

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Evaluación de la Germinación de Semilla de Tres Genotipos de Sotol (*Dasyliirion cedrosanum* Trel.) del Sureste de Coahuila

Por:

DAVID ENRIQUE ALCÁNTARA SALVITANO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Evaluación de la Germinación de Semilla de Tres Genotipos de Sotol (*Dasyilirion cedrosanum* Trel.) del Sureste de Coahuila

Por:

DAVID ENRIQUE ALCÁNTARA SALVITANO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN



Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2024

Declaración de no plagio

El autor principal quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos: Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes. Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Autor principal	Asesor principal
 <u>David Enrique Alcántara Salvitano</u>	 <u>Manuel Humberto Reyes Valdés</u>
Firma y Nombre	Firma y Nombre

DEDICATORIA

Familiares y amigos no están cuando escribes una tesis, pero sería ilógico pensar que no fueron parte de ella, por eso se las dedico:

A mi madre **ROCIO HAYDEE SALVITANO DOMINGUEZ**, quien ha sido mi mayor fuente de inspiración, fortaleza y amor incondicional. por no dejarme rendirme y por ser mi guía y mi pilar en cada paso de este camino.

A mi padre **DAVID ALCÁNTARA ARANDA** tu ausencia aún pesa en mí, pero cuya enseñanza sigue viva en mí. Este logro es un homenaje a tu memoria.

A mis hermanos **DIEGO ISRAEL ALCANTARA SALVITANO, DAMIAN ALEJANDRO SALVITANO DOMINGUEZ Y DIANA LIZETH CARRANZA FRANCO**, mis compañeros de vida. Les doy gracias por estar siempre a mi lado, por compartir risas, momentos difíciles. Este logro también es de ustedes.

A mi abuela **MAURA DOMINGUEZ RETIGUIN** no hay palabras para agradecerte, por tanto, te dedico cada palabra, cada logro, con todo mi amor y gratitud.

A mis tíos **MAYRA YANELLY SALVITANO DOMINGUEZ, SANDRA ITZEL SALVITANO DOMINGUEZ Y JESÚS DAVID HERNÁNDEZ MULATO** por su apoyo, su cariño y por siempre estar presentes en mi vida, por cada palabra de aliento de corazón, muchas gracias.

Para mis primos **JESÚS KALEB HERNÁNDEZ SALVITANO, YUSEF KARIM HERMÁNDEZ SALVITANO** y mi pequeña **DIANA SOFIA AYALA SALVITANO**. Este logro es también para ustedes, espero que, algún día, cada uno de ustedes pueda alcanzar sus sueños, tal como yo.

AGRADECIMIENTOS

Un gran agradecimiento a la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro** que me permitió obtener conocimientos necesarios para poder concluir mis estudios de licenciatura.

Al **Dr. Manuel Humberto Reyes Valdés** por su confianza, disposición, orientación, paciencia, y apoyo para la realización del presente proyecto de investigación.

A la **Dra. Ana Luisa Gómez Espejo** y la **Dra. Adriana Antonio Bautista** quienes forman parte del comité revisor, apoyando con su extenso conocimiento, comentarios, correcciones y observaciones.

A la **LCQ. Dulce Victoria Mendoza Rodríguez** que con su amplia experiencia, conocimientos y calidad me brindó apoyo durante todo el proyecto que se realizó.

A mis **Maestros** que me aportaron día a día de su sabiduría para lograr mi formación, la cual desarrollaré en la vida laboral de la mejor manera posible.

A mis **Amigos**, por su paciencia, por comprender mis momentos de estrés y por brindarme su compañía y ánimo cuando más lo necesité.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	10
Antecedentes	12
Justificación.....	12
Objetivos	13
Hipótesis	13
REVISION DE LITERATURA	14
Descripción morfológica	14
Taxonomía de sotol (<i>Dasyllirion cedrosanum</i> Trel.).....	15
Distribución.....	14
Número de especies	16
Origen del sotol.....	16
Origen evolutivo.....	17
Denominación de origen	17
Colecta y proceso industrial.....	18
Legislación y reforestación con fines de enriquecimiento de <i>D. cedrosanum</i>	20
Germinación de la semilla.....	20
MATERIALES Y MÉTODOS	22
Localización.....	22
Material vegetal	22
Tratamientos	22
Germinación.....	23
Análisis estadístico.....	23
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
Análisis exploratorio.....	25
Análisis de varianza.....	27
CONCLUSIONES	33
ANEXOS	34
LITERATURA CITADA	36

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Especies del género <i>Dasyilirion</i> spp.....	16
Cuadro 2. Familias de medios hermanos de <i>D. cedrosanum</i> evaluadas.....	22
Cuadro 3. Porcentajes de germinación promedio de tres repeticiones de los genotipos en ambientes.....	25
Cuadro 4. Análisis de varianza con modelo lineal factorial de sotol en variable porcentajes de germinación.....	28
Cuadro 5. ANOVA de la regresión binomial.....	29
Cuadro 6. Comparación de medias para tres genotipos de sotol.....	30
Cuadro 7. Prueba de medias de dos ambientes.....	31
Cuadro 8. Pruebas de medias de tres tiempos 1, 30 y 90 días.....	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Dioecia en Sotol.....	14
Figura 2 Distribución de género Dasylirion en México y Estados Unidos de América	15
Figura 3. Proceso de fabricación de Sotol..	19
Figura 4. Porcentajes de germinación de semillas de sotol por población.	26
Figura 5. Porcentajes de germinación de semillas de sotol por ambientes.....	26
Figura 6. Porcentajes de germinación de semillas de sotol por tiempos	27
Figura 7. Porcentaje de germinación de semillas de sotol población y ambientes.....	28
Figura 8. Representación gráfica de los porcentajes de germinación de tres genotipos de sotol	29
Figura 9. Representación gráfica de los porcentajes de germinación de dos ambientes.	30
Figura 10. Representación gráfica de los porcentajes de germinación de tres tiempos de almacenamiento.	31

RESUMEN

Dasyilirion es un género de plantas dioicas perennes de la familia Asparagaceae, distribuidas en regiones áridas y semiáridas del norte de México y suroeste de Estados Unidos. Entre sus especies, *Dasyilirion cedrosanum* Trel. es la más abundante y predominante en el centro-sur de Coahuila y áreas adyacentes de Durango y Zacatecas. Las plantas de este género se conocen comúnmente como sotoles y son utilizadas en diversas aplicaciones, desde usos ornamentales, artesanales, forrajeros hasta la elaboración de una bebida alcohólica llamada Sotol. Esta última, ha incrementado su demanda provocando la sobre extracción de poblaciones silvestres, por ello, existe un creciente interés en establecer plantaciones comerciales. En este sentido, las etapas tempranas de desarrollo como la germinación y la emergencia son claves para definir el establecimiento de la planta en campo. Las semillas de sotol son de cubierta dura y su producción no es constante, por lo que una alternativa para disponer de semilla en años de escasez es el almacenamiento. Sin embargo, existe escasa información sobre el efecto de la temperatura y tiempo de almacenamiento en la viabilidad y capacidad germinativa de la semilla de sotol. Por ello, esta investigación estudia el efecto de diferentes condiciones de almacenamiento (temperatura ambiente y refrigeración) durante períodos variables (1, 30 y 90 días) en la germinación de tres genotipos de *Dasyilirion cedrosanum*. Se observó un efecto significativo tanto de las condiciones de almacenamiento como del tiempo, siendo la temperatura ambiente con 30 días de almacenamiento el tratamiento con mejores porcentajes de germinación. Esta información es valiosa para el establecimiento de plantaciones de sotol, particularmente en lo que respecta a la germinación de las semillas y su conservación.

Palabras clave: Sotol, germinación, recursos genéticos, zonas áridas, viabilidad, almacenamiento, conservación.

INTRODUCCIÓN

El género *Dasyliirion* comprende un tipo de plantas monocotiledóneas, rosetófilas, dioicas, policárpicas y semicilíndricas de la familia Asparagaceae (Francisco-Francisco *et al.*, 2016). Existen 23 especies registradas (Casas-Acevedo *et al.*, 2021) distribuidas en las zonas áridas y semiáridas de Norteamérica, desde el sur de los Estados Unidos hasta Oaxaca, siendo Coahuila el estado que reúne la mayor población natural de sotol con aproximadamente 6 o 7 especies (Reyes-Valdés *et al.*, 2012).

A través de la historia, se han documentado diversos usos de las plantas de sotol entre los que destacan la elaboración de una bebida alcohólica denominada Sotol (Gardea *et al.*, 2012). Otras aplicaciones como fibra (Bell & Castetter, 1941), material de construcción, forraje, elaboración de papel (Reyes-Valdés *et al.*, 2012), artesanías y adornos religiosos (Haeckel, 2008). Recientemente, se han estudiado sus propiedades como alimento humano (Orozco-Sifuentes *et al.*, 2019). También, existen registros de que los antiguos pobladores del desierto consumían el tallo o “piña” del sotol al ser cocinado en un pozo con rocas calientes (Poinar *et al.*, 2001).

El sotol cumple importantes funciones en procesos edáficos e hidrológicos, ya que posee un sistema radicular expansivo con raíces fibrosas densas en la superficie y raíces profundas bien desarrolladas que proporcionan apoyo mecánico estructural a los suelos (Torres-Guerrero *et al.*, 2013). Por otro lado, su caudex leñoso le proporciona la capacidad de almacenar agua y alcanzar su pico de biomasa durante los meses más cálidos (Fay, 2009). También proporciona abrigo y alimento a la vida silvestre y es parte del patrimonio genético de México y sur de los Estados Unidos (Villa Castorena *et al.*, 2012).

El ciclo de vida de las plantas de Sotol es variable, ya que se desconoce la longevidad promedio de la planta, sin embargo se estima que algunas plantas cultivadas en invernadero pueden vivir más de 150 años (López Barboza, 2005). El desarrollo de la inflorescencia de Sotol conocida como escapo o garrocha sucede alrededor de los 12 a 15 años desde su emergencia, y su morfología se caracteriza por ser una estructura muy alta (Benavides-Mendoza *et al.*, 2023). Una vez que sucede la primera floración,

las plantas continúan vivas, repitiendo dicho proceso varias veces durante su ciclo de vida. No obstante, se ha observado que la floración no ocurre todos los años, ya que los factores climáticos, mayormente la precipitación, interfieren en su ocurrencia (Reyes-Valdés *et al.*, 2012).

Las semillas de Sotol son trigonas de cubierta dura, de un color café oro, y con una superficie más o menos plana y rugosa (Cruz López, 2011). De acuerdo con Madrid-Solórzano *et al.* 2021, se han documentado dos tipos de tratamientos pre-germinativos para la propagación de sotol bajo condiciones de laboratorio-invernadero. El primero, implica la extracción de semillas de poblaciones naturales; y enseguida, se realizan los pasos de escarificación física y química; y el segundo con la germinación *in vitro* que reporta un 100% de efectividad.

El proceso de germinación de semilla de sotol en laboratorio sometiéndola a un proceso de escarificación, buena iluminación y disponibilidad de humedad lleva cerca de 20 días, con porcentajes de germinación superiores al 90 % (Francisco-Francisco *et al.*, 2016). En condiciones naturales, las brácteas de las semillas retrasan la germinación algunos meses hasta la temporada de lluvias (Rodríguez Trejo *et al.*, 2019).

La producción de semillas en la planta de sotol no es constante, por lo que es necesario contar con una reserva en la cantidad y calidad necesarias, esto requiere del adecuado almacenamiento de las semillas colectadas para conservar su capacidad germinativa (Cano Pineda *et al.*, 2011). En este sentido, existe escasa información sobre el efecto de la temperatura y tiempo de almacenamiento sobre la viabilidad y capacidad germinativa de la semilla (Rodríguez Trejo *et al.*, 2019). Dicha información sería de mucha utilidad, ya que las etapas tempranas de desarrollo como la germinación y la emergencia son claves para definir el establecimiento de la planta en campo. Así mismo, porque los intentos de reforestación han tenido resultados negativos debido a que las plántulas presentan bajos porcentaje de sobrevivencia por falta de humedad, daños por lagomorfos y el pastoreo por ganado bovino (Madrid-Solórzano *et al.*, 2021).

Antecedentes

Los pobladores nativos de la región árida y semiárida de México y sur de Estados Unidos donde crece el sotol, han sabido aprovechar dicha planta para satisfacer distintas necesidades. Sin embargo, su uso es preferencial para la fabricación de la bebida alcohólica “sotol”, cuya producción es regulada bajo la NOM-159-SCFI-2004. Por otro lado, otra situación que ha incrementado su elaboración es la aprobación de la Denominación de Origen en el año 2002 para los estados de Chihuahua, Coahuila y Durango (Gardea *et al.*, 2012).

En el año 2005 las ventas de Sotol fueron de aproximadamente 19.5 millones de pesos y para el año 2008 se incrementaron en 300 %, con un ventas estimadas de 58.2 millones de pesos (Olivas-García *et al.*, 2010). Actualmente, el Consejo Certificador del Sotol (CCS) constituido en el 2018, estima que se producen alrededor de 520,000 litros anuales de sotol en los tres estados, cuyo producto se dirige principalmente al mercado internacional (Madrid-Solórzano *et al.*, 2021).

La materia prima para la elaboración de la bebida proviene de poblaciones silvestres, lo que genera la sobreexplotación de la especie, y la disminución peligrosa de las poblaciones naturales (Becerra-López *et al.*, 2020). En este sentido, existe un creciente interés de investigadores y productores de encontrar nuevas técnicas de conservación del stock genético, y a su vez hacer uso sostenible de los mismos con el establecimiento de plantaciones comerciales de Sotol (Cano Pineda *et al.*, 2011). Sin embargo, el principal problema radica en la falta de información del comportamiento de la especie como cultivo, por lo que dichas plantaciones deben ser planeadas y evaluadas en su rendimiento y rentabilidad, antes de implementar un programa en grandes extensiones (Villavicencio Gutiérrez *et al.*, 2007).

Justificación

La demanda de la planta por los productores de sotol está en constante crecimiento, ya que la bebida alcohólica va teniendo cada vez más popularidad dentro y fuera de México (Molly Mandell, 2019; Ventas, 2022). El problema surge porque la materia

prima para la elaboración de este producto se encuentra de manera silvestre y se extrae en grandes cantidades para usar su tallo o “piña”. Lo que ocasiona la sobre explotación de la especie, poniendo en peligro el acervo genético (Villa Castorena *et al.*, 2012).

De los temas fundamentales que se deben abordar para que sea factible el establecimiento de plantaciones con fines productivos son la germinación de la semilla y el crecimiento temprano en invernadero. Por lo que respecta a la germinación de la semilla, es importante conocer el efecto del tiempo después de su recolección y las condiciones de almacenamiento sobre la capacidad de germinación.

Objetivo general

Evaluar los patrones de germinación en la semilla de sotol (*Dasyllirion cedrosanum* Trel.).

Objetivos específicos

- Estudiar los patrones de germinación de la semilla del sotol con diferentes genotipos, a diferentes tiempos después de cosecha de semilla, y en diferentes condiciones de almacenamiento.
- Identificar las condiciones óptimas de extracción y almacenamiento de semillas de Sotol en tres genotipos de *Dasyllirion cedrosanum*.

Hipótesis

- La semilla refrigerada germinará mejor que la almacenada en temperatura ambiente.
- La semilla presenta latencia y requiere de almacenamiento durante un periodo después de la cosecha para su germinación.
- Se encontrarán diferencias en capacidad de germinación entre genotipos.

REVISION DE LITERATURA

Descripción morfológica

El sotol es una planta perenne, dioica, policárpica, semisuculenta y semicilíndrica que pertenece a la familia Asparagaceae (Francisco-Francisco *et al.*, 2016). La planta es de tallo corto y parcialmente subterráneo, cuyos sexos al desarrollarse se aprecian por el escapo floral (Figura 1C). Las hojas son de color verde, lineales con terminación en punta con espinas en sus bordes, se encuentran situadas sobre el tallo principal en roseta. Las flores son de tamaño pequeño agrupadas en una inflorescencia, su forma varía dependiendo el sexo de la planta (Figura 1A y B). El fruto es una capsula de tres alas en cuyo interior tiene una semilla angulosa (Villa Castorena *et al.*, 2012).

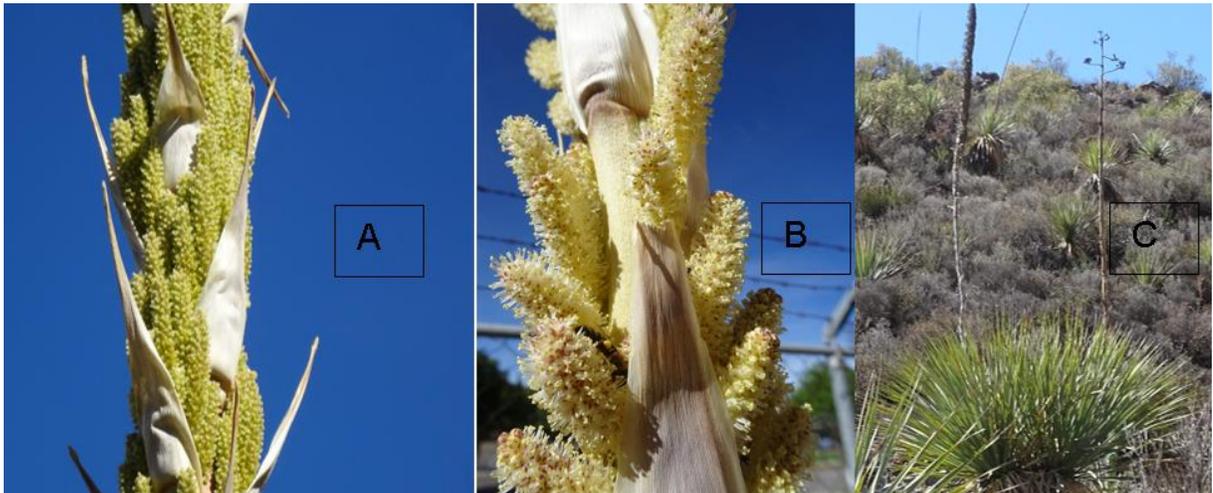


Figura 1. Dioecia en Sotol. A) Flores pistiladas (hembras). B) Flores estaminadas (machos). C) Planta con escapo floral. Fotografías de Humberto Reyes-Valdés.

Distribución

El género *Dasyilirion* se distribuye en México y sur de los Estados Unidos. La especie *Dasyilirion cedrosanum* Trel. se encuentra principalmente en Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí.



Figura 2. Distribución de género *Dasyilirion* en México y Estados Unidos de América
Mapa tomado de la página Plants of the World Online (POWO, 2024).

Taxonomía de sotol (*Dasyilirion cedrosanum* Trel.)

- Reino Plantae
 - Filo Estreptofita
 - Clase Equisetidae
 - Subclase Magnoliidae
 - Orden Asparagales
 - Familia Asparagaceae
 - Género *Dasyilirion*

Información obtenida de la página iNaturalistMX (2024).

Número de especies

Se reconocen 23 especies del género *Dasyilirion* (Cuadro 1), cuya lista se puede consultar en la plataforma de Plants of the World Online (POWO, 2024).

Cuadro 1. Especies del género *Dasyilirion* spp.

- *Dasyilirion acrotrichum* (Schiede) Zucc.
- *Dasyilirion berlandieri* S. Watson
- *Dasyilirion cedrosanum* Trel.
- *Dasyilirion durangense* Trel.
- *Dasyilirion gentryi* Bogler
- *Dasyilirion glaucophyllum* Hook.
- *Dasyilirion graminifolium* (Zucc.) Zucc.
- *Dasyilirion leiophyllum* Engelm. ex Trel.
- *Dasyilirion longissimum* Lem.
- *Dasyilirion longistylum* J.F.Macbr.
- *Dasyilirion lucidum* Rose
- *Dasyilirion micropterum* Villarreal, A.E. Estrada & Encina
- *Dasyilirion miquihuanense* Bogler
- *Dasyilirion occidentalis* Bogler ex Hochstätter
- *Dasyilirion palaciosii* Rzed.
- *Dasyilirion parryanum* Trel.
- *Dasyilirion quadrangulatum* S. Watson
- *Dasyilirion sereke* Bogler
- *Dasyilirion serratifolium* (Karw. Ex Schult. & Schult.f.) Zucc.
- *Dasyilirion simplex* Trel.
- *Dasyilirion texanum* Scheele
- *Dasyilirion treleasei* (Bogler) Hochstätter
- *Dasyilirion wheeleru* S. Watson ex Rothr.

Origen del sotol

En Aridoamérica el sotol fue parte importante de la dieta humana durante la prehistoria, ya que estudios paleontológicos en la región arqueológica del Bajo Pecos (secciones

del desierto ubicadas en Estados Unidos) revelaron que antiguos pobladores que vivieron hace 10,000 años basaban su alimentación en especies del desierto. Los análisis realizados a heces humanas disecadas (coprolitos) revelaron fragmentos no digeridos y restos de ADN de suculentas del desierto como *Agave lechuguilla* (agave), *Dasyliirion sp.* (sotol) y *Opuntia sp.* (tuna), junto con *Allium drummondii* (cebolla), *Yucca sp.* (yuca) y *Prosopis sp.* (mezquite) (Leach & Sobolik, 2010). Es muy probable que también hayan aprovechado las diferentes semillas para su propia alimentación y la de sus aves domésticas, pues se encontraron restos fósiles de bellotas, nueces, bayas y semillas de pasto y sotol (Melgoza Castillo & Sierra Tristán, 2003; Webb, 2001).

Origen evolutivo

El género *Dasyliirion* está representado en las regiones áridas y semiáridas de México y Estados Unidos, por lo que conocer los patrones evolutivos de este género ayudaría a lograr una mejor comprensión de los fenómenos biológicos que originaron el género y la descripción de estrategias para su conservación y aprovechamiento.

Un análisis filogenético molecular realizado por (Ortiz-Covarrubias *et al.*, (2022), basado en secuenciación de genes del cloroplasto *matK* (maturasa-K) y *rbcL* (ribulosa-1,5-bifosfato carboxilasa) en 11 especies del género, estimo que el género *Dasyliirion* apareció hace más de 5,46 millones de años. Estos hallazgos son consistentes con otras hipótesis de origen y diversificación de *Asparagaceae* de zonas áridas en México (Zuntini *et al.*, 2024).

Denominación de origen

La NOM-159-SCFI-2004, Bebidas alcohólicas, Sotol-Especificaciones y Métodos de Prueba, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 16 de junio de 2004, establece la denominación de origen del sotol en los estados de Durango, Chihuahua y Coahuila. Esta Norma Oficial Mexicana se aplica a todos los procesos y actividades relacionados con la producción, envase, comercialización y prácticas comerciales vinculadas a la bebida alcohólica de Sotol (NOM-159-SCFI-2004, 2004). Dicha bebida debe ser elaborada con las plantas de sotol exclusivamente, que pertenecen al

género *Dasyilirion spp.*, excepto las especies que se encuentren bajo Status, las plantas deberán ser obtenidas de poblaciones naturales o cultivadas en la zona de denominación de origen comprendidas en la declaración.

Colecta y proceso industrial

La producción del licor de Sotol únicamente es regulada y vigilada por el Consejo Mexicano del Sotol A.C. (CMS), el Consejo Certificador del Sotol (CCS), así como la NOM-159-SCFI-2004. Sin embargo, existe una falta de estandarización y control de los procesos en la fermentación de la bebida, ya que en algunos casos es artesanal y en otros industriales, así como en el tipo de especie del género *Dasyilirion* apto para garantizar el sabor y aroma apegados a la tradición histórica. En este sentido, se han identificado tres especies idóneas para la fabricación de la bebida, las cuales son *D. cedrosanum* Trel., *D. leiophyllum* y *D. duranguesis* caracterizadas por generar un alto contenido de carbohidratos en la etapa de fermentación (Madrid-Solórzano *et al.*, 2021).

El corte de la planta se realiza comúnmente con hacha durante todo el año; sin embargo, es recomendable hacerlo durante el otoño, ya que en dicha estación las plantas tienen mejores cualidades para su industrialización, para lo cual, deben usarse las plantas a no más de 24 horas de su corte (Olhagaray Rivera, 1994; Olivas N. & Rivera Q., 1984).

Los recolectores seleccionan individuos cuya altura varía entre 1.5 y 2 m, pero se prefiere aquellos que en conjunto ofrezcan cierta uniformidad. Las cabezas de sotol o piñas para la obtención del licor se seleccionan por su peso, que debe ser de entre 10 y 12 kg en Durango y Chihuahua, y superiores a 30 kg en Coahuila (Olivas N. & Rivera Q., 1984). El proceso de obtención del licor lleva de 12 a 15 días y para producir un litro de sotol se requieren tres piñas o cabezas, por lo que para conseguir producir 150 litros se cuecen aproximadamente 300 piezas por cada sesión o “quemada” (Olhagaray Rivera *et al.*, 2004).

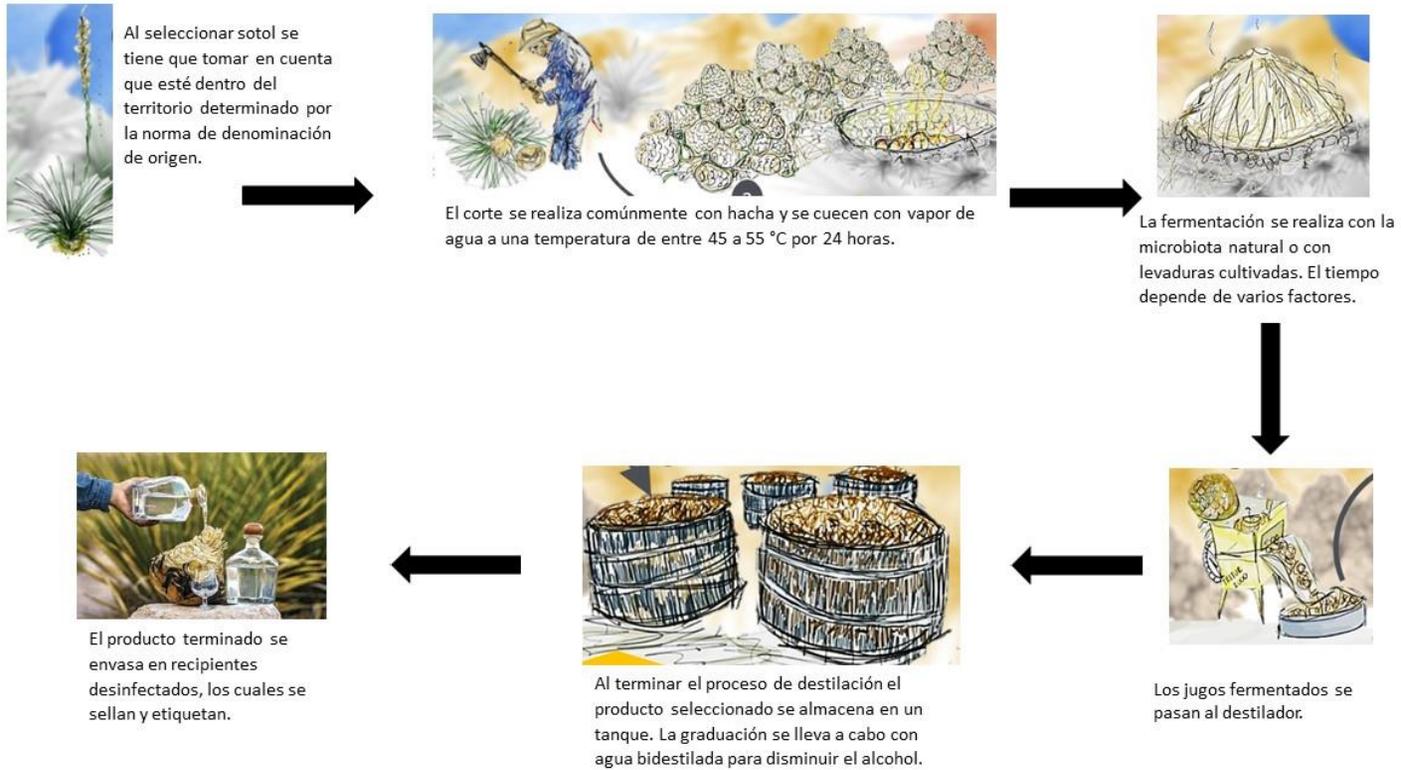


Figura 3. Proceso de fabricación de Sotol, imágenes tomadas de sitio web de Destiladora la Tradición de la Familia (2024).

Legislación y reforestación con fines de aprovechamiento de *D. cedrosanum*

El aprovechamiento forestal no maderable de *Dasyliirion cedrosanum* Trel. es regulado por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), para lo cual se requiere del llenado de un formulario con información del propietario y, en su caso, el número de autorización ambiental (López Serrano *et al.*, 2021).

La reforestación de *Dasyliirion cedrosanum* Trel. comprende de la realización de las siguientes prácticas:

1. **Selección de materiales:** Utilizar semillas de los mejores individuos.
2. **Preparación del terreno:** Adecuar el terreno, creando una forma donde la captación de agua le favorezca.
3. **Densidad de reforestación:** Plantar a 1.5 metros de distancia, con un mínimo de 4500 plantas por hectárea.
4. **Establecimiento:** Hacer terrazas individuales y regar después de la siembra.
5. **Labor Cultural:** Realizar análisis de suelo para nutrirla con los elementos que necesite, y tener en cuenta dos riesgos durante el año.
6. **Control de plagas:** Vigilar contantemente para prevenir enfermedades y plagas.
7. **Mantenimiento:** Reponer plantas en los primeros años y realizar trabajos culturales para mantener la salud de la reforestación.

Germinación de la semilla

El proceso de germinación implica varios procesos metabólicos y morfo-genéticos, en el cual tienen especial influencia algunos factores como la viabilidad del embrión, el grosor de la testa, la disponibilidad de agua, la temperatura y la luz. La germinación se desarrolla en diversas etapas: inicia con la absorción de agua (imbibición) para activar el metabolismo, la síntesis de proteínas y la movilización de las sustancias de reserva, lo que lleva a la elongación del embrión y la ruptura de la testa para que emerja la radícula (Russo *et al.*, 2010).

Calderón Gómez (2004) señala que las semillas de *D. cedrosanum* presentan una baja tasa de germinación debido a que poseen una envoltura dura que complica la absorción de agua, sin embargo, esto no implica que sea impermeable al agua ni que tenga algún tipo de latencia física. El proceso de germinación en laboratorio lleva cerca de 20 días, y se han reportado altos porcentajes de germinación en *D. cedrosanum* (>90%), aún sin el proceso de escarificación (Cruz López, 2011), claro está en presencia de buena iluminación y disponibilidad de humedad en el sustrato (Francisco-Francisco et al., 2016). En condiciones naturales, las brácteas de las semillas retrasan la germinación algunos meses hasta la temporada de lluvias (Sierra Tristán *et al.*, 2008).

Con base a las leyes de Harrington, se dice que mantener una semilla en un ambiente refrigerado será mejor que una que se conserva en temperatura ambiente ya que la longevidad de las semillas se va a duplicar por cada porcentaje que se baje la temperatura interna así mismo por cada 5 grados centígrados menos en el lugar de su almacenamiento (Antonio-Bautista, 2020). En este sentido, el almacenamiento adecuado debe proveer las condiciones para evitar daños y afectaciones en la calidad de la semilla, así como la presencia de plagas e impurezas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Análisis de Genomas del Departamento de Fitomejoramiento, en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Buenavista, Saltillo, Coahuila.

Material vegetal

Las semillas de la especie *D. cedrosanum* utilizadas en el estudio de germinación tienen su origen en San Martín de las Vacas, municipio de Ramos Arizpe, Coahuila. Se probaron tres genotipos representados por familias de medios hermanos (FMH) denominadas SV1, SV2 y SV3.

Tratamientos

Las semillas de cada FMH se almacenaron en tres tiempos: 1, 30 y 90 días, y dos ambientes: a) Temperatura ambiente dentro del laboratorio y b) Refrigeración. Las semillas se extrajeron manualmente de sus cápsulas y se guardaron en frascos herméticos de vidrio, algunos frascos serían expuestos a temperatura ambiente y otros dentro de un refrigerador a 8 °C. Los tratamientos consistieron de las combinaciones de genotipos (SV1, SV2 y SV3), tiempo de almacenamiento (1, 30 y 90 días) y ambiente (ambiente y refrigeración) con tres repeticiones cada uno (Cuadro 2).

Cuadro 2. Familias de medios hermanos de *D. cedrosanum* evaluadas.

Tratamientos	Genotipo	Tiempo	Ambiente
1	SV1	1	A
2	SV1	1	R
3	SV1	30	A
4	SV1	30	R
5	SV1	90	A
6	SV1	90	R
7	SV2	1	A
8	SV2	1	R

Cuadro 3. Continuación.

Tratamientos	Genotipo	Tiempo	Ambiente
9	SV2	30	A
10	SV2	30	R
11	SV2	90	A
12	SV2	90	R
13	SV3	1	A
14	SV3	1	R
15	SV3	30	A
16	SV3	30	R
17	SV3	90	A
18	SV3	90	R

Germinación

El experimento de germinación consistió en un arreglo factorial completamente al azar con tres repeticiones por tratamiento. Cada repetición consistió de 20 semillas colocadas en cajas Petri con papel filtro Whatman No. 41, el cual se mantuvo húmedo, con riegos periódicos de agua destilada cada tres días durante el curso del experimento. La duración de cada experimento fue de 20 días.

Las semillas de cada tratamiento fueron aleatoriamente elegidas de cada frasco para posteriormente realizar un lavado de la misma con alcohol etílico al 70% durante un minuto, luego en hipoclorito al 2% durante 15 minutos y para finalizar dos enjuagues con agua destilada durante un minuto cada uno.

La siembra de la semilla se realizó con el papel filtro previamente humedecido con agua destilada, una vez sembradas las semillas en sus respectivas cajas Petri, estas fueron colocadas en una cámara de crecimiento a una temperatura de 25 a 27 °C. La germinación se evaluó periódicamente, registrando el número de semillas con radículas emergidas por caja Petri.

Análisis estadístico

Los datos de germinación fueron analizados con el lenguaje y ambiente estadístico R (R Core Team, 2023). Se realizaron análisis exploratorios con diagramas de cajas, y

análisis de varianza con modelo lineal factorial, bajo el arreglo completamente al azar. Cuyo modelo estadístico fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu_T + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta_{ij}) + \varepsilon_{ijk}$$

donde:

μ_T = efecto de la media global; α_i = promedio del efecto del tratamiento en el nivel a_i ($\alpha_i = \mu_i - \mu_T$); β_j = Promedio del efecto del tratamiento en el nivel b_j ($\beta_j = \mu_j - \mu_T$); $(\alpha\beta_{ij})$ = Efecto de la interacción en la celda $a_i b_j$ ($(\alpha\beta)_{ij} = \mu_{ij} - \mu_i - \mu_j - \mu_T$), y ε_{ij} = error experimental asociado a cada puntuación ($\varepsilon_{ij} = Y_{ijk} - \mu_{ij}$).

