de la prueba de normalidad de las distribuciones de frecuencia propuesta por Shapiro-Wilk. A continuación, las diferencias entre las características morfológicas de los frutos y semillas de los estadios se analizaron mediante ANOVA unidireccional seguido de comparaciones múltiples de medias Tukey para determinar diferencias significativas entre medias. Se aceptó la significación de la diferencia entre los grupos con nivel de confianza de 95 % o superior. Estos análisis estadísticos se realizaron con el programa IBM® SPSS® Statistics versión 23. El análisis de agrupamientos y de componentes principales se realizó para los datos morfométricos de 32 variables morfológicas determinadas para cada estadio usando la aplicación en línea NIA array analysis (<https://lgsun.grc.nia.nih.gov/ANOVA/>) (Sharov *et al.*, 2005).

3. Resultados y discusión

Análisis morfológico del fruto

En el presente estudio se encontraron variaciones en coloración de los frutos de acuerdo con el estadio, hallándose en la misma planta frutos verdes (fruto inmaduro, Fig. 1B - EI), amarillos (frutos maduros, Fig. 1B - EII), ocres (frutos pasados de madurez, Fig. 1B - EIII) y oscuros (frutos secos en proceso de descomposición de la cáscara, Fig. 1B - EIV). En cuanto a la forma es cilíndrica (Fig. 1B - EII), aunque solamente se pudo apreciar cuando la planta estaba hidratada, lo cual suele ocurrir después de eventos de lluvia en el lugar donde se desarrollan y cuando los frutos están maduros. Según las descripciones generales de la coloración de los frutos de *C. spinosior*, los frutos maduros presentan coloraciones amarillas, a veces teñidos de tonalidades rojizas a violáceas (Baker *et al.*, 2012). Así mismo, las características morfológicas de los frutos de los cuatro estadios de *C. spinosior* mostraron que los valores más altos en el perímetro fueron para los estadios EI y EII, sin embargo, para las características del peso, ancho y área de los frutos y peso de la cáscara para EII, en el peso total de semillas para EIII, mientras que el número total de semillas y de semillas flotantes para el EIV. Por el contrario, se obtuvieron los valores más bajos en el peso total, área, perímetro y ancho del fruto, peso de la cáscara y peso total de semillas para el estadio EIV (Tabla 1).

En el presente estudio también se observó que el perímetro, ancho, largo y peso de 20 semillas presentaron coeficiente de variación (CV) menor de 15 %, mientras que el número total de semillas por fruto, volumen y densidad, y número de semillas flotantes presentaron CV mayor del 26 %. Además, en el estadio EIII se observaron los valores de CV más elevados en el peso total, área, ancho, peso de la cáscara y peso total de las semillas por fruto, mientras que EI presentó los valores más elevados para el número de semillas totales por fruto y flotantes. Igualmente, EII tuvo los valores

más elevados para la densidad de 20 semillas. Sin embargo, en el estadio EI se observaron los CV más bajos para las variables del peso total, área, perímetro y ancho del fruto, peso de la cáscara y peso de las 20 semillas (Tabla 1).

Tabla 1. Características morfológicas de los frutos en *C. spinosior*.

Table 1. Morphological characteristics of *C. spinosior* fruits.

Característica	Estadios del fruto			
	EI	EII	EIII	EIV
Peso (g)	6.89±0.65 (9) ^b	11.17±2.5 (23) ^c	5.83±2.15 (37) ^b	2.51±0.34 (14) ^a
Largo (cm)	3.01±0.33 (11) ^a	2.95±0.31 (11) ^a	3.11±0.34 (11) ^a	2.84±0.37 (13) ^a
Ancho (cm)	2.84±0.19 (7) ^b	3.14±0.20 (7) ^c	2.69±0.42 (18) ^b	2.33±0.21 (09) ^a
Área (cm ²)	77.01±8.15 (11) ^b	81.48±10.38 (13) ^c	62.68±13.89 (22) ^b	50.77±7.85 (16) ^a
Perímetro (cm)	10.43±0.58 (6) ^c	10.30±0.68 (06) ^c	9.20±0.91 (10) ^b	8.32±0.84 (10) ^a
Relación largo/ancho	1.19±0.24 (15) ^{ab}	1.08±0.16 (11) ^a	1.19±0.24 (21) ^c	1.22±0.19 (15) ^c
Peso de la cáscara (g)	6.41±0.63 (10) ^c	9.95±2.41 (24) ^d	4.41±1.78(40) ^b	1.73±0.38 (23) ^a
Peso total semillas (g)	0.47±0.32 (68) ^a	1.21±0.37 (30) ^{cd}	1.41±0.91 (64) ^d	0.77±0.20 (26) ^{ab}
No. semillas totales	18.80±17.91 (95) ^a	48.65±20.49 (41) ^{bc}	35.30±14.40 (42) ^b	58.10±17.77 (31) ^c
Volumen de 20 semillas (cm ³)	0.35±0.10 (29) ^a	0.46±0.13 (30) ^a	0.34±0.11 (18) ^a	0.33±0.11 (35) ^a
Peso de 20 semillas (g)	0.37±0.02 (6) ^b	0.36±0.05 (14) ^b	0.36±0.03 (8) ^b	0.26±0.03 (15) ^a
Densidad de 20 semillas (g/cm ³)	1.18±0.51 (44) ^a	0.88±0.36 (42) ^a	1.14±0.20 (24) ^a	0.87±0.3 2(38) ^a
No. semillas flotantes	1.00±1.15 (115) ^a	2.55±1.38 (58) ^a	3.40±1.69 (50) ^a	6.60±4.29 (65) ^b

