



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SINALOA DE LEYVA**

TITULACIÓN INTEGRAL CON EL PRODUCTO

TESIS

**“CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA Y ESTABLECIMIENTO DE UN
BANCO DE GERMOPLASMA EX VITRO DE MEZQUITE (*Prosopis juliflora*)
DEL NOROESTE MEXICANO”**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

PRESENTA:

**LÓPEZ VALDEZ CARLOS MIGUEL
NÚMERO DE CONTROL: 211220016**

DIRECTOR(A):

ING. BRENDA ARMENTA VALENZUELA

CODIRECTOR(A):

DRA. JESUS LUCINA ROMERO ROMERO

EMPRESA:

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO
INTEGRAL REGIONAL (CIIDIR) UNIDAD SINALOA**

SINALOA DE LEYVA, SINALOA. 19 DE MARZO DEL 2026.



AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Tecnológico de Sinaloa de Leyva, por abrirme sus puertas y aceptarme como su alumno en la carrera de ingeniería en industrias alimentarias y por haberme permitido conocer a todas las personas con las que compartí maravillosos momentos.

A CIIDIR-IPN U. Sinaloa, por recibirme en sus instalaciones y permitirme realizar mi Residencia Profesional y Tesis Profesional.

A mi asesora interna Ing. Brenda, por todo su cariño y comprensión durante toda mi carrera universitaria, por su orientación, dedicación y compromiso durante el desarrollo de esta investigación. Agradezco profundamente sus conocimientos, observaciones y acompañamiento académico que fueron esenciales para la realización de este proyecto.

A mi asesora externa la Dra. Jesús Lucina, por haberme permitido formar parte de su familia académica en el Laboratorio de Fisiología y Biología Molecular Vegetal, por su valiosa colaboración, disposición y aportaciones académicas que enriquecieron este trabajo de investigación, contribuyendo de manera significativa a su calidad y rigor científico.

A mis padres, Rosa y Olegario y a mis hermanas, Karely y Yamileth por su amor incondicional, apoyo constante y por ser el pilar fundamental de mi formación personal y académica. Gracias por los valores inculcados, la confianza depositada en mí y por el acompañamiento permanente que me impulsó a seguir adelante en cada etapa de este proceso.

A mi pareja, Dariel por su amor, comprensión y apoyo incondicional a lo largo de este camino. Gracias por la paciencia, el ánimo constante y por estar presente en los momentos de mayor esfuerzo, convirtiéndose en un soporte fundamental para la culminación de este trabajo.



A mis compañeros de laboratorio, por haberme hecho sentir como en casa, por cada risa que compartíamos, por cada consejo y ayuda brindada y especialmente a Betty y Alejandra por brindarme su apoyo incondicional en todo momento. Gracias por su colaboración, la paciencia y el ambiente de aprendizaje que hicieron posible el desarrollo de esta investigación.

A mis maestros del Tecnológico, por los conocimientos otorgados, especialmente a mis maestras Brenda y Nathalie por siempre estar dispuestas a ayudarme, gracias por enseñarme a tener paciencia y a confiar en mí mismo, por motivarme a seguir adelante y por demostrarme su amistad fuera de la universidad.

A mis compañeros de universidad, algunos se quedan en un lugar muy especial dentro de mi corazón, en especial a Ana por ser mi amistad incondicional y apoyarme en todo momento, a Janeth, Alexandra y Martin por la infinita amistad que me brindaron, gracias por todos esos momentos maravillosos y esas aventuras que pasamos juntos, por cada risa en todo momento y por hacerme sentir como en familia.



DEDICATORIA

A Dios;

por ser mi guía y fortaleza en todo momento de mi vida.

A mis abuelos;

por su amor infinito y por ser inspiración permanente en mi vida.

A mis padres;

quienes han sido mi mayor ejemplo de esfuerzo y perseverancia, y que con su amor han hecho posible cada uno de mis logros.

A mis hermanas;

por estar siempre a mi lado y brindarme alegría y fuerza en los momentos difíciles.

A mi pareja;

por creer en mí incluso cuando yo dudaba, por su apoyo incondicional y por acompañarme en este camino.

“Para tener éxito, tus deseos de triunfar deberían ser más grandes que tu miedo de fracasar”

Bill Cosby.

GLOSARIO

Mezquite: Nombre común que se da a varias especies de árboles y arbustos del género *Prosopis*, pertenecientes a la familia Fabaceae, caracterizados por su adaptación a zonas áridas y semiáridas. Árbol o arbusto leguminoso del género *Prosopis*, propio de regiones áridas y semiáridas de América, que produce vainas comestibles ricas en azúcares y proteínas y presenta alta tolerancia a sequía y suelos pobres.

Prosopis juliflora: Especie de mezquite arbórea leguminosa espinosa, nativa de regiones áridas y semiáridas de América tropical, adaptada a condiciones de sequía y reconocida por la producción de vainas nutritivas y su importancia ecológica y socioeconómica.

In vitro: El término *in vitro* (del latín “*en vidrio*”) se refiere a procesos biológicos, experimentos o cultivos que se realizan fuera del organismo vivo, en condiciones controladas de laboratorio, generalmente en recipientes de vidrio o materiales estériles.

Germoplasma: Es el material genético hereditario de una especie, conservado en forma de semillas, tejidos o plantas, utilizado para su preservación y mejoramiento.

Ex vitro: Describe el crecimiento y establecimiento de plantas fuera de condiciones de cultivo *in vitro*, en ambientes no estériles como vivero o campo.

Condiciones edafoclimáticas: Son el conjunto de características del suelo y del clima que influyen en el desarrollo y distribución de las plantas en un sitio determinado.

Caracterización morfométrica: Análisis cuantitativo de las características de forma y tamaño de estructuras biológicas mediante mediciones numéricas, con el fin de describir, comparar y evaluar la variabilidad entre individuos o poblaciones.



Árbol perenne: Es aquel árbol que mantiene su follaje vivo y verde durante todo el año, renovando sus hojas de forma gradual en lugar de perderlas todas a la vez en una estación.

Peat moss: Sustrato orgánico ligero y esponjoso, derivado de la descomposición de musgos del género *Sphagnum* en humedales del hemisferio norte.

Plántulas: Planta joven en sus primeras etapas de desarrollo, que abarca desde la germinación de la semilla hasta la aparición de las primeras hojas verdaderas.



ÍNDICE

I. Introducción.....	1
II. Marco teórico.....	3
2.1 Generalidades de <i>P. juliflora</i>	3
2.2 Taxonomía.....	3
2.3 Origen y distribución del mezquite	3
2.4 Importancia ecológica	4
2.5 Relevancia económica	5
2.6 Importancia médica	6
2.7 Conservación de <i>P. juliflora</i>	8
III. Planteamiento del problema.....	10
IV. Justificación.....	11
V. Hipótesis	13
VI. Objetivos.....	14
6.1 Objetivo general	14
6.2 Objetivos específicos	14
VII. Metodología	15
7.1 Colecta de material vegetal.....	15
7.2 Caracterización morfométrica de frutos de <i>P. juliflora</i>	15
7.3 Germinación <i>in vitro</i> de semillas de <i>P. juliflora</i>	16
7.3.1 Determinación de curva de imbibición	16
7.3.2 Ensayo de viabilidad.....	16
7.3.3 Escarificación mecánica	17
7.3.4 Desinfección de semillas escarificadas	17
7.3.5 Germinación <i>in vitro</i> de semillas de <i>P. juliflora</i>	18



7.4	Establecimiento de un banco de germoplasma ex vitro de <i>P. juliflora</i>	18
7.4.1	Preparación de sustrato.....	18
7.4.2	Germinación ex vitro de semillas de mezquite.....	18
VIII.	Resultados	19
8.1	Colecta de material biológico.	19
8.2	Caracterización morfométrica de las vainas maduras de <i>P. juliflora</i>	22
8.3	Germinación <i>in vitro</i> de semillas de <i>P. juliflora</i>	24
8.3.1	Curva de Imbibición	24
8.3.2	Determinación de viabilidad de semillas	25
8.3.3	Germinación <i>in vitro</i> de semillas de <i>P. juliflora</i>	27
8.4	Establecimiento de un banco de germoplasma ex vitro de <i>P. juliflora</i> (Swartz) del noroeste de México.....	29
IX.	Discusiones.....	32
X.	Conclusiones	34
XI.	Recomendaciones	35
XII.	Bibliografía	36



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución geográfica del mezquite.....	4
Figura 2. Composición fotoquímica en plantas de <i>Prosopis</i>	6
Figura 3. Colecta de frutos maduros de <i>P. juliflora</i> en las diferentes localidades..	21
Figura 4. Análisis de largo y ancho de vainas de mezquite.	22
Figura 5. Determinación de número de semillas en las vainas de mezquite de los diferentes puntos de colecta.....	23
Figura 6. Análisis de largo y ancho de semillas de vainas de mezquite.	23
Figura 7. Curva de imbibición de semillas de <i>P. juliflora</i>	25
Figura 8. Análisis de viabilidad de embriones de mezquite mediante el test de tetrazolio en semillas.....	26
Figura 9. Germinación <i>in vitro</i> de semillas de <i>P. juliflora</i>	28
Figura 10. Germinación en sustrato de <i>P. juliflora</i>	30
Figura 11. Proceso de Aclimatación gradual de plantas de <i>P. juliflora</i> para establecimiento de banco de germoplasma en sustrato..	30



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química de las vainas de <i>Prosopis</i> en distintos estados de maduración.....	7
Tabla 2. Composición fisicoquímica de grano de <i>Prosopis</i>	7
Tabla 3. Composición de la harina de <i>Prosopis</i> a diferentes temperaturas de secado	8
Tabla 4. Sitios de colecta de frutos de mezquite.....	20
Tabla 5. Germinación <i>in vitro</i> tras tratamientos de escarificación y desinfección de semillas de <i>P. juliflora</i>	27

RESUMEN

El mezquite [*Prosopis juliflora* (Swartz) DC] es una especie nativa de zonas áridas y semiáridas del noroeste de México, caracterizada por su alta adaptabilidad a condiciones climáticas extremas y por el valor nutricional de sus frutos, los cuales presentan un elevado contenido de proteínas, azúcares, fibra, aminoácidos esenciales, minerales y ácidos grasos importantes como oleico y linoleico. Adicionalmente, el mezquite es considerado como un recurso forestal y agroindustrial de elevada relevancia económica, debido a su uso en la elaboración de muebles, utensilios, casas rurales y gomas que se utilizan como emulsionantes y estabilizantes de diversos alimentos.

Por lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo realizar la caracterización morfométrica de frutos y semillas de *Prosopis juliflora* provenientes del noroeste de México y establecer un banco de germoplasma ex vitro que contribuya a la conservación de la variabilidad regional de la especie.

La colecta de vainas maduras se realizó en distintas localidades de Sonora (Hermosillo, UNISON y Pesqueira) y Sinaloa (Guamúchil). Posteriormente, se llevó a cabo la caracterización morfométrica mediante la medición del largo y ancho de vainas, