



Imágenes tomadas de: Canva educativo

Germinación, crecimiento vegetativo y morfología floral de *Dasyliirion cedrosanum* del matorral rosetófilo de Coahuila

Germination, vegetative growth and floral morphology of *Dasyliirion cedrosanum* from the rosetophyllous scrub of Coahuila

Adalberto Benavides-Mendoza¹, Agustín Hernández-Juárez², Nazario Francisco-Francisco³

RESUMEN

El sotol (*Dasyliirion cedrosanum* Trel.), especie endémica del noreste de México, presenta interés económico y social por su aprovechamiento comercial. El objetivo del presente trabajo fue caracterizar la germinación, crecimiento vegetativo y morfología floral de *D. cedrosanum* del matorral rosetófilo de Coahuila. Se sometieron 3 lotes de 100 semillas a un proceso de imbibición y se registró el porcentaje de germinación. La caracterización de la germinación se realizó a las plántulas cultivadas en laboratorio, mientras que la morfología vegetativa se determinó en plantas adultas tomadas de un jardín botánico, con fecha de siembra conocida y a las cuales no se les dio un manejo de cultivo. La descripción de la morfología floral se realizó en plantas silvestres del cañón de San Lorenzo, Saltillo, Coahuila, México. La primera fase de la imbibición duró 48 h e incrementó 52 % el peso; la segunda o de latencia duró 48 h alcanzando un 55 %; y la tercera concluyó a las 120 h con un incremento total del 60 % de peso. Las semillas emitieron el hipocótilo a partir del quinto día. En el décimo día se obtuvo 98 % de germinación. Entre las características morfológicas distintivas de la especie, las inflorescencias, conocidas como “escapos florales”, registraron una altura promedio de 3.39 m. Las flores fueron actinomorfas y unisexuales. La flor estaminada presentó perianto sin diferenciación de tépalos y sépalos. Las flores pistiladas mostraron pedicelos y receptáculo corto. El polen fue elíptico, de abertura monosulcada, con dimensión de 15 μm x 30 μm . Los frutos fueron secos e indehiscentes, conocidos como samara. Las semillas fueron turbinadas de contorno trigonal. El análisis de las características de germinación y morfología vegetativa y floral del sotol permitieron comprender las adaptaciones que esta planta ha desarrollado para crecer en los ambientes semiáridos del país.

PALABRAS CLAVE: Dioecia, *caudex*, inflorescencia, floración, fases de la imbibición.

ABSTRACT

Sotol (*Dasyliirion cedrosanum* Trel.), endemic species of northeastern Mexico, has attracted economic and social interest due to its commercial potential. The objective of this work was to characterize the germination, vegetative growth and floral morphology of *D. cedrosanum* from the rosetophyllous scrub of Coahuila. Three batches of 100 seeds were submitted to an imbibition process and the germination percentage was recorded. The characterization of the germination was carried out on the seedlings grown in the laboratory, while the vegetative morphology was determined in adult plants taken from a botanical garden, with a known planting date and which were not given a crop management. The description of the floral morphology was carried out on wild plants from the San Lorenzo canyon, near the municipality of Saltillo, Coahuila, Mexico. The imbibition showed the first phase of absorption within 48 h, with an increase of 52 % in weight. The third phase began at 96 h with an increase of 55 % in weight. The seeds emitted the hypocotyl from the fifth day. On the tenth day 98 % germination was obtained. Among the distinctive morphological characteristics of the species, the inflorescences, known as “floral scapes”, recorded an average height of 3.39 m. The flowers were actinomorphic and unisexual. The staminate flower presented perianth without differentiation of tepals and sepals, while the pistillate flowers showed pedicels and a short receptacle. The pollen was elliptical, with a monosulcate opening, with a dimension of 15 μm x 30 μm . The fruits were dry and indehiscent, known as samara. The seeds were turbinated with a trigonal contour. The germination and characteristics of the sotol corresponded to adaptations that allow it to grow in the semi-arid environment of this region of the country.

KEYWORDS: Dioecy, *caudex*, inflorescence, flowering, imbibition phases.

*Correspondencia: nazariof.francisco@utihuacan.edu.mx/ Fecha de recepción: 17 de diciembre de 2022/ Fecha de aceptación: 7 de junio de 2023/ Fecha de publicación: 20 de julio de 2023.

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Horticultura, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. ²Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Parasitología, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. ³Universidad Tecnológica de Tehuacán, Departamento de Agricultura Sustentable y Protegida, Prolongación de la 1 sur núm. 1101, San Pablo Tepetzingo, Tehuacán, Puebla, México, C. P. 75859.

INTRODUCCIÓN

Dasyilirion cedrosanum Trel. es una especie que crece en zonas semiáridas con vegetación de tipo matorral rosetófilo (Madrid-Solórzano y col., 2021). Se localiza principalmente en Chihuahua, Durango y Coahuila, aunque también puede observarse en áreas adyacentes a dichos estados con altitud en el rango de 850 m a 2 600 m sobre el nivel del mar (Reyes-Valdés y col., 2017). Se estima que la cuarta parte del estado de Coahuila está compuesta por este tipo de vegetación (Encina-Domínguez y col., 2013). La especie tiene gran importancia por los beneficios ecológicos, sociales y económicos en la región norte del país (Reyes-Valdés y col., 2013). De la planta se obtiene un licor similar al tequila y el mezcal denominado “sotol” (Flores-Gallegos y col., 2019). Actualmente se explora el uso potencial del bagazo del sotol para la producción de bioetanol 2G, un biocombustible promisorio, obtenido de los residuos celulósicos y hemicelulósicos del material vegetativo descartado, que puede reducir la dependencia a los combustibles fósiles (González-Chavez y col., 2022). Un estudio del contenido nutricional de *Dasyilirion* demostró que la harina de las semillas contiene 27 % más proteína en comparación a las semillas de trigo, lo cual puede dar un uso agregado a este género (Orozco-Sifuentes y col., 2019). No obstante, *D. cedrosanum* es explotada desde las fuentes naturales, lo que ha fomentado la reducción paulatina de los ejemplares que crecen en estas zonas del país. Encina-Domínguez y col. (2013), mencionaron que el efecto de la explotación de dicha especie por el ser humano sobre la estructura de las comunidades poblacionales en el centro y sureste del estado de Coahuila, es aún desconocida, por lo que recomiendan realizar estudios que permitan entender su dinámica y su relación con otras especies vegetales, y así poder establecer la normatividad adecuada para un aprovechamiento comercial sostenible.

Las características vegetales del género *Dasyilirion* han sido revisadas por Bogler (1994). Así mismo, se han aplicado técnicas de proce-

samiento digital para la caracterización morfológica (Calixto-Valencia y col., 2022), la cual resulta primordial si se considera que aún dentro de una misma población de sotol existen diferencias fenotípicas. Un estudio que empleó marcadores de polimorfismos de fragmentos amplificados detectó variabilidad genética de *D. cedrosanum* en función de la altitud sobre el nivel del mar (en el rango 2 040 msnm a 2 140 msnm), encontrando que la mayor variabilidad se encuentra en diferencias de elevación de 20 m (Pinales-Quero y col., 2017). Sin embargo, se requiere información puntual de los tipos morfológicos vegetativos, florales y del proceso de germinación de la especie *D. cedrosanum* que permitan su manejo. Los estudios de la morfometría y la capacidad germinativa se han empleado con la finalidad de planear proyectos futuros que han permitido la conservación y/o propagación de otras especies vegetales, otorgando la información para el buen manejo del germoplasma (Valencia y col., 2022).

Existen factores como la temperatura, disponibilidad de agua y niveles de radiación que provocan cambios en las características de la morfología de las plantas (Hinojosa y col., 2019). Estos factores determinan la idoneidad del hábitat para algunas especies vegetales. Al respecto, en un ensayo de modelamiento de nicho ecológico para tres especies de *Dasyilirion*, se encontró que *D. cedrosanum* es la especie con mayor vulnerabilidad al cambio climático, ya que presenta rangos limitados de estacionalidad (principalmente en temperatura y precipitación pluvial), por lo que difícilmente podría adaptarse a posibles variaciones ambientales futuras (Becerra-López y col., 2020). En contexto con lo antes expuesto, resulta de gran importancia estudiar las características morfológicas de dicha especie que permita relacionarla con los aspectos de su adaptación al clima semiárido de esta región del país.

El objetivo del presente trabajo fue la caracterización de la germinación, crecimiento vegetativo y morfología floral de *Dasyilirion cedrosanum* del matorral rosetófilo de Coahuila.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron semillas de *D. cedrosanum* Trel. de colecta directa del escapo floral de plantas silvestres que se encuentran en el cañón San Lorenzo, ubicado en las coordenadas 25°20'22" N y 100°59'23" W a 1 942 msnm, aledaño al municipio de Saltillo, Coahuila, México. El sitio cuenta con clima semiárido (BS1kw) con una temperatura media de 13.6 °C (enero 8.6 °C; julio 25.8 °C) y una precipitación anual de 521.2 mm (Macías-Hernández, 2015). El suelo es litosólico, franco arcilloso, y calcáreo. La población del sotol en este sitio se encuentra en laderas con pendiente pronunciada; otras especies vegetales que abundan en el lugar son lechuguilla (*Agave lechuguilla* Torr., Asparagaceae), cenizo (*Leucophyllum frutescens* Berl., Scrophulariaceae) y huizache (*Acacia farnesiana*, Fabaceae).

En la primera semana del mes de junio de 2011 se cosecharon 10 escapos florales (de 10 plantas diferentes), lo que permitió obtener 1 000 semillas (14 g), que se depositaron en un frasco de vidrio para homogeneizarlas. Una semana después de la colecta, se desprendió la cubierta que protegía a las semillas, se desinfectaron a través de un lavado con etanol al 70 % por 1 min, y se enjuagaron con agua destilada, para posteriormente sumergirlas en hipoclorito de sodio al 40 % por 15 min. Se colocaron 100 unidades, por triplicado, en agua destilada, aireada continuamente con una bomba para pecera Elite 802 (Hagen Inc., Ontario, Canadá). Se determinó la tasa de imbibición como el porcentaje de incremento de peso con respecto al peso inicial. Las semillas se pesaron cada 24 h, utilizando una balanza de precisión OHAUS® (modelo Explorer, Nueva Jersey, EUA) hasta observar la emergencia de las primeras radículas, dato que se tomó como indicador del inicio de la germinación. Una vez alcanzado un tamaño de radícula de 3 veces la longitud de la semilla se colocaron sobre perlita y se regaron diariamente hasta observar la emergencia de las plúmulas. Una vez emergidas estas, se dispusieron las plántulas en macetas de polietileno negro de 5 L de

capacidad con suelo calcáreo como sustrato, característico de la región. La caracterización morfológica de la germinación se realizó siguiendo la metodología de los tipos morfológicos propuesta por Tillich (2000) para monocotiledóneas.

Se midieron las radículas (día 5) y las raíces primarias (día 17) de cuatro plántulas emergidas en laboratorio con una regla graduada. La longitud radical de las plantas crecidas a cielo abierto (40 d, 48 d y 69 d después de emergencia) se midió desde la base del *caudex*; para lo cual se realizaron muestreos destructivos de la raíz fusiforme más larga de cuatro plantas agrupadas por edad. La longitud de las hojas se tomó desde la parte media del *caudex*. El número de hojas y altura se estimó de 6 plántulas durante 120 d.

La caracterización vegetativa se llevó a cabo en el jardín botánico de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada en Saltillo, Coahuila. Se midieron y analizaron los órganos vegetales de ejemplares de sotol con fechas de registro de la siembra y localización de las plantas. Se trabajó con cuatro grupos de plantas con edades diferentes (0.5, 2.5, 5 y 7 años) para la medición exacta del diámetro de *caudex*, el cual se hizo con un vernier digital (Scala®, Distrito Federal, México) precisión 0.01 mm.

La longitud de las inflorescencias se tomó de 10 escapos de plantas silvestres, seleccionadas al azar en un área trazada de 2 000 m² del cañón de San Lorenzo, y para su medición se utilizó un flexómetro (Truper, México). La descripción morfológica de las inflorescencias, flores, frutos y semillas se determinó de los escapos seleccionados.

En el análisis de la morfología, se utilizó la sistemática y terminología descriptiva de Simpson (2006) y Singh (2019), que consiste en la descripción de las formas que definen perfectamente los órganos de una especie vegetal. Las fotografías de los órganos vegetales se tomaron con una cámara digital de 5 mega

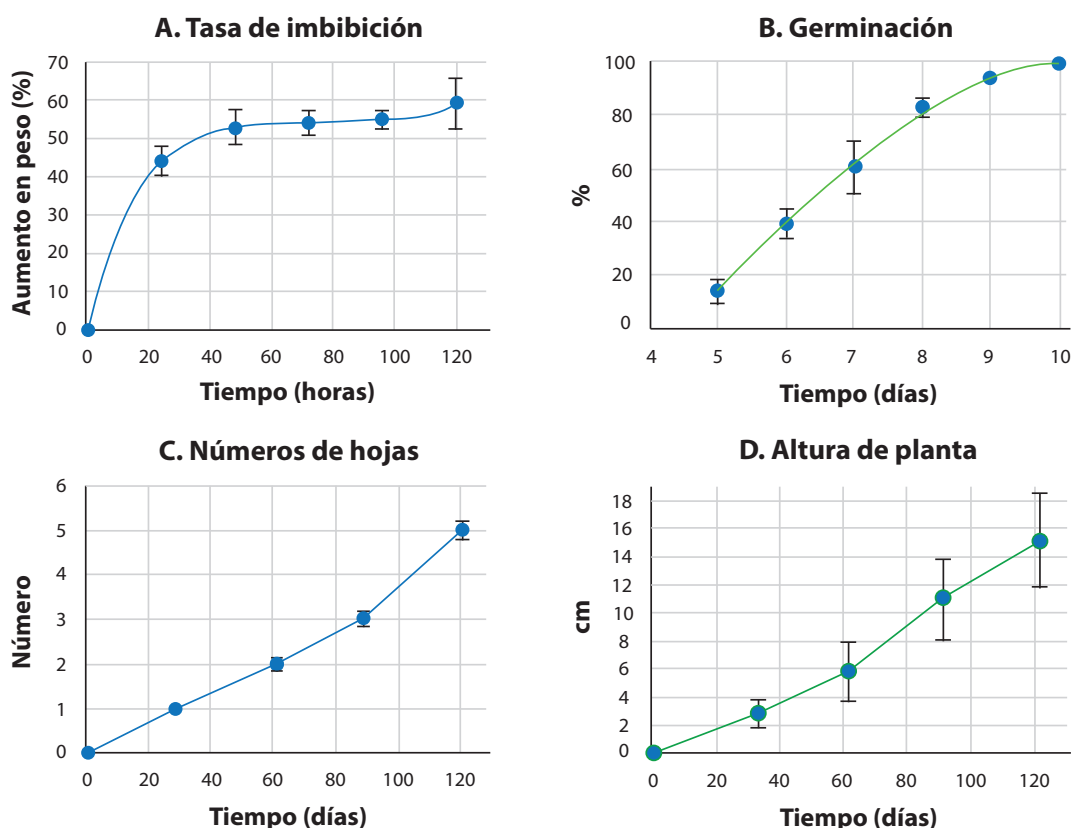
pixeles (Cannon PowerShoot G5®, NY, EUA). Para la toma de imágenes de las semillas y flores, la cámara digital fue adaptada a un estereoscopio (Carl Zeiss, Gottingen, Alemania). Las mediciones de referencia de las semillas, radícula, así como de las flores, se realizaron con el software Axion Vision Release 4.6 (Carl Zeiss Microlmaging GmbH, Jena, Alemania) el cual es un sistema de imagen digital computarizado.

RESULTADOS

Características de la germinación

Esta fase tuvo una duración de 120 h (5 d),

con un incremento del 60 % en peso (Figura 1A). La primera fase de imbibición de las semillas se caracterizó por la alta absorción de agua, y se presentó en las primeras 48 h, con un incremento del 52 % de peso. La fase de intervalo duró 48 h, y en ella, la absorción no aumentó significativamente, terminando con 55 % de peso a las 96 h, y dando inicio a la tercera fase, a partir de la cual las semillas mostraron un leve aumento, al incrementarse un 58 % de peso. La emergencia de las radículas se presentó en el día 5 (Figura 1B), la cual alcanzó el 13.3 %, al inicio de la germinación. Hasta el día 10, se ob-



■ Figura 1. Características vegetativas de *Dasyilirion cedrosanum* Trel.

A. y B. Tasa de imbibición y germinación bajo condiciones de laboratorio. Las medias se obtuvieron de tres charolas con 100 semillas cada una. C y D. Número de hojas y altura de plántulas bajo condiciones de cielo abierto. Las medias se obtuvieron de 6 plántulas. Las barras representan las desviaciones estándar.

Figure 1. Vegetative characteristics of *Dasyilirion cedrosanum* Trel.

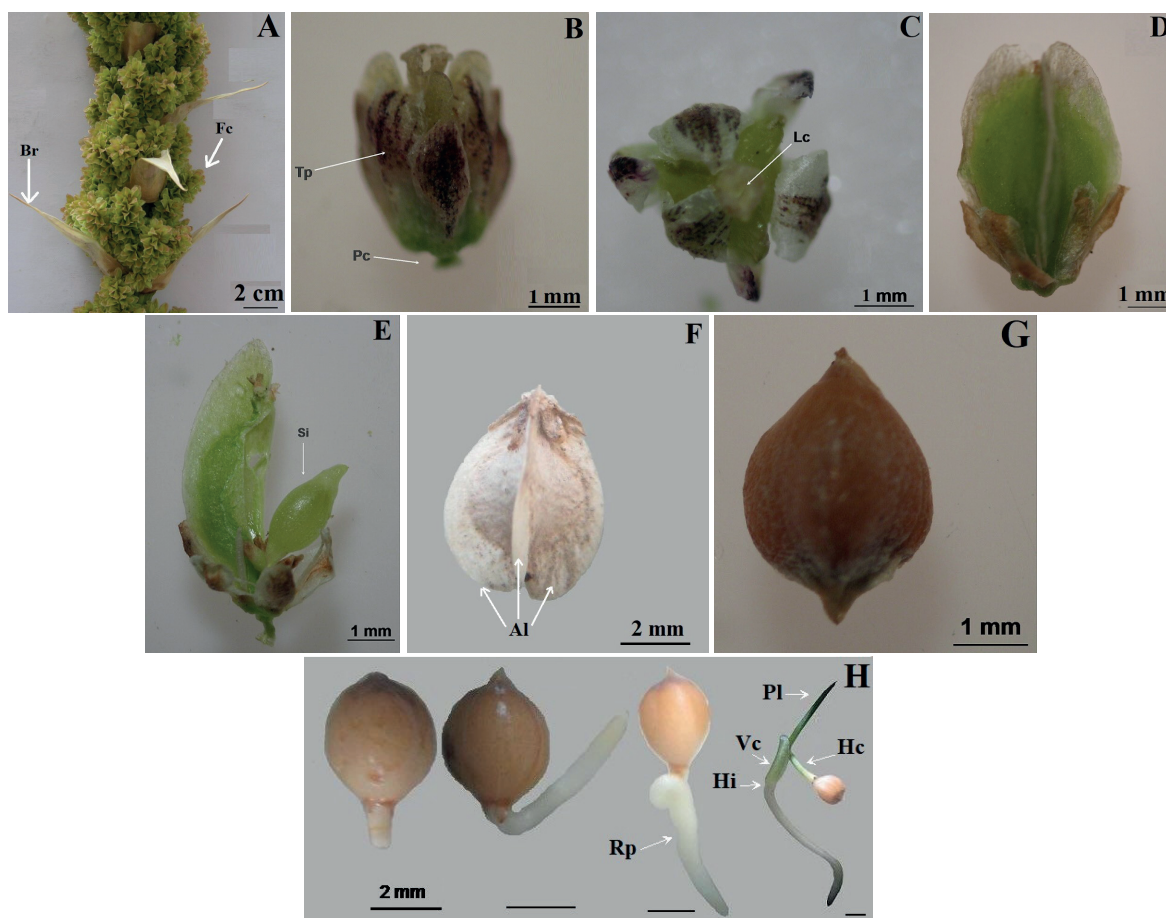
A and B. Rate of imbibition and germination under laboratory conditions. The means were obtained from three trays with 100 seeds each. C and D. Number of leaves and height of seedlings under open sky conditions. The means were obtained from 6 seedlings. The bars represent the standard deviations.

tuvo un promedio del 98 % de semillas germinadas. La germinación comenzó con la emergencia de la raíz primaria que se elongó hasta desarrollar el hipófilo cotiledonar (pecíolo cotiledonar) de aspecto tubular (Figura 2H) y color verde. Su crecimiento fue de manera ascendente y elevó a la testa sobre el suelo, correspondiendo al tipo epigeo. En el día 9 surgió el hipérfilo cotiledonar (vaina cotiledonar) de aspecto blanquecino, el cual protege la salida de la plúmula de tipo ensiforme. La raíz hasta este momento era de tipo fu-

siforme con hipocótilo inconspicuo. Estas estructuras del cotiledón crecieron formando un ángulo agudo hasta un tiempo aproximado de 30 d después de la emergencia, lo que les permitió mantenerse en posición paralela una de la otra (Figura 2H).

Características vegetativas

Los aspectos particulares de cada órgano y las medidas registradas durante el estudio en las plantas con edad conocida, se mencionan a continuación:



■ Figura 2. Inflorescencia pistilada y secuencia de la germinación de *Dasyilirion cedrosanum* Trel. A. Infructescencia: Br = brácteas y Fc = Folículo. B. Flor pistilada: Pc = pedicelo y Tp = tépalo. C. Vista superior de la flor pistilada: Lc = lóculo. D y E. Fruto inmaduro: Si = semilla inmadura. F. Fruto maduro: Al = alas. G. Semilla madura. H. Secuencia de germinación: Rp = raíz primaria, Hi = hipocótilo, Vc = vaina cotiledonar, Pl = Plúmula y Hc = hipófilo.

Figure 2. Pistillate inflorescence and germination sequence of *Dasyilirion cedrosanum* Trel.

A. Infructescence: Br = Bract and Fc = Follicle. B. Pistillate flower: Pc = pedicel and Tp = tepal. C. Top view of the pistillate flower: Lc = loculus. D and E. Immature fruit: Si = immature seed. F. Ripe fruit: Al = ay. G. Ripe seed. H. Germination sequence: Pr = primary root, Hi = hypocotyl, Vc = cotyledonary sheath, Pl = Plumule and Hc = hypophylic.

Raíz

La longitud radicular de las plantas de sotol fue en promedio de 0.21 cm, en los primeros 5 d después de emergencia, bajo condiciones de laboratorio, con un aumento de 1 000 % hasta el día 17. Bajo condiciones de cielo abierto, en el día 40 se registró un aumento del 92 % en el crecimiento y, a partir del día 69 después de emergencia, el crecimiento sostenido fue del 36 %. Las plantas jóvenes presentaron raíz fibrosa, de longitud corta. La longitud de la raíz de las plantas obtenidas con 7 años de edad se registró en 25.9 cm en promedio, con porcentaje de crecimiento sostenido del 26.3 % (Tabla 1). Las raíces a esta edad fueron gruesas y fusiformes.

Tallo

De hábito caulescente (Figura 3D), con un tallo modificado, conocido como *caudex*, el cual fue de longitud corta en las plantas con edad de 7 años y con una tasa de aumento sostenido del 24 % (Tabla 1). En la parte apical se

encontró una yema de tipo terminal; aparentemente esta yema puede formar tejido vegetativo o una inflorescencia. A partir de la edad de 7 años se apreció que el *caudex* es revestido por hojas viejas que la cubren a manera de estípites; el aumento en grosor y altura fue inferior a 1 m (Figura 3D).