Los datos se expresan como promedio± desviación estándar (n = 50 por estadio). Entre paréntesis se indica el valor del coeficiente de variación (CV) en porcentaje. La diferencia en las letras dentro de la misma variable indica el resultado de la prueba de medias de Tukey con una diferencia significativa de $p < 0.05$.

Varios estudios arqueobotánicos han demostrado que varias especies de plantas de la familia Opuntioideae han mostrado una estrecha relación con los pobladores del desierto chihuahuense y su proceso de domesticación, debido a que continuamente las plantas han sido seleccionadas con las mejores variaciones en las características morfológicas de los tallos y frutos de estas especies (Reyes-Agüero *et al.*, 2005). Estos estudios han mostrado que las variantes morfológicas de los frutos más variables en el género *Opuntia* fueron el peso de pulpa, grosor de la cáscara y peso de las semillas abortivas (Reyes-Agüero *et al.*, 2005). Aunque en el presente estudio solo se evaluaron las características en una población puntual, también se observó que las variables que mostraron las mayores variaciones fueron las relacionadas al peso de la cáscara, número semillas totales, volumen

y densidad de las 20 semillas y las semillas flotantes. La alta variación observada en el número de semillas por fruto dentro de la especie podría ser una estrategia de reproducción y establecimiento de esta en sitios favorables para su germinación y crecimiento cuando las condiciones climáticas son propicias para ello. Así mismo, estas altas variaciones en las características morfológicas determinadas en el presente estudio sugieren que esta especie es silvestre debido a que estas características fueron similares a las observadas en frutos de varias especies silvestres del género *Opuntia* spp., ya que se ha determinado CV del 16 % para el peso, largo y ancho, pero CV > 41 % para el peso de la cáscara, número de total de semillas por fruto y peso total de las semillas (Reyes-Agüero et al., 2005). Así mismo, los frutos analizados en el presente estudio presentaron valores de las características morfológicas similares a los descritos en otras plantas de otras poblaciones (Anderson, 2001; Reyes-Corral et al., 2022). Sin embargo, los frutos de *C. spinosior* fueron inferiores en tamaño y peso a los determinados para *C. imbricata*, pero mayores a los encontrados para *C. leptocaulis* (Reyes-Corral et al., 2022).

Análisis morfológico externo de la semilla

En el presente estudio también se evaluaron las características cualitativas de las semillas de *C. spinosior*. Los resultados mostraron que las semillas en general presentaron color amarillo pálido, con formas de aplanadas a alabeadas, contorno variable de suborbicular a ovalado y en algunas ocasiones se observaron depresiones grandes y fajas suaves en los cuatro estadios de maduración (Fig. 1C). Así mismo, en el análisis morfológico externo de la semilla se encontró que en el estadio EI y EIII se determinaron los valores más elevados en el peso de las semillas y grosor de la semilla, mientras que en EIV se presentaron los más bajos; mientras que EII y EIII mostraron los valores más elevados en largo, ancho, área y perímetro, sin embargo, EI y EIV exhibieron los valores más bajos en el ancho, área y perímetro; finalmente, mientras que en EIV se presentaron valores bajos en el grosor de la semilla (Tabla 2).

Tabla 2. Características morfológicas externas de las semillas de *C. spinosior*.

Table 2. External morphological characteristics of *C. spinosior* seeds.

Características	Estadios del fruto			
	EI	EII	EIII	EIV
Peso (g)	0.017±0.007 (41) ^{bc}	0.016±0.003 (21) ^b	0.018±0.003 (18) ^c	0.014±0.003 (22) ^a
Largo (mm)	3.80±0.30 (7) ^a	4.18±0.32 (7) ^c	4.20±0.30 (8) ^c	4.04±0.29 (7) ^b
Ancho (mm)	3.83±0.20 (6) ^a	3.87±0.26 (7) ^b	3.90±0.38 (8) ^b	3.74±0.31 (9) ^a
Relación largo/ancho	1.09±0.10 (9) ^a	1.09±0.09 (8) ^a	1.08±0.10 (9) ^a	1.09±0.10 (11) ^a
Área (mm ²)	11.40±1.20 (10) ^a	12.99±1.31 (10) ^b	12.96±1.58 (12) ^b	11.64±1.37 (12) ^a
Perímetro (mm)	12.00±0.60 (5) ^a	12.77±0.64 (5) ^b	12.74±0.78 (6) ^b	12.08±0.71 (6) ^a
Grosor (mm)	1.98±0.12 (6) ^{bc}	1.99±0.12 (6) ^b	2.04±0.11 (5) ^c	1.92±0.12 (6) ^a

Los datos se expresan como promedio ± desviación estándar (n = 100). Entre paréntesis se indica el valor del CV en porcentaje. La diferencia en las letras dentro de la misma variable indica el resultado de la prueba de medias de Tukey con una diferencia significativa de $p < 0.05$.