Adicionalmente, se procedió a una regresión binomial y comparaciones múltiples de medias Tukey con dicho modelo. El modelo de regresión binomial permite evaluar el efecto de un conjunto de variables independientes o explicativas en una variable de respuesta de distribución binomial, como lo es el número de semillas germinadas (Y) que es una fracción del total de semillas sembradas (m) y, por lo tanto, siguen una distribución binomial con parámetros (π, m) . El modelo de regresión logística binaria permite relacionar la probabilidad de éxito de un evento (π), dado un vector de variables de regresión mediante el siguiente modelo lineal (Pece *et al.*, 2012):

$$\ln\left(\frac{\pi_i}{1 - \pi_i}\right) = \sum_{j=1}^p \beta_j X_{ij}$$

En este modelo π_i es la probabilidad de éxito de la variable binomial dependiente Y_i que toma valores como 0, 1, 5, 67, etc., la cual es sometida a las condiciones X_{i1}, \dots, X_{ip} . Las variables X_{ij} pueden corresponder tanto a variables continuas como a factores (variables categóricas). Por ejemplo, se podría utilizar el modelo de regresión binomial para predecir las probabilidades de germinación de la semilla de sotol, por el ambiente, genotipo y tiempo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis exploratorio

Los porcentajes de semillas que emergieron por tratamiento, según las semanas transcurridas desde la siembra se presentan en el Cuadro 3. Se observan los mayores porcentajes en el genotipo SV1, independientemente de los tiempos de almacenamiento y el ambiente. Esta misma tendencia se observa claramente en la Figura 4, donde se presentan las medias de germinación por genotipo en diagramas de cajas. El porcentaje mayor se observó para SV1, con un promedio de 92.5 %, mientras que para SV2 se obtuvo un 73.9 % y para SV3 un 67.8 %. La figura muestra también la presencia de algunos datos atípicos en los genotipos SV1 y SV2. Estos resultados muestran la existencia de variabilidad genética para germinación dentro de la FMH de la que provienen los genotipos evaluados.

Cuadro 4. Porcentajes de germinación promedio de tres repeticiones de los genotipos SV1, SV2 y SV3 en ambiente (R) Refrigerado y (A) Ambiente en diferentes días 1,30 y 90.

Tratamientos	Genotipo	Tiempo	Ambiente	Semillas germinadas.	Germinación (%)
1	SV1	1	A	20	100
2	SV1	1	R	20	100
3	SV1	30	A	20	100
4	SV1	30	R	20	100
5	SV1	90	A	19	95
6	SV1	90	R	12	60
7	SV2	1	A	17	85
8	SV2	1	R	13	67
9	SV2	30	A	17	87
10	SV2	30	R	12	60
11	SV2	90	A	13	67
12	SV2	90	R	16	78
13	SV3	1	A	14	72
14	SV3	1	R	11	55
15	SV3	30	A	16	80
16	SV3	30	R	15	75
17	SV3	90	A	19	93
18	SV3	90	R	6	32

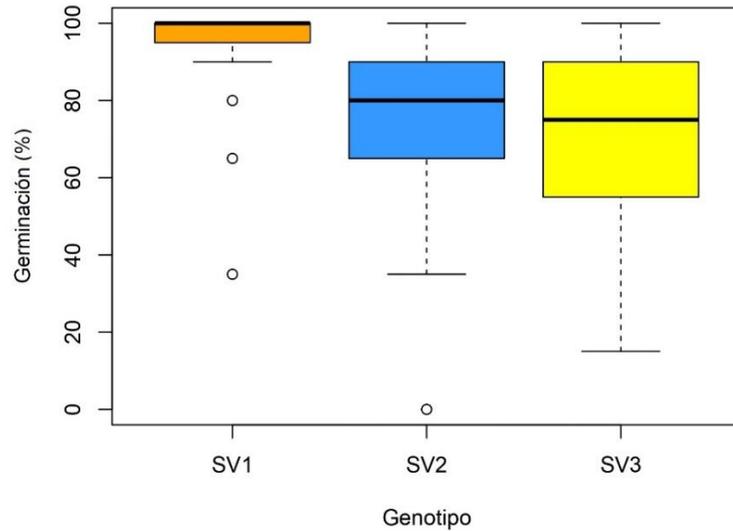


Figura 4. Porcentajes de germinación de semillas de sotol por genotipo provenientes de San Martín de las Vacas (SV), Ramos Arizpe, Coahuila.

En la Figura 5 se observan los porcentajes de germinación para cada ambiente mediante un diagrama de cajas. El porcentaje mayor se registró para la temperatura ambiente (A) con un 86.5 %, mientras que para el ambiente en refrigeración se obtuvo un 69.6 %.

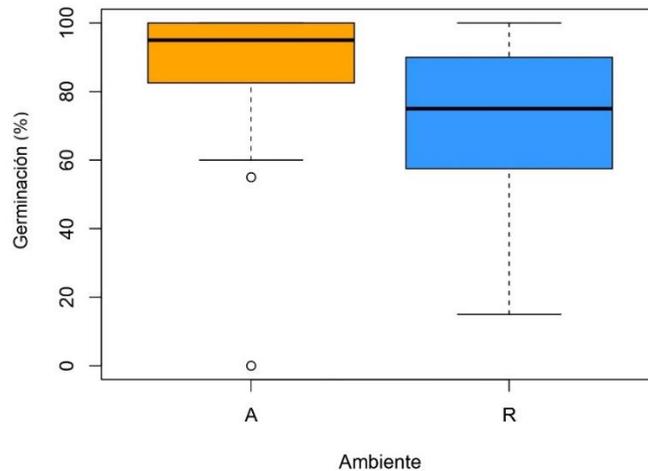


Figura 5. Porcentajes de germinación de semillas de sotol almacenadas a temperatura ambiente (A) 18-26 y Refrigeración a 8 °C (R).

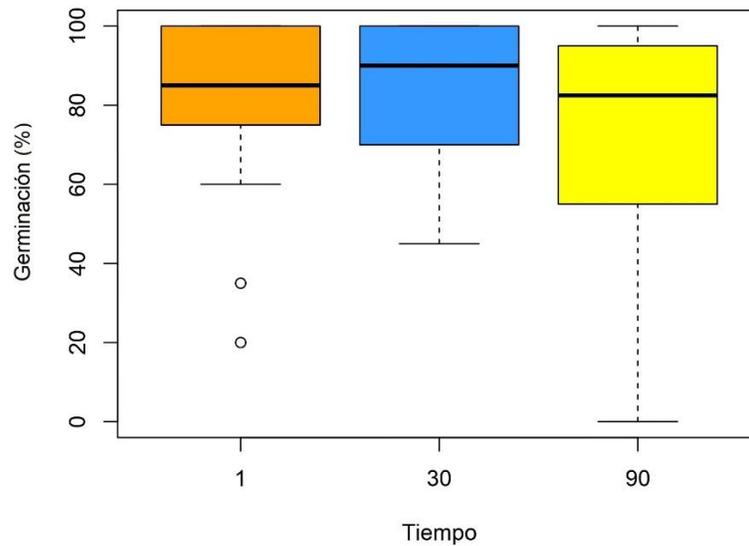


Figura 6. Porcentajes de germinación de semillas de sotol conservadas a 1 día, 30 días, 90 días.

En la Figura 6 se observa el porcentaje de germinación considerando tres tiempos de almacenamiento, en la cual el tiempo de almacenamiento de 30 días presento los mayores porcentajes de semillas germinadas con un 83.6 %. En el tiempo 1 se obtuvo un 79.7 %, mientras que en el almacenaje de 90 días se obtuvo el más bajo porcentaje con 70.8%.

Interacción genotipo y ambiente de almacenamiento

En la Figura 10 se comparan las combinaciones de genotipo y ambiente de almacenamiento para porcentaje de germinación de semillas. El mejor comportamiento de germinación se observa para la combinación SV1 y temperatura ambiente. Por otro lado, la peor combinación parece ser el genotipo SV3 en refrigeración.

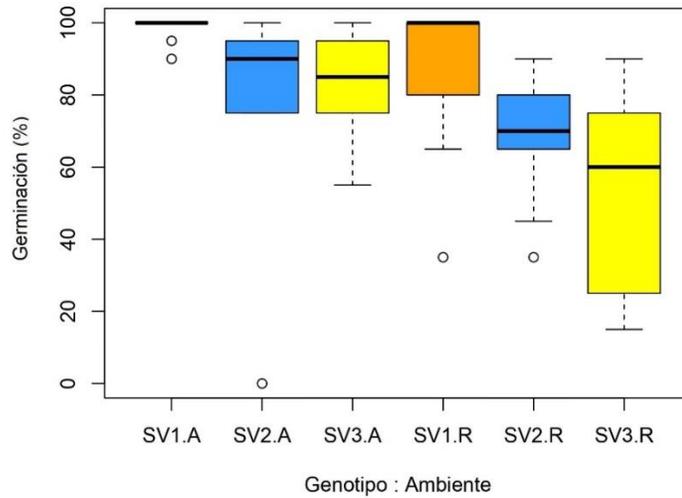


Figura 7. Porcentaje de germinación de semillas de sotol provenientes de San Martín de las Vacas (SV), Coahuila, almacenadas temperatura Ambiente (A) 18-26°C y Refrigeración (R) 8°C.