Hojas

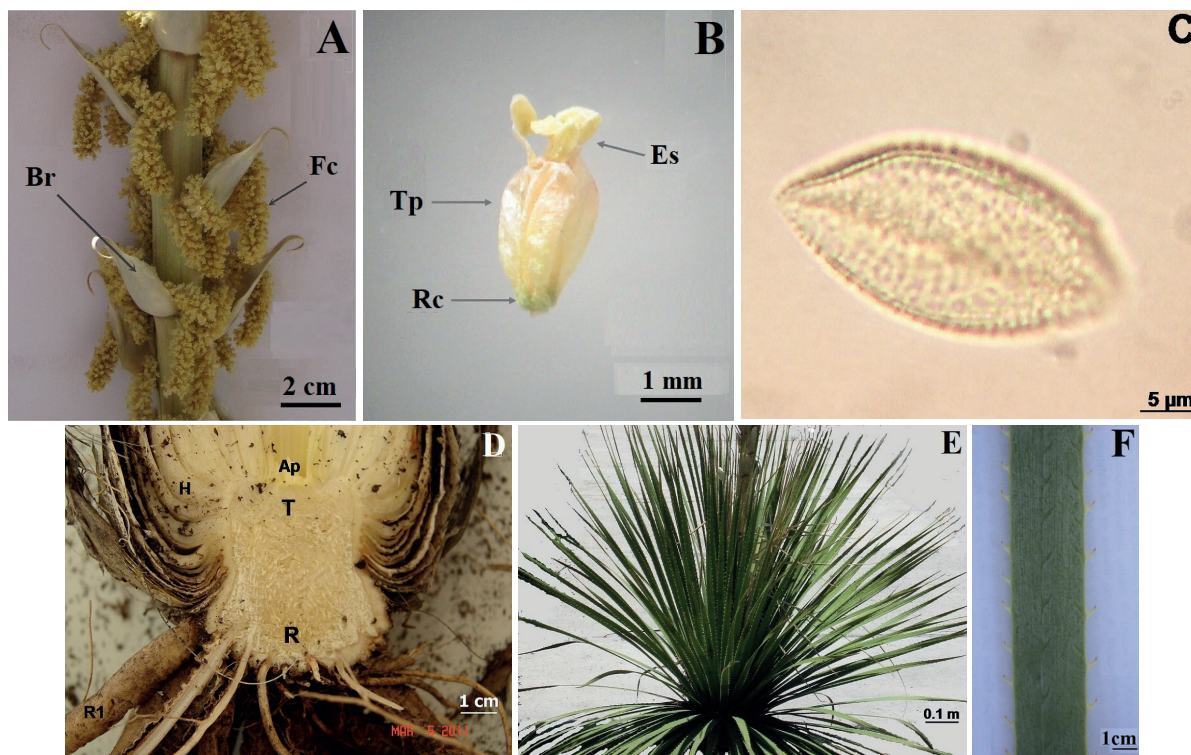
Las plantas de sotol mostraron una altura promedio de 15 cm a los 120 d de siembra. Las hojas jóvenes, en promedio, fueron 5 a los 120 d, y presentaron filotaxia del tipo alternada (Figura 3F) con hojas del tipo unipinado sin venación visible. Las hojas adultas de tipo perenne, registraron el limbo simple, con forma ensiforme, venación paralela y ápice acuminado; se les encontró deshilachados formando una brocha pequeña (Figura 3E). La base fue hastada; denominada comúnmente como “acucharada”. El margen mostró aspecto espinoso, con superficie abaxial curvada y superficie adaxial ligeramente cóncava, lisa y ligeramente estriada (Figura 3F).

■ Tabla 1. Longitud radicular y de raíz, y diámetro de *caudex* en diferentes edades de *D. cedrosanum* obtenidas bajo condiciones de laboratorio y cielo abierto y plantas proporcionadas por el jardín botánico.

Table 1. Root and root length, and *caudex* diameter in different ages of *D. cedrosanum* obtained under laboratory and open sky conditions and plants provided by the botanical garden.

Días después de siembra (laboratorio y cielo abierto)	Radícula/Raíz (cm)*	Aumento (%)	Diámetro de <i>caudex</i> (cm)*	Aumento (%)
5	0.21 ± 0.01	0	-----	-----
17	2.31 ± 0.12	1 000	-----	-----
40	4.45 ± 0.52	92	-----	-----
48	5.77 ± 0.55	29	-----	-----
69	7.80 ± 0.96	36	-----	-----
Años después de siembra (jardín botánico)				
0.5	15.8 ± 1.70	102	0.7 ± 0.11	0
2.5	16.7 ± 2.02	5.6	1.8 ± 0.26	157.1
5	20.5 ± 7.59	22.7	2.5 ± 1.16	38.8
7	25.9 ± 13.1	26.3	3.1 ± 0.62	24

*Las medias se muestran con desviaciones estándar y se obtuvieron de 4 plantas tanto en condiciones de laboratorio, a cielo abierto y en jardín botánico.



■ Figura 3. Inflorescencia estaminada y secciones vegetativas del sotol (*Dasyilirion cedrosanum* Trel.). A. Inflorescencia estaminada: Br = bráctea y Fc = fascículo. B. Flor estaminada: Es = estambres, Tp = tépalos y Rc = receptáculo. C. Polen. D. Caudex: R1 = Raíz fusiforme, R = raíces adventicias, T = tallo, H = hojas y Ap = ápice. E. Planta adulta y F. Hoja.
Figure 3. Staminate inflorescence and vegetative sections of the sotol (*Dasyilirion cedrosanum* Trel.). A. Staminate inflorescence: Br = bract and Fc = fascicle. B. Staminate flower: Es = stamens, Tp = tepals and Rc = receptacle. C. Pollen. D. Caudex: R1 = Fusiform root, R = cord roots, T = stem, H = leaves, and Ap = apex. E. Adult plant and F. Leaf.

La filotaxia de la hoja adulta fue equitante y con disposición alterna en roseta basal. Las hojas de las plantas de 7 años presentaron apariencia glauca, persistentes, llegándose a observar hojas viejas por más de 2 años. Con respecto al eje del tallo, se encontraron hojas ascendentes, e inclinadas con una postura transversa ligeramente recurvada; solo las hojas añejas de la parte basal del tallo se fueron disponiendo de manera reclinada, descendente y finalmente depresada. La inserción de las hojas al tallo mostró una forma decurrente. La longitud de las hojas varió de acuerdo a la edad de la planta; las plantas de 7 años registraron hasta 1.20 m (Figura 3E).