En el presente estudio también se observó que las variables morfológicas analizadas para las semillas fueron de menor variabilidad que aquellas evaluadas para los frutos. El largo, área, perímetro y grosor de las semillas de los cuatro estadios presentaron $CV < 12 \%$, mientras que el peso presentó las mayores variaciones con $CV > 18 \%$. Cuando se compararon los CV por estadio, estos fueron homogéneos en todas las características analizadas excepto en el peso de las semillas del estadio EI (Tabla 2).

Los pesos y tamaños de las semillas de algunas especies del género *Cylindropuntia* se han estudiado previamente de una manera general (Anderson, 2001; Reyes-Corral et al., 2022). Según Reyes-Corral et al. (2022), las semillas de *C. spinosior* pesan 0.018 g, miden 4.20 mm de longitud, 3.8 mm de diámetro, 13.4 mm² de área y 12.9 mm de perímetro, siendo semejantes a los determinados en los diferentes estadios evaluados en el presente estudio, aunque estos autores no consideraron el grosor de las semillas. Además, estos autores encontraron que las características morfológicas de las semillas de *C. spinosior* fueron más semejantes a las semillas de *C. imbricata* (Reyes-Corral et al., 2022).

No obstante, si comparamos las características morfológicas de las semillas de *C. spinosior* con respecto a otras especies del orden Opuntioideae, los resultados para el peso, largo y ancho de las semillas fueron inferiores a los encontrados para *O. polyacantha* y *O. phaeacantha*, similares a los de *O. macrocentra* y superiores a los de *O. engelmannii* (Núñez-Gastélum et al., 2018). Igualmente, el largo y ancho de las semillas definidas en el presente estudio fueron inferiores a las observadas para *O. ficus-indica*, *O. rastrera* y *O. megacantha*; sin embargo, fueron superiores a las determinadas para *O. stenopetala*, *O. durangensis*, *O. engelmannii* y *O. microdasys* (González-Cortés et al., 2019). En cuanto al área de las semillas fue similar a *O. phaeacantha*, *O. macrocentra* y *Opuntia* spp. (Guerrero-Muñoz et al., 2006; Núñez-Gastélum et al. 2018). Estos resultados fueron similares a los valores bajos en el CV, determinados para las variables de la longitud y ancho de semillas de *Opuntia* spp., *O. polyacantha*, *O. engelmannii*, *O. phaeacantha* y *O. macrocentra* (Reyes-Agüero et al., 2005; Núñez-Gastélum et al., 2018). Con respecto al área de la semilla, los resultados determinados en el presente estudio fueron similares a los valores observados para las áreas de las semillas de *O. polyacantha*, *O. phaeacantha* y *O. macrocentra*, sin embargo, el valor determinado para *O. engelmannii* fue superior a los encontrados en el presente estudio (Núñez-Gastélum et al., 2018). Del mismo modo, las variaciones en los CVs encontrado para el área de la semilla de 24 genotipos de *Opuntia* spp. fueron semejantes a los encontrados en el presente estudio (Guerrero-Muñoz et al., 2006).

Por lo tanto, los resultados obtenidos del peso y el tamaño de las semillas de *C. spinosior* justifican la categorización de las semillas de esta especie como pesadas y de tamaño grande siendo similares a varias especies del género *Opuntia* (Reyes-Corral et al., 2022). Algunos estudios han hipotetizado que las especies que presentan semillas grandes y de mayor masa, volumen, y densidad tendrían una menor capacidad de dispersión, sin embargo, las semillas grandes y pesadas tienen la ventaja de formar bancos terrestres que tendrán mayores posibilidades de germinar en condiciones óptimas (Venable y Brown, 1988; Zammit y Zedler, 1990). Además, las semillas grandes podrían aportar otras ventajas ecológicas en el proceso de germinación como la aportación de mayores nutrientes, aunque tendrían una tasa de germinación lenta, pero con un mejor establecimiento de las plántulas (Baloch et al., 2001). En el presente estudio se ha observado que las mejores características morfológicas de los frutos y semillas fueron las encontradas en el estadio III, por lo tanto, en un futuro, los frutos en este estadio de maduración podrían ser la fuente para la recolecta de las semillas para generar los programas de conservación *ex situ* para *C. spinosior*.

Análisis morfométrico interno de la semilla

El análisis estadístico de las características internas de la semilla mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en el grosor de la cubierta funicular de la zona dorsal y ventral, área y perímetro del embrión, y del perispermo. El estadio EI presentó los valores más elevados en el grosor de la testa dorsal y ventral, mientras que EII mostró los más bajos. Por otro lado, las semillas de EIV exhibieron los valores más elevados en el área y perímetro del embrión y del perispermo, mientras que EIII tuvieron los más bajos (Tabla 3).

Tabla 3. Características morfológicas de las estructuras internas de las semillas de *C. spinosior*.
Table 3. Morphometry characteristics of internal structures of *C. spinosior* seeds.

Características	Estadios del fruto			
	EI	EII	EIII	EIV
Grosor de la testa zona dorsal (mm)	0.54±0.05 (9) ^b	0.44±0.09(20) ^a	0.48±0.05(10) ^a	0.48±0.05(10) ^a
Grosor de la testa zona ventral (mm)	1.03±0.27 (26) ^b	0.66±0.11 (17) ^a	0.72±0.11(4) ^a	0.78±0.11(3) ^a
Área del embrión (mm ²)	3.11±0.65 (21) ^a	3.42±0.31 (9) ^{ab}	3.06±0.59(19) ^a	3.77±0.58(15) ^c
Perímetro del embrión (mm)	9.07±1.28 (14) ^a	10.34±0.59 (6) ^b	8.54±1.35(16) ^a	10.41±1.32(13) ^b
Área del perispermo (mm ²)	0.70±0.17 (24) ^a	0.81±0.12 (15) ^a	0.73±0.18(25) ^a	0.97±0.2(21) ^b
Perímetro del perispermo (mm)	3.22±0.41 (13) ^{ab}	3.42±0.20 (6) ^b	2.93±0.71(24) ^a	3.61±0.32(9) ^b
Porcentaje de área de embrión respecto a la semilla (%)	34.89±4.81 (14) ^a	37.43±3.56 (10) ^a	35.01±7.91(23) ^a	39.11±5.44(14) ^a
Porcentaje de área de perispermo respecto a la semilla (%)	8.06±2.28 (28) ^a	8.86±1.35 (15) ^a	8.38±2.31(28) ^a	10.05±1.88(19) ^a
Relación grosor de la cubierta funicular zona ventral/zona dorsal	1.95±0.65(33) ^a	1.52±0.21(14) ^a	1.53±0.31(20) ^a	1.63±0.24(15) ^a
Relación área semilla/área de embrión	2.91±0.39(13) ^a	2.7±0.26(10) ^a	3.02±0.82(27) ^a	2.62±0.49(19) ^a
Relación área semilla/área de perispermo	13.55±4.44(33) ^a	11.54±1.79(16) ^a	12.6±2.79(22) ^a	10.23±1.64(16) ^a
Relación área embrión/área perispermo	4.76±1.81(38) ^a	4.3±0.71(17) ^a	4.45±1.42(32) ^a	4.04±1.02(25) ^a

Los datos se expresan como promedio±desviación estándar (n = 10). Entre paréntesis se indica el valor del CV en porcentaje. La diferencia en las letras dentro de la misma variable indica el resultado de la prueba de medias de Tukey con una diferencia significativa de $p < 0.05$.

Aunque no existe información relacionada a las características morfológicas internas de la semilla de *C. spinosior*, se ha documentado que en especies cercanas como las del género *Opuntia*, la testa presenta un tamaño pequeño y tiene una forma ovalada, mientras que el embrión tiene forma de espiral alrededor de un perispermo plegado fuertemente (Stuppy, 2002). Así mismo, varios autores han encontrado que los rasgos internos de las semillas presentan una estrecha relación con la imbibición del agua en el proceso germinativo y el tipo de dormancia en las semillas (Baskin & Baskin, 2014; González-Cortés et al. 2018). Estas características son factores para tomar en cuenta en la conservación *ex situ* de estas especies. Los resultados encontrados en el presente estudio para grosor de la testa, cubierta funicular ventral y área de las semillas fueron inferiores a los determinados en *O. ficus-indica*, *O. rastrera* y *O. megacantha* (González-Cortés et al., 2019). Igualmente, el grosor de la testa ventral de 24 genotipos de *Opuntia* spp. fue mayor a los obtenidos en el presente estudio, pero con variaciones en el CV, semejantes a los observados para los estadios EI y EII, pero menores a los encontrados para EIII y EVI (Guerrero-Muñoz et al., 2006). Estos autores también encontraron porcentajes de área de embrión respecto a la semilla del 36.2 % al 53.6 %, siendo mayores a los obtenidos para EI y EIII; finalmente, las variaciones en CV del porcentaje de área del embrión respecto a la semilla fueron en general inferior a los encontrados en el presente estudio (Guerrero-Muñoz et al., 2006).

Análisis de agrupamiento y de componentes principales

En el presente estudio el análisis de agrupamiento mostró que los estadios de maduración EII y EIII fueron los más semejantes en cuanto a características morfológicas del fruto y semillas, agrupándose junto a ellos el estadio EI, pero a una distancia considerable, y, por último, el estadio EIV fue el más distante en el análisis (Fig. 2A).

Además, el análisis de los componentes principales (CP) determinó que 95 % de la variabilidad total se explicó por los dos primeros CP (Fig. 2B). El CP1 explicó 71.8 % de toda la variación, donde el peso de la cáscara (Fig. 3A) y peso total del fruto (Fig. 3B) se correlacionaron negativamente con este componente, mientras que el número de semillas flotantes (Fig. 3C) y número total de semillas por fruto (Fig. 3D) se correlacionaron positivamente. El CP2 explicó 23.1 % de la variación total, correlacionándose negativamente con este componente, el peso total de las semillas por fruto (Fig. 3E).

El análisis de agrupamiento y componentes principales ha sido utilizado en los estudios de la subfamilia Opuntioideae principalmente para la caracterización morfológica de cladodios, frutos y semillas (Reyes-Agüero et al., 2005; González-Muñoz et al., 2006). El análisis multivariado de las características morfológicas de las semillas y frutos de diferentes especies del género *Opuntia* ha permitido establecer niveles de domesticación, debido a que se ha observado que, a mayor grado de domesticación de las especies de este género, los frutos contienen mayor número de semillas abortadas y menor tamaño (López-Palacios et al., 2019). Así mismo, el tamaño, longitud y grosor de la testa de las semillas se han establecido como criterios de selección para la explicación de la diversidad en el género *Opuntia* (López-Borja et al., 2017; González-Cortés, 2019).

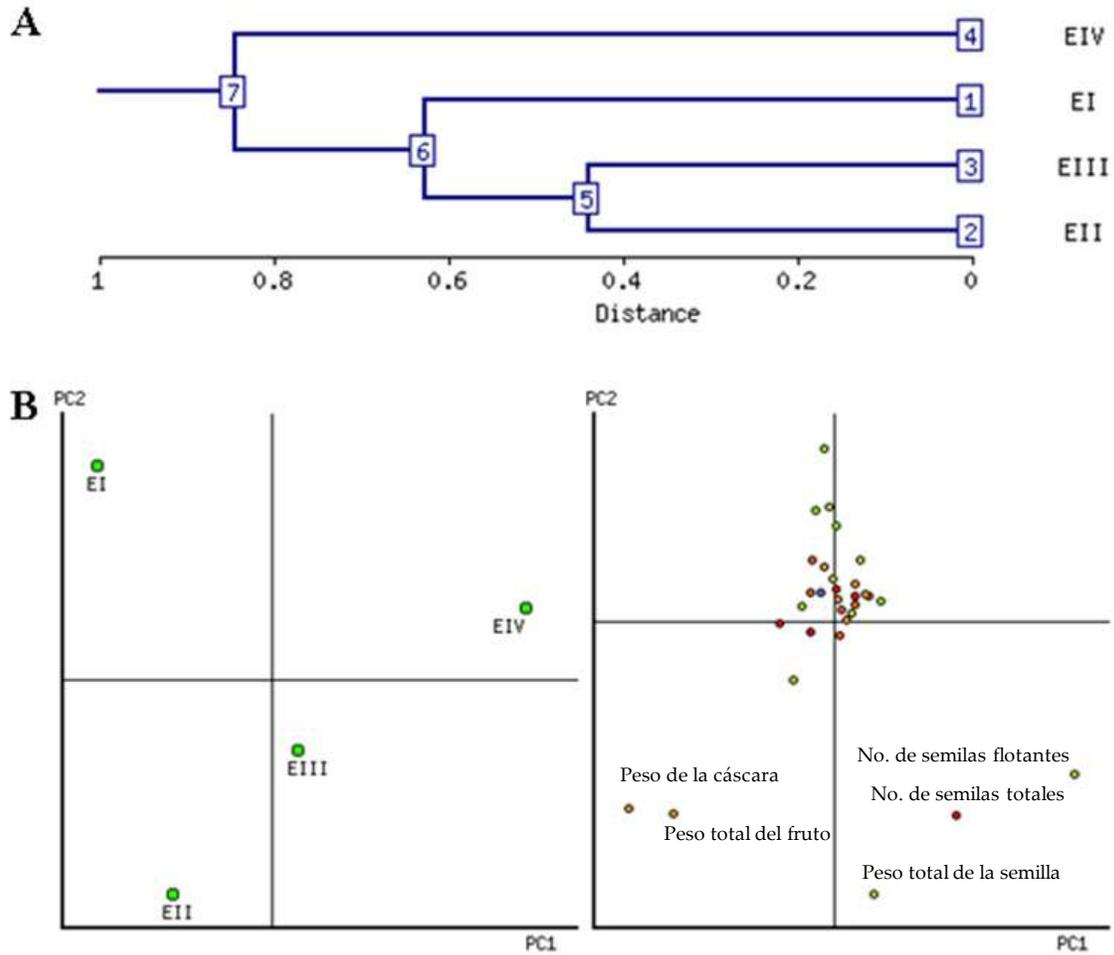


Fig. 2. Análisis de agrupamiento (A) y de componentes principales (B) de las variables morfológicas de los frutos y semillas en *C. spinosior*.