Análisis de varianza

El análisis de varianza con modelo lineal factorial detectó diferencias estadísticas altamente significativas entre los genotipos (0.01) y los ambientes (0.01). Por el contrario, no se detectaron diferencias significativas para el factor tiempo (Cuadro 4).

Cuadro 5. Análisis de varianza con modelo lineal factorial de sotol en variable porcentajes de germinación.

FV	GL	SC	CM	F Calculada	Pr(>F)
Genotipo	2	5969.4	2984.7	6.3892	0.003466**
Ambiente	1	3833.8	3833.8	8.2068	0.006174**
Tiempo	2	1544.4	772.2	1.6531	0.202177
Residual	48	22423.1	467.1		

** = significativo al punto 0.01 de probabilidad; fuentes de variación (FV); grados de libertad (GL); suma de cuadrados (SC); cuadrados medios (CM); coeficiente de variación; y Probabilidad de F (Pr(>F)).

Al analizar la variable de respuesta de semillas germinadas por cada muestra con un modelo de respuesta binomial se observaron diferencias altamente significativas (0.001) entre todos los factores (Cuadro 5).

Cuadro 6. ANOVA de la regresión binomial.

Factor	GL	RD	P(>Chi)
Genotipo	51	338.71	2.2e-16 ***
Ambiente	50	289.83	2.721e-12 ***
Tiempo	48	269.70	4.263e-05 ***

*** = significativo al punto 0.001 de probabilidad; grados de libertad (GL); Residuales de la devianza (RD); y probabilidad de Chi-cuadrada. (P(>Chi)).

La prueba de medias Tukey con el factor de genotipos (Figura 7 y Cuadro 6), muestra que el genotipo SV1 presenta los mejores porcentajes de semillas germinadas y es significativamente diferente a los genotipos SV2 y SV3, entre los cuales no hay diferencia estadística.

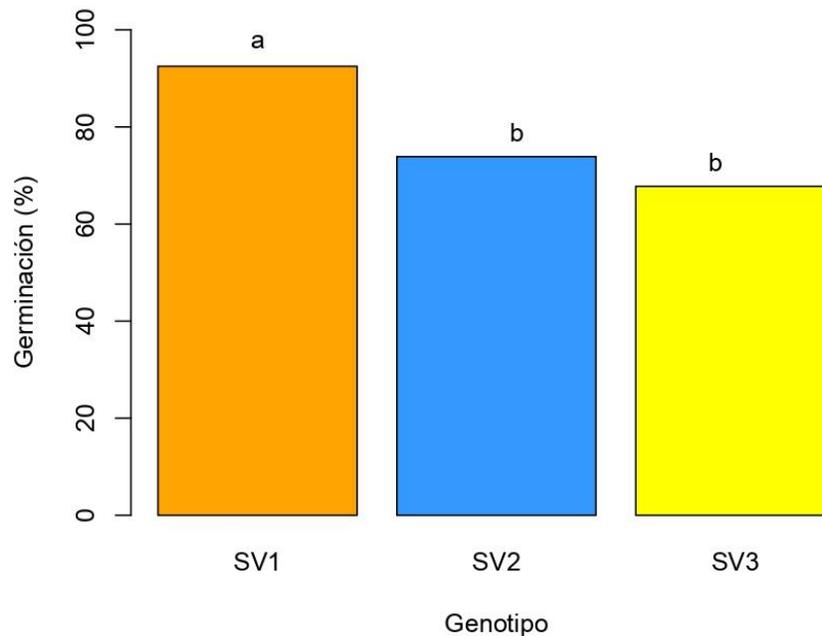


Figura 8. Representación gráfica de los porcentajes de germinación de tres genotipos de sotol provenientes de San Martín de las Vacas (SV), Ramos Arizpe, Coahuila. Las letras en las barras representan la agrupación de Tukey. Genotipos con letras iguales no tienen diferencias significativas.

Cuadro 7. Comparación de medias para tres genotipos de sotol provenientes de San Martín de las Vacas (SV), Ramos Arizpe, Coahuila.

Genotipo	Germinadas	Germinación (%)	Grupos
SV1	18.5	92.5	a
SV2	14.7	73.8	b
SV3	13.5	67.7	b

La prueba de medias Tukey para el factor de genotipos, se observa que el genotipo SV1 presenta los mejores porcentajes de semillas germinadas y es significativamente diferente a los genotipos SV2 y SV3, entre los cuales no hay diferencia estadística.

En la Figura 8 y Cuadro 7 se muestra la comparación de Tukey para medias de ambientes. Se observa que las semillas almacenadas a temperatura ambiente presentaron los mayores porcentajes de germinación en comparación con el almacenamiento en refrigeración, con diferencias significativas entre ellos.

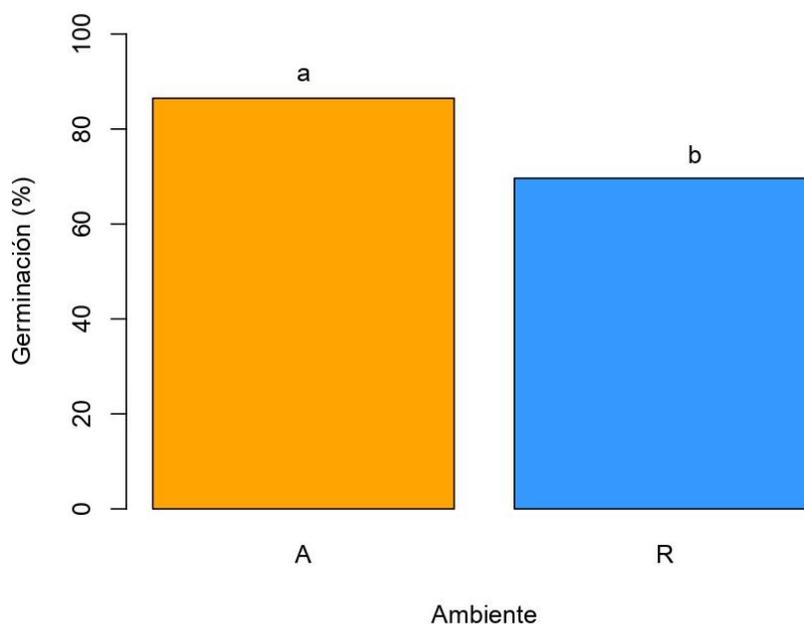


Figura 9. Representación gráfica de los porcentajes de germinación de dos ambientes, temperatura ambiente (A) 18-26 °C y ambiente de refrigeración (R) 8 °C. Las letras en las barras representan la agrupación de Tukey.

Cuadro 8. Prueba de medias de dos ambientes, temperatura ambiente (A) 18-26°C y refrigeración 8°C.

Ambiente	Germinadas	Germinación (%)	Grupos
A	17.2	86.4	a
R	13.9	69.6	b

En la Figura 9 y Cuadro 8 Se muestra la comparación de Tukey para medias de tiempos de almacenamiento. Se observa que las semillas almacenadas durante 1 y 30 días no presentan diferencias en cuanto al número de semillas germinadas, con porcentajes de 79.7 y 83.6 %, respectivamente. Por el contrario, el almacenamiento durante 90 es estadísticamente diferente menores tiempo, sin embargo, resultado desfavorable en cuanto a la germinación de la semilla, ya que se presentaron los menores porcentajes con 70.8 %.

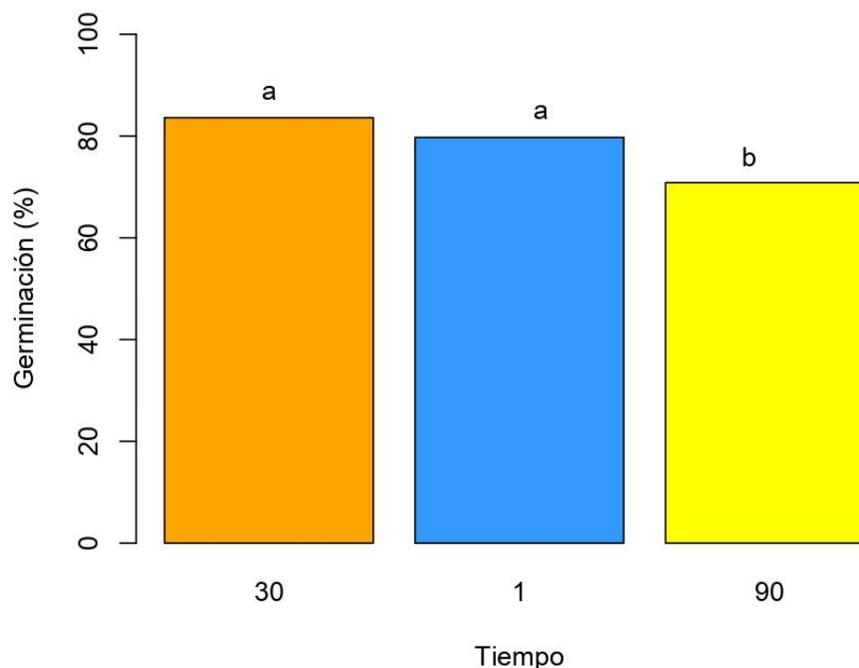


Figura 10. Representación gráfica de los porcentajes de germinación de tres tiempos de almacenamiento. Las letras en las barras representan la agrupación de Tukey, letras diferentes tienen diferencias significativas entre grupos.