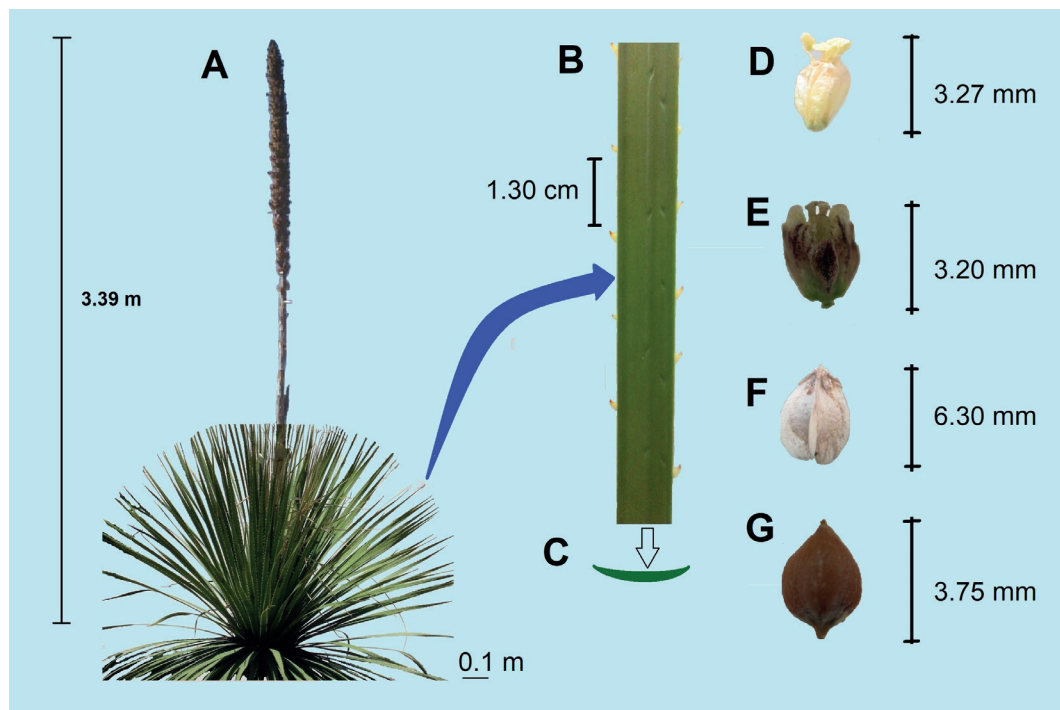
Caracterización floral

Los aspectos de las inflorescencias y flores unisexuales de las plantas silvestres observa-

das en el sitio de estudio se presentan a continuación:

Inflorescencias

Se observaron inflorescencias estaminadas y pistiladas conocidas comúnmente como “escapo”. Estas panículas complejas presentaron una longitud variable de entre $3.39 \text{ m} \pm 0.59 \text{ m}$ (Figura 4). Ambas mostraron semejanza en su arquitectura, ya que contenían densos racimos axilares conocidos como fascículos de 5 cm a 7 cm, los cuales se acompañaron con brácteas espiraladas a lo largo del escapo terminal, sin embargo, se registraron diferencias en su coloración, las inflorescencias estaminadas presentaron color amarillo claro, mientras que las inflorescencias pistiladas eran color verde oscuro cuando las semillas aún no maduraban.



■ Figura 4. Planta adulta de *Dasyilirion cedrosanum*. A. Planta e inflorescencia. B y C. Hoja y sección transversal. D. Flor estaminada, E. Flor pistilada. F. Fruto. G. Semillas.

Figure 4. Adult plant of *Dasyilirion cedrosanum*. A. Plant and inflorescence. B and C. Leaf and cross section. D. Staminate flower. E. Pistillate flower. F. Fruit. G. Seeds.

La longitud de los fascículos varió en la posición de la inflorescencia, encontrándose racimos más largos en la parte media a comparación de los extremos. Las inflorescencias estaminadas y pistiladas mostraron flores unisexuales principalmente, dispuestas en forma de espiral (Figuras 2B y 3B). La época de floración de las plantas de sotol fue de finales del mes de marzo hasta finales del mes de abril en la región sureste de Coahuila, mientras que las semillas maduraron a partir del mes de junio, lo cual fue coincidente con el comienzo de las lluvias.

Flores

La flor estaminada presentó un perianto con tépalos (o perigonio), que tienen aspecto de pétalos de un color amarillo-blancuzco y de superficie membranosa (es decir, no diferenciado en sépalos y tépalos). Este verticilo se alternó en 2 tépalos trimeros en el mismo círculo; característico en las monocotiledóneas (Singh, 2019); el receptáculo alcanzó los 3 mm.

En las flores estaminadas se registraron 6 estambres exsertos, delfos, homodínamos, con filamento glabro y anteras dehiscentes longitudinalmente, extrorsas con respecto a los tépalos y dispuestas en el filamento en forma dorsifija (Figura 3B). El polen presentó aspecto elíptico, con abertura monosulcada, elipsoide y angosta, de longitud paralelo al axis ecuatorial del grano de polen, con una exina finamente reticulada. La posición de la abertura fue del tipo polar distal extendido. El tamaño de los axis ecuatorial y polar reportado fue de $15 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$. La forma de los granos de polen mostró simetría, por lo que es posible que el tipo de abertura de las anteras sea de tipo consistente (Figura 3C).

La flor pistilada presentó un aspecto pedicelado, con receptáculo corto, hipógina en cuanto a la inserción de los tépalos, sincárpica y unicarpelar. Además, mostró 6 tépalos arqueados de forma elíptica, actinomorfa y color morado, con estilo corto (Figura 2C). El

ovario desarrolló una semilla; aspecto conocido como unilocular (Figura 2E).

Fruto

Los frutos de *Dasyilirion cedrosanum* fueron simples, secos e indehiscentes, denominados samara, de forma ovada a oblonga de 4 mm a 6 mm de ancho con 3 alas que se estrecharon en la parte apical del fruto, conteniendo solo una semilla (Figura 2D a 2F).