Fig. 2. Analysis of grouping (A) and principal components (B) of the morphological variables of fruits and seeds in *C. spinosior*.

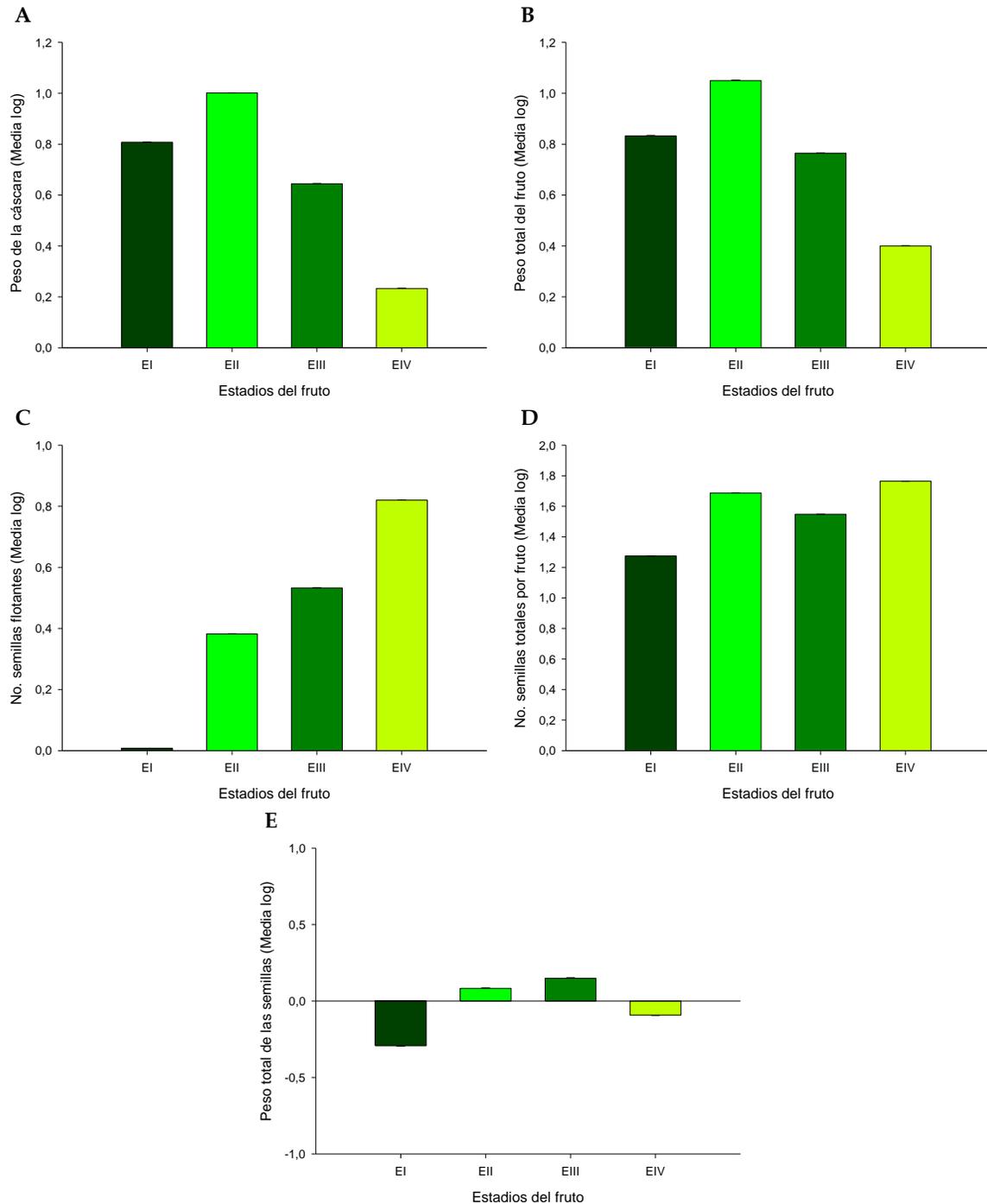


Fig. 3. Características de las semillas que contribuyeron fuertemente a la variabilidad total en el análisis de componentes principales. Peso de la cáscara de la semilla (A), peso del fruto (B), número de semillas flotantes (C), número de semillas totales por fruto (D) y peso total de las semillas (E).

Fig. 3. Seed characteristics that strongly contributed to total variability in principal component analysis. Seeds weight (A), fruit weight (B), number of floating seeds (C), number of total seeds per fruit (D) and total seed weight (E).