Cuadro 9. Pruebas de medias de tres tiempos 1, 30 y 90 días.

Tiempo	Germinadas	Germinación (%)	Grupos
30	16.7	83.6	a
1	15.9	79.7	a
90	14.1	70.8	b

Los resultados encontrados expresan el efecto significativo de las condiciones de almacenamiento sobre la germinación y viabilidad de las semillas de *Dasyilirion cedrosanum*, particularmente el efecto negativo del almacenamiento prolongado en condiciones de refrigeración, esto es coincidente con lo descrito por Baskin & Baskin, (2000) que mencionan que en semillas recalcitrantes la capacidad germinativa declina más rápido que en las ortodoxas, y que eventualmente esta reducción es influenciada conforme la semilla permanece almacenada por más tiempo. Por otro lado, Afzal *et al.*, (2020) consideran 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. Dentro de los factores importantes de Humedad Relativa del ambiente y en segundo la temperatura. Las condiciones óptimas de almacenamiento para semillas ortodoxas son frías y secas es caso de las semillas de sotol. La temperatura del almacenamiento del experimento fue de 8 grados el cual alcanza entre 85 y 90% de humedad relativa. Con ello se cumple uno de los preceptos de almacenamiento.

En este sentido, Rodríguez Trejo *et al.*, (2019), documenta la posible existencia de latencia física como química en la especie *Dasyilirion lucidum* que en condiciones naturales tiene la función de evitar la germinación hasta que las condiciones ambientales sean óptimas. Cabe mencionar que la germinación en época de lluvias es una estrategia adaptativa común en plantas del desierto (Baker, 1989). Por lo que, la latencia química provocada por sustancias inhibidoras de la germinación presentes en las brácteas de las semillas de *Dasyilirion cedrosanum*, pueden ser sensibles al efecto de la temperatura. En nuestro caso, el almacenaje a temperatura ambiente proporciono las condiciones para la posible eliminación o disminución de dichas

sustancias, mientras que la refrigeración impidió en cierta medida su remoción. Con los resultados del presente trabajo se descarta la presencia de latencia en las semillas de *D. cedrosanum*, por lo cual es factible sembrarlas inmediatamente después de la cosecha.

CONCLUSIONES

Se detectaron diferencias estadísticas en la germinación de semilla de los tres genotipos. En particular, las semillas de la familia SV1 tuvo el mejor porcentaje de germinación promedio, con un valor del 93%. Por lo que respecta a ambientes, hubo una diferencia muy marcada entre la semilla guardada a temperatura ambiente y aquella en refrigeración. La semilla que se guardó en refrigeración presento bajos porcentajes de germinación, atribuibles a la humedad. El promedio de germinación en la semilla almacenada a temperatura ambiente fue de 86%, mientras que la de refrigeración tuvo un valor de 70%. Por lo que respecta a los tiempos de almacenamiento, no hubo diferencias estadísticas entre 1 y 30 días, sin embargo, la capacidad de germinación disminuyó ligeramente a los 90 días. Lo porcentajes promedio fueron: 80% para 1 día, 84% para 30 días, y 71% para 90 días. Adicionalmente, estos resultados indican que la semilla puede germinar inmediatamente después de la cosecha.

ANEXOS

Cuadro A1. Cuadro General de porcentajes de germinación de los genotipos SV1, SV2 y SV3 en ambiente (R) Refrigerado y (A) Ambiente en diferentes días 1,30 y 90.

Genotipo	Tiempo	Ambiente	Repetición	Germinación	Pgerm %
SV1	1	A	1	20	100
SV1	1	A	2	20	100
SV1	1	A	3	20	100
SV1	1	R	1	20	100
SV1	1	R	2	20	100
SV1	1	R	3	20	100
SV1	30	A	1	20	100
SV1	30	A	2	20	100
SV1	30	A	3	20	100
SV1	30	R	1	20	100
SV1	30	R	2	20	100
SV1	30	R	3	20	100
SV1	90	A	1	20	100
SV1	90	A	2	19	95
SV1	90	A	3	18	90
SV1	90	R	1	7	35
SV1	90	R	2	16	80
SV1	90	R	3	13	65
SV2	1	A	1	19	95
SV2	1	A	2	15	75
SV2	1	A	3	17	85
SV2	1	R	1	7	35
SV2	1	R	2	17	85
SV2	1	R	3	16	80
SV2	30	A	1	15	75
SV2	30	A	2	18	90
SV2	30	A	3	19	95
SV2	30	R	1	14	70
SV2	30	R	2	13	65
SV2	30	R	3	9	45
SV2	90	A	1	20	100
SV2	90	A	2	0	0
SV2	90	A	3	20	100
SV2	90	R	1	16	80
SV2	90	R	2	18	90
SV2	90	R	3	13	65
SV3	1	A	1	15	75

Cuadro A1. Continuación

Genotipo	Tiempo	Ambiente	Repetición	Germinación	Pgerm %
SV3	1	A	2	16	80
SV3	1	A	3	12	60
SV3	1	R	1	12	60
SV3	1	R	2	4	20
SV3	1	R	3	17	85
SV3	30	A	1	19	95
SV3	30	A	2	18	90
SV3	30	A	3	11	55
SV3	30	R	1	18	90
SV3	30	R	2	15	75
SV3	30	R	3	12	60
SV3	90	A	1	20	100
SV3	90	A	2	17	85
SV3	90	A	3	19	95
SV3	90	R	1	5	25
SV3	90	R	2	3	15
SV3	90	R	3	11	55

LITERATURA CITADA

- Afzal, I., Jaffar, I., Zahid, S., Rehman, H. U., & Basra, S. M. A. (2020). Physiological and biochemical changes during hermetic storage of *Moringa oleifera* seeds. *South African Journal of Botany*, 129, 435-441. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.11.011>
- Antonio-Bautista, A. (2020). *Predicción de la humedad de equilibrio y deterioro en semillas de especies de Zonas Áridas y Semiáridas* [Tesis Doctoral]. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Baker, H. G. (1989). Some Aspects of the Natural History of Seed Banks. En *Ecology of Soil Seed Banks* (pp. 9-21). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-440405-2.50007-5>
- Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (2000). Seeds: Ecology, Biogeography, and Evolution of Dormancy and Germination. *Nordic Journal of Botany*, 20(5), 598-598. <https://doi.org/10.1111/j.1756-1051.2000.tb01610.x>
- Becerra-López, J. L., Rosales-Serna, R., Ehsan, M., Becerra-López, J. S., Czaja, A., Estrada-Rodríguez, J. L., Romero-Méndez, U., Santana-Espinosa, S., Reyes-Rodríguez, C. M., Ríos-Saucedo, J. C., & Domínguez-Martínez, P. A. (2020). Climatic Change and Habitat Availability for Three Sotol Species in México: A Vision towards Their Sustainable Use. *Sustainability*, 12(8), 3455. <https://doi.org/10.3390/su12083455>
- Bell, W. H., & Castetter, E. F. (1941). The utilization of yucca, sotol, and beargrass by the aborigines in the American Southwest. *The University of New Mexico: Albuquerque, NM, USA*, 5, 1-75.

- Benavides-Mendoza, A., Hernández-Juárez, A., & Francisco Francisco, N. (2023). Germinación, crecimiento vegetativo y morfología floral de *Dasyilirion cedrosanum* del matorral rosetófilo de Coahuila. *CienciaUAT*, 191-201. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v18i1.1772>
- Calderón Gómez, E. R. (2004). *Rompimiento de latencia en semillas de Sotol (Dasyilirion cedrosanum Trel.) mediante escarificación física y química*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Cano Pineda, A., Martínez Burciaga, O. U., Berlanga Reyes, C. A., Villavicencio Gutiérrez, E. E., & Castillo Quiroz, D. (2011). *Guía para la evaluación de existencias de sotol (Dasyilirion cedrosanum Trel.) en poblaciones naturales del Estado de Coahuila* (INIFAP). Centro de Investigación Regional Noreste.
- Casas-Acevedo, A., Veana, F., Montet, D., Aguilar, C. N., Rutiaga-Quiñones, O. M., & Rodríguez-Herrera, R. (2021). Microbial and chemical changes during the production of sotol: A Mexican alcoholic beverage. *Food Biotechnology*, 35(1), 67-90. <https://doi.org/10.1080/08905436.2020.1869981>
- Cruz López, H. F. (2011). *Efecto en la capacidad fisiológica en semillas de Sotol (Dasyilirion cedrosanum Trel.) con aplicación de bioreguladores*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Destiladora la Tradición de la Familia. (2024). Proceso de fabricación de Sotol [Comercial]. *Sotol Coahuila*. <https://sotolcoahuila.com/fabricacion/>
- Fay, P. A. (2009). Precipitation variability and primary productivity in water-limited ecosystems: How plants 'leverage' precipitation to 'finance' growth. *New Phytologist*, 181(1), 5-8. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02695.x>