Semillas

Las semillas mostraron aspecto turbinado de contorno trigonal y un ápice agudo, sin pubescencia, con textura lisa y color café dorado. La longitud ecuatorial se registró de 3.5 mm a 4 mm con un calibre de 3 mm a 3.5 mm (Figura 2G). Un lote de 100 semillas registró un peso de $1.4 \text{ g} \pm 0.05$, lo que representa que se tiene en promedio 71 429 semillas por kilogramo.

DISCUSIÓN

Las semillas colectadas en vísperas del inicio del periodo de lluvias presentaron alta capacidad germinativa cuando fueron sumergidas en agua destilada con aireación. Fisiológicamente la primera fase de imbibición de las semillas de las monocotiledóneas se caracteriza por una alta respiración (Jayawardhane y col., 2021). Lo anterior sugiere que, para aumentar el porcentaje de germinación de las semillas de algunas especies de monocotiledóneas reconocidas por su difícil germinación, es necesario sumergir las semillas en agua por un periodo prolongado de 120 h, y suministrar un cierto nivel de aireación, con la finalidad de propiciar oxigenación. Se ha reportado que el contenido de humedad inicial de las semillas y la temperatura del medio de almacenamiento son factores que determinan la sensibilidad a la germinación y al mismo tiempo su longevidad (Afzal y col., 2020). No obstante, en un ensayo de germinación de semillas de *Nolina*, un género perteneciente a la familia Nolinaceae, se observó que la mayor tasa de germinación se logró con la ausencia de luz y sin inmersión en agua (Reyes-Bautista y Rodríguez-

Trejo, 2005); esto denota la diferencia fisiológica en las semillas de especies de plantas aún dentro de una misma familia.

La longitud corta de las raíces observada en las plantas de sotol a la edad de 7 años puede deberse a un cambio constante de raíces adventicias. Aún se desconocen los mecanismos por los cuales algunas plantas del semidesierto soportan sequías prolongadas, no obstante, se ha sugerido que la textura del suelo, así como las características hidráulicas suelo-planta, son las determinantes en la absorción de agua bajo condiciones de sequía y de alguna manera influyen en su resistencia (Cai y col., 2021).

La altura inferior a 20 cm de las plántulas de sotol registrada en los primeros 120 d después de siembra, con 3.1 cm de diámetro de *caudex* a la edad de 7 años, sugieren un lento crecimiento de esta especie. Con respecto al *caudex*, si bien en las monocotiledóneas se ha mencionado la carencia de cambium vascular, el aumento en grosor observado en las especies de la familia Liliaceae y Asparagaceae (incluye el género *Dasyilirion*) se ha adjudicado a la presencia de un meristemo primario engrosador, cercano al ápice, y un meristemo secundario engrosador distante, el cual promueve un crecimiento secundario (Jura-Morawiec y col., 2021).

Por otra parte, no se sabe con claridad que es lo que propicia la floración de *D. cedrosanum*. No obstante, en la región sureste de Coahuila, las plantas emiten sus escapos florales en épocas con abundante lluvia. Al mismo tiempo, es posible admitir que la emisión de los escapos es cíclica, ya que sucede cada 5 o 6 años. Aunado a ello, la abertura de los granos de polen para la salida del tubo polínico en el género *Dasyilirion* es única y discreta (Harley y Zavala, 2000); lo cual es una característica de las monocotiledóneas que requiere condiciones climáticas específicas para poder dar paso a la fertilización floral. En ese mismo sentido, aún existen interrogantes sobre las determinantes de

la diferenciación sexual entre plantas masculinas y femeninas. Las fitohormonas han sido relacionadas con la diferenciación sexual en las plantas dioicas, debido a que, individualmente o en combinación, promueven la masculinización o feminización de las estructuras sexuales (Rivas-Martínez y col., 2016); hipótesis que no ha sido comprobada científicamente. No obstante, en un estudio poblacional de plantas de sotol en cuatro localidades de los estados de Coahuila y Zacatecas, se observó la existencia de una proporción equitativa entre las plantas masculinas y femeninas (Reyes-Valdés y col., 2017).

CONCLUSIONES

El presente trabajo permitió identificar que las semillas de cosecha reciente de *D. cedrosanum* alcanzaron un alto porcentaje (98 %) de germinación en el día 10, a través de un periodo de imbibición que duró 120 h y le permitió un aumento de peso del 60 %. La

emergencia de las plántulas correspondió al tipo epigeo. El crecimiento vegetativo se caracterizó por una altura inferior a 20 cm con 5 hojas en promedio a la edad de 120 d, mientras que la longitud radical se registró de 15.8 a 25.9 cm en el rango de edad de 0.5 a 7 años con un aumento en tamaño que osciló entre 5.6 % a 26.3 %, en esta etapa. El *caudex* presentó un diámetro inferior a 4 cm a la edad de 7 años, lo cual denota un lento crecimiento de la especie. Las flores pistiladas mostraron flores con receptáculo corto y unilocular para el desarrollo de las semillas, mientras que las flores estaminadas presentaron perianto con tépalos y anteras extrorsas. La caracterización germinativa, vegetativa, y floral realizada en este trabajo aporta información valiosa para entender la evolución adaptativa de *D. cedrosanum* y podría ser de utilidad para descifrar las interrogantes que aún quedan sobre la especie.

REFERENCIAS

- Afzal, I., Jaffar, I., Zahid, S., Rehman, H. U., and Basra, S. M. A. (2020). Physiological and biochemical changes during hermetic storage of *Moringa oleifera* seeds. *South African Journal of Botany*. 129: 435-441.
- Bogler, D. J. (1994). *Taxonomy and phylogeny of Dasylirion (Nolinaceae)*. Ph.D. Dissertation. Austin, Texas: University of Texas. 583 Pp.
- Becerra-López, J. L., Rosales-Serna, R., Ehsan, M., Becerra-López, J. S., Czaja, A., Estrada-Rodríguez, J. L., and Domínguez-Martínez, P. A. (2020). Climatic change and habitat availability for three sotol species in Mexico: a vision towards their sustainable use. *Sustainability*. 12(8): 3455.
- Cai, G., Carminati, A., Abdalla, M., and Ahmed, M. A. (2021). Soil textures rather than root hairs dominate water uptake and soil-plant hydraulics under drought. *Plant Physiology*. 187(2): 858-872.
- Calixto-Valencia, C. G., Cetina-Alcalá, V. M., Ramírez-Herrera, C., López-López, M. Á., Ángeles-Pérez, G., Equihua-Martínez, A. y Basave-Villalobos, E. (2022). Características morfométricas, reproductivas y germinativas del germoplasma de *Swietenia humilis* Zucc. en Guerrero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 13(72):148-172.
- Encina-Domínguez, J. A., Meave, J. A., and Zárate-Lupercio, A. (2013). Structure and woody species diversity of the *Dasylirion cedrosanum* (Nolinaceae) rosette scrub of central and southern Coahuila State, Mexico. *Botanical Sciences*. 91(3): 335-347.
- Flores-Gallegos, A. C., Cruz-Requena, M., Castillo-Reyes, F., Rutiaga-Quiñones, O. M., Torre, L. S., Paredes-Ortíz, A., and Rodríguez-Herrera, R. (2019). Sotol, an alcoholic beverage with rising importance in the worldwide commerce. In *Alcoholic beverages* (pp. 141-160). Woodhead Publishing.
- González-Chavez, J., Arenas-Grimaldo, C., Amaya-Delgado, L., Vázquez-Núñez, E., Suarez-Vázquez, S., Cruz-López, A., and Molina-Guerrero, C. E. (2022). Sotol bagasse (*Dasylirion* sp.) as a novel feedstock to produce bioethanol 2G: Bioprocess design and biomass characterization. *Industrial Crops and Products*. 178: 114571.
- Harley, M. M. and Zavala, M. S. (2000). Pollen of the monocotyledons: selecting characters for cladistic analysis. In K. L. Wilson and D. A. Morrison (Eds.), *Monocotyledons: Systematics and Evolution* (pp. 194-213). Collingwood: CSIRO.

- Hinojosa, L., Matanguihan, J. B., and Murphy, K. M. (2019). Effect of high temperature on pollen morphology, plant growth and seed yield in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Journal of Agronomy and Crop Science*. 205(1): 33-45.
- Jayawardhane, J., Wijesinghe, M. P. S., Bykova, N. V., and Igamberdiev, A. U. (2021). Metabolic Changes in Seed Embryos of Hypoxia-Tolerant Rice and Hypoxia-Sensitive Barley at the Onset of Germination. *Plants*. 10(11): 2456.
- Jura-Morawiec, J., Oskolski, A., and Simpson, P. (2021). Revisiting the anatomy of the monocot cambium, a novel meristem. *Planta*. 254(1): 1-10.
- Macías-Hernández, U. (2015). Perfil del ecoturista que visita el cañón de Amargos, Arteaga y Cañón de San Lorenzo, Saltillo, Coahuila. México. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/6132/T20363%20MACIAS%20HERNANDEZ%2c%20UBALDO%20%2063217.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Fecha de consulta: 2 de junio de 2023.
- Madrid-Solórzano, J. M., García-Alcaraz, J. L. y Valles-Rosales, D. L. (2021). La producción de sotol: revisión de literatura sistemática. *Instituto de Arquitectura Diseño y Arte*. 11: 107-117.
- Orozco-Sifuentes, M. M., García-Martínez, J. E., Arévalo-Sanmiguel, C. A., Ramírez-Godina, F., and Reyes-Valdés, M. H. (2019). Nutritive potential of sotol (*Dasyilirion cedrosanum*) seeds. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 42(4): 385-392.
- Pinales-Quero, I., González-Vázquez, V. M., Castillo-Reyes, F., Aguilar, C. N., Reyes-Valdés, M. H., and Rodríguez-Herrera, R. (2017). Genetic diversity of sotol (*Dasyilirion cedrosanum* Trel.) at different elevations. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 4(11): 201-211.
- Reyes-Bautista, Z. y Rodríguez-Trejo, D. A. (2005). Efecto de la luz, temperatura y tamaño de semillas en la germinación de *Nolina parviflora* (H. B. K.) HEMSL. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 11(2): 99-104.
- Reyes-Valdés, M. H., Benavides-Mendoza, A., Ramírez-Rodríguez, H. y Villarreal-Quintanilla, J. Á. (2013). Biología e importancia del sotol (*Dasyilirion* spp.), Parte II: ecofisiología, usos e interrogantes. *Planta*. 8(17): 16-20.
- Reyes-Valdés, M. H., Hernández-Quintero, J. D., Morales-Reyes, Y. A., Mendoza-Rodríguez, D. V., González-Uribe, D. U., Ramírez-Godina, F., and Villarreal-Quintanilla, J. A. (2017). Sex ratio and spatial distribution of pistillate and staminate plants of *Dasyilirion cedrosanum*. *Phyton*. 86: 171.
- Rivas-Martínez, E. N., Pournavab, R. F., Reyes-Valdés, M. H., and Benavides-Mendoza, A. (2016). GA4 and tZR quantification in pistillate and staminate plants of *Dasyilirion cedrosanum*. *Pakistan Journal of Botany*. 48(3): 1119-1127.
- Simpson, M. G. (2006). *Plant Systematics*. (Vol I). Canada: Elsevier Academic Press. 603 Pp.
- Singh, G. (2019). *Plant systematics: an integrated approach*. Nueva Delhi, India: CRC Press. 550 Pp.
- Tillich, H. J. (2000). Ancestral and derived character states in seedlings of monocotyledons. In K. L. Wilson and D. A. Morrison (Eds.), *Monocotyledons: Systematics and Evolution* (pp. 221-229). Collingwood: CSIRO.
- Valencia, C. G. C., Alcalá, V. M. C., Herrera, C. R., López, M. Á. L., Pérez, G. Á., Martínez, A. E. y Villalobos, E. B. (2022). Características morfométricas, reproductivas y germinativas del germoplasma de *Swietenia humilis* Zucc. en Guerrero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 13(72): 148-172.