4. Conclusiones

Se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) en las características morfométricas entre los frutos de los cuatro estadios siendo las variables del peso, ancho, relación largo y ancho, área, perímetro, peso de la cáscara, peso total de las semillas, el número total de semillas, peso de 20 semillas, y no. semillas flotantes las de mayor variación. Así mismo, se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) en las características morfométricas de externas de las semillas de los cuatro estadios, siendo las variables que presentaron las mayores diferencias el peso, largo, ancho, área, perímetro y grosor. Del mismo modo, se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) en las características morfométricas internas de la semilla de los cuatro estadios siendo las variables que presentaron las mayores diferencias el grosor de la testa de la zona dorsal y ventral, área y perímetro del embrión, y del perispermo. Sin embargo, en el porcentaje de área de embrión respecto a la semilla, el porcentaje del área de perispermo respecto a la semilla, la relación del grosor de la cubierta funicular zona ventral/zona dorsal, la relación área semilla/área de embrión, la relación área semilla/área de perispermo y la relación área embrión/área perispermo no se observaron diferencias estadísticas significativas para los cuatro estadios del fruto. El análisis de agrupamiento y componentes principales de las 32 variables analizadas mostró que el estadio II y estadio III presentaron las características morfológicas similares, mientras que el estadio IV fue el que presentó las características más variables. Este análisis permitió concluir que las variables que mostraron las mayores variaciones para los cuatro estadios de desarrollo del fruto fueron el peso del fruto y cáscara, el número de semilla totales, número de semillas flotantes y el peso total de las semillas. Estas características morfológicas determinadas en el presente estudio sugieren que esta especie todavía no está domesticada. Estos resultados podrían ayudar en futuros estudios ecológicos basados en la caracterización e identificación de esta especie cuando sólo se dispone de los frutos y semillas. Además, sienta las bases para estudios posteriores sobre la reproducción por semilla de *C. spinosior*.

Agradecimientos

El presente estudio fue realizando con el apoyo de la infraestructura del Laboratorio de Reproducción T-122 del Departamento de Ciencias Químico Biológicas del Instituto de Ciencias Biomédicas de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Conflicto de interés

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

5. Referencias

Anderson, E.F. (2001). *The cactus family*. Timber Press. ISBN, 0881924989

- Baker, M., Parfitt, B.D. & Rebman, J. (2012). *Cylindropuntia*. In B.G. Baldwin, D. Goldman, D.J., Keil, R., Patterson, T.J., Rosatti, & Dieter W.D. (Eds.), *The Jepson Manual. Vascular Plants of California* (2nd ed.). University of California Press. California. ISBN: 9780520253124
- Baloch, H. A., Ditomasso, A. & Watson, A. K. (2001). Intrapopulation variation in *Abutilon theophrasti* seed mass and its relationship to seed germinability. *Seed Science Research* 11(4): 335-343. <https://bit.ly/3RB2JRX>
- Baskin, J.M. & BASKIN, C. C. 2004. A classification system for seed dormancy. *Seed Science Research*, 14(1): 1-16. <https://doi.org/10.1079/SSR2003150>
- Cid, A., González-Fernández, R. & Valero-Galván, J. (2021). Growth promoting effect on the mycelia of *Fusarium* sp. and *Aspergillus* sp. *in vitro* condition of aqueous and ethanolic extracts from two species of *Cylindropuntia*. *Tecnociencia Chihuahua* 14: 126-141. <https://doi.org/10.54167/tch.v14i3.641>
- Coutiño-Laguna, B. del C.C., Flores-Gallegos, A.C., Ascacio-Valdés, J. A., Iliná, A., Galindo, A.S., Castañeda Facio, A.O., Esparza González, S.C. & Herrera, R. R. (2022). Physicochemical and functional properties of the undervalued fruits of cactus *Cylindropuntia imbricate* ("xoconostle") and antioxidant potential. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 39: 102245. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102245>
- Flores, M.E. & Engleman, E.M. (1978). Apuntes sobre anatomía y morfología de las semillas de cactáceas I: Desarrollo y estructura. *Revista de Biología Tropical* 24(2): 199-227. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/25882>
- Garnero, S. (2012). *Calidad intrínseca de los granos en la postcosecha*. (Tesis de Maestría en Tecnología de Alimentos). Universidad Tecnológica Nacional. http://www.edutecne.utn.edu.ar/tesis/calidad_intrinseca_granos.pdf
- González-Cortés, A., Reyes-Valdés, M. H., Torres, V., Villarreal-Quintanilla, J. A. & Ramírez-Godina, F. (2018). Pre-germination treatments in four prickly pear cactus (*Opuntia* sp.) species from Northeastern Mexico. *Australian Journal of Crop Science* 12(10): 1676-1684. <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.10.pne1430>
- González-Cortés, A., Ramírez-Godina F., Reyes-Valdés M. H., Robledo-Torres V., Pérez-Rodríguez M. Á., Villarreal-Quintanilla J. A. & López-Benítez, A. (2019). Morfología de semillas de siete especies del género *Opuntia* (Cactaceae) del sureste de Coahuila (México). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 54(4): 1-10. <https://doi.org/10.31055/1851.2372.v54.n4.23572>
- Guerrero-Muñoz, P., Barrientos-Priego, A., Axayacatl, J., Gallegos-Vázquez, C., Colín, C., Valadez-Moctezuma, E. & Zavaleta-Mancera, H. (2006). Técnica para el estudio de la micromorfología interna de semillas duras en opuntia. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29(2): 37-49. https://doi.org/10.35196/rfm.2006.Especial_2.37
- Guzmán, U., Arias, S. & Dávila, P. (2003). *Catálogo cactáceas mexicanas*. Universidad Autónoma de México. CONABIO, México. <https://www.worldcat.org/es/title/catalogo-de-cactaceas-mexicanas/oclc/948238461>
- 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>