- Francisco-Francisco, N., García-Osuna, H. T., Benavides-Mendoza, A., & Godina, F. R. (2016). Morfología y anatomía foliar de *Dasyilirion cedrosanum* en diferentes etapas de desarrollo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(7), 1679-1687. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i7.161>.
- Gardea, A. A., Findley, L. T., Orozco-Avitia, J. A., Bañuelos, N., Esqueda, M., & Huxman, T. H. (2012). Bacanora and Sotol: So Far, So Close. *Estudios Sociales*, 2, 153-168.
- Haeckel, I. B. (2008). The “Arco Floral”: Ethnobotany of *Tillandsia* and *Dasyilirion* spp. in a Mexican Religious Adornment. *Economic Botany*, 62(1), 90-95. <https://doi.org/10.1007/s12231-008-9009-8>
- iNaturalistMX. (2024). Sotol de la Sierra Madre Oriental *Dasyilirion cedrosanum* [Consulta]. *iNaturalistMX*. <https://mexico.inaturalist.org/taxa/276587-Dasyilirion-cedrosanum>
- Leach, J. D., & Sobolik, K. D. (2010). High dietary intake of prebiotic inulin-type fructans in the prehistoric Chihuahuan Desert. *British Journal of Nutrition*, 103(11), 1558-1561. <https://doi.org/10.1017/S0007114510000966>
- López Barboza, L. A. (2005). Capítulo III: El sotol en Coahuila, potencialidades y limitaciones. En *Bebidas y Regiones: Historia e Impacto de la cultura etílica en México* (pp. 63-84). Plaza y Valdés Editores.
- López Serrano, P. M., Hernández Ramos, A., Méndez González, J., Martínez Salvador, M., Aguirre Calderón, O., Vargas Larreta, B., & Corral Rivas, J. J. (2021). *Mejores prácticas de manejo y ecuaciones alométricas de biomasa de*

Dasyilirion cedrosanum Trel., en los estados de Coahuila y Durango. (Proyecto: 2017-4-292674.). CONAFOR-CONACYT.

Madrid-Solórzano, J. M., García-Alcaraz, J. L., & Valles-Rosales, D. J. (2021). La producción de sotol: Revisión de literatura sistemática. *Mundo Fesc*, 11, 107-117.

Melgoza Castillo, A., & Sierra Tristán, J. S. (2003). Contribución al conocimiento y distribución de las especies de *Dasyilirion spp.* (SOTOL) en Chihuahua, México. *Revista Ciencia Forestal en México*, 28(93), 25-40.

Molly Mandell, J. B. (2019, abril 26). El sotol es más que un simple licor, es la historia y cultura del norte de México. *Los Ángeles Times*.
<https://www.latimes.com/espanol/mexico/la-es-el-sotol-es-mas-que-un-simple-licor-es-la-historia-y-la-cultura-del-norte-de-mexico-20190426-story.html>

NOM-159-SCFI-2004. (2004, junio 16). *Norma Oficial Mexicana [NOM-159-SCFI-2004] Bebidas alcohólicas-Sotol-Especificaciones y métodos de prueba*. Diario Oficial de la Federación [D.O.F].
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=669378&fecha=16/06/2004#gsc.tab=0

Olhagaray Rivera, E. (1994). *Diagnóstico de la actividad forestal en la Región Lagunera*. (CIFAP-RASPA). INIFAP.

Olhagaray Rivera, E., Esparza Chávez, G., & Vega Sotelo, F. (2004). Producción y comercialización de licores de Sotol (*Dasyilirion cedrosanum* Trel.) en Durango, México. *Revista Ciencia Forestal en México*, 29(95), 83-89.

- Olivas N., G., & Rivera Q., J. (1984). *Informe anual del programa de aprovechamiento forestal en la region lagunera*. (SARH; p. 5).
- Olivas-García, J. M., Anchondo-Nájera, J. A., Hernández-Salas, J., Luján-Álvarez, C., Baca-Venegas, J. M., & Chancho-Soletto, J. (2010). La industria del sotol en Chihuahua: Hacia el uso sustentable de un importante recurso natural. En *Proceedings of the VII Simposio Internacional Sobre la Flora Silvestre en Zonas Áridas* (pp. 17-19).
- Orozco-Sifuentes, M. M., García-Martínez, J. E., Arévalo-Sanmiguel, C. A., Ramírez-Godina, F., & Reyes-Valdés, M. H. (2019). Nitritive potencial of Sotol (*Dasyilirion cedrosanum*) seeds. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(4), 385-392. <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.4.385-392>
- Ortiz-Covarrubias, Y. C., Orozco-Sifuentes, M. M., Mendoza-Rodríguez, D. V., Villarreal-Quintanilla, J. A., Martínez, O., Hernández-Godínez, F., Jáuregui-González, M. D. J., & Reyes-Valdés, M. H. (2022). Phylogeny, origin and diversification of the *Dasyilirion* genus based on *matK* and *rbcL* sequences. *Plant Genetic Resources: Characterization and Utilization*, 20(2), 108-115. <https://doi.org/10.1017/S1479262122000181>
- Pece, M. G., Acosta, M., Saavedra, S., & Bruno, C. (2012). Aplicación de la regresión logística en un estudio de emergencia de plántulas de Algarrobo blanco (*Prosopis alba* Griseb.) en vivero, bajo diferentes concentraciones salinas. *Quebracho - Revista de Ciencias Forestales*, 20(1,2), 78-84.
- Poinar, H. N., Kuch, M., Sobolik, K. D., Barnes, I., Stankiewicz, A. B., Kuder, T., Spaulding, W. G., Bryant, V. M., Cooper, A., & Pääbo, S. (2001). A molecular

- analysis of dietary diversity for three archaic Native Americans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(8), 4317-4322.
<https://doi.org/10.1073/pnas.061014798>
- POWO. (2024). Plants of the World Online [Published on the Internet]. *Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew*. <https://powo.science.kew.org/>
- R Core Team. (2023). *R: a language and environment for statistical computing*. (Versión version 3.4.4) [Software]. R Foundation for Statistical Computing.
- Reyes-Valdés, M. H., Benavides-Mendoza, A., & Ramírez-Rodríguez, H. (2012). BIOLOGÍA E IMPORTANCIA DEL SOTOL (*Dasyllirion spp.*). PARTE I: SISTEMÁTICA, GENÉTICA Y REPRODUCCIÓN. *Planta*, Año 7(14).
- Rodríguez Trejo, D. A., García Pascual, E., Quiahua Barrera, L., & Reyes Valdovinos, E. Y. (2019). Germinación de semillas de *Dasyllirion lucidum* Rose y *Beaucarnea gracilis* Lemaire de matorral xerófilo. *Entreciencias*, 7(20), 1-12.
<https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2019.20.68365>
- Russo, V. M., Bruton, B. D., & Sams, C. E. (2010). Classification of temperature response in germination of *Brassicaceae*. *Industrial Crops and Products*, 31(1), 48-51. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.08.007>
- Sierra Tristán, J. S., Lara Macías, C. R., Melgoza Castillo, A., Morales-Nieto, C., & Royo Márquez, M. H. (2008). *Los sotoles Dasyllirion spp. de Chihuahua*. INIFAP - CIRNOC.
- Torres-Guerrero, C. A., Govaerts, B., & León-González, F. D. (2013). Influencia de las raíces sobre la agregación del suelo. *Terra Latinoamericana*, 31, 71-84.

- Ventas, L. (2022, julio 15). El boom del sotol, el licor que estuvo perseguido en México (y la polémica con los productores de Texas por quién puede elaborarlo). *BBC News Mundo*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-62101729>
- Villa Castorena, Ma. M., Catalán Valencia, E. A., Inzunza Ibarra, M. A., & Román López, A. (2012). *Producción de planta de Sotol para trasplante* (INIFAP). Centro de Investigación Disciplinaria en la Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera.
- Villavicencio Gutiérrez, E., Cano Pineda, A., & Juárez Santana, A. (2007). *Guía para la micropropagación y producción in vitro de plantas de Sotol (Dasylirion cedrosanum Trel.)*.
- Webb, G. (2001). The Cambridge World History of Food. Edited by K F Kiple and K C Ornelas. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 2000 Two volume boxed set at £110. ISBN 0521402166. *British Journal of Nutrition*, 85(6), 761-762. <https://doi.org/10.1079/BJN2001354>
- Zuntini, A. R., Carruthers, T., Maurin, O., Bailey, P. C., Leempoel, K., Brewer, G. E., Epiawalage, N., Françoso, E., Gallego-Paramo, B., McGinnie, C., Negrão, R., Roy, S. R., Simpson, L., Toledo Romero, E., Barber, V. M. A., Botigué, L., Clarkson, J. J., Cowan, R. S., Dodsworth, S., ... Baker, W. J. (2024). Phylogenomics and the rise of the angiosperms. *Nature*, 629(8013), 843-850. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07324-0>