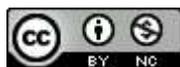
- López-Borja, E. N., Romo-Campos, R. L., Arreola-Nava, H. J., Muñoz-Urias, A. & Loza-Cornejo, S. (2017). Variación morfológica en *Opuntia jaliscana* (Cactaceae). *Anales del Jardín Botánico de Madrid* 74: 1-11. <https://www.redalyc.org/pdf/556/55651825012.pdf>
- López-Palacios, C., Peña-Valdivia, C. B., Reyes-Agüero, J.A., Aguirre-Rivera, J.R., Ramírez-Tobías, H.M., Soto-Hernández, R.M. & Jiménez-Bremont, J.F. (2015). Inter- and intra-specific variation in fruit biomass, number of seeds, and physical characteristics of seeds in *Opuntia* spp., Cactaceae. *Genetic Resources and Crop Evolution* 62: 1205-1223. <https://doi.org/10.1007/s10722-015-0223-9>
- López-Palacios, C., Reyes-Agüero, J. A., Peña-Valdivia, C. B. & Aguirre-Rivera, J. R. (2019). Physical characteristics of fruits and seeds of *Opuntia* sp. as evidence of changes through domestication in the Southern Mexican Plateau. *Genetic Resources and Crop Evolution* 66: 349-362. <https://doi.org/10.1007/s10722-018-0712-8>
- Núñez-Gastélum, J. A., González-Fernández, R., Hernández-Herrera, A., Campas-Baypoli, O., Rodríguez-Ramírez, R., Lobo, N. & Valero-Galván, J. (2018). Morphological characteristics, chemical composition, and antioxidant activity of seeds by four wild *Opuntia* species from North of Mexico. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 20: 23-33. <https://doi.org/10.56890/jpacd.v20i.26>
- Pinto, N. C. & Scio, E. (2014). The biological activities and chemical composition of *Pereskia* species (Cactaceae). A Review. *Plant Foods for Human Nutrition* 69: 189-195. <https://doi.org/10.1007/s11130-014-0423-z>
- Reyes-Agüero, J. A., Aguirre Rivera, J. R. & Flores-Flores, J. L. (2005). Variación morfológica de opuntia (Cactaceae) en relación con su domesticación en la altiplanicie meridional de México. *Interciencia* 30(8): 476-484. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33910706>
- Reyes-Corral, V.I., González-Fernández, R., Quiñónez-Martínez, M., Rodrigo-García, J., Garza-Vallejo, G. I. & 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>
- Sharov, A. A., Dudekula, D. B. & Ko, M. S. H. (2005). A web-based tool for principal component and significance analysis of microarray data. *Bioinformatics* 21(10): 2548-2549. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bti343>
- Stuppy, W. (2002). Seed characters and the classification of the Opuntioideae (Cactaceae). *Succulent Plant Research* 6: 25-58. <https://bit.ly/48uzndR>
- Valero-Galván, J., González-Fernández, R., Sigala-Hernández, A., Núñez-Gastélum, J. A., Ruiz-May, E., Rodrigo-García, J. & Martínez-Ruiz, N. D. R. (2021). Sensory attributes, physicochemical and antioxidant characteristics, and protein profile of wild prickly pear fruits (*O. macrocentra* Engelm., *O. phaeacantha* Engelm., and *O. engelmannii* Salm-Dyck ex Engelmann.) and commercial prickly pear fruits (*O. ficus-indica* (L.) Mill.). *Food Research International* 140:109909. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109909>
- Venable, D. L. & Brown, J. S. (1988). The selective interactions of dispersal, dormancy, and seed size as adaptations for reducing risks in variable environments. *The American Naturalist* 131(3): 360-384. <https://www.jstor.org/stable/2461975>

Viramontes, O., Lebgue, K.T., Soto, C.R., Quiñones, M. M., Balderrama, C.S. & Aviña, D. Y. (2011). Cactáceas endémicas y raras del Estado de Chihuahua, México. *Tecnociencia Chihuahua* 5(1):27-33. <https://vocero.uach.mx/index.php/tecnociencia/article/view/704>

Zammit, C. & Zedler, P. H. (1990). Seed yield, seed size, and germination behaviour in the annual *Popogyne abramsii*". *Oecologia* 84: 24-28. <https://doi.org/10.1007/bf00665590>

2023 TECNOCENCIA CHIHUAHUA

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



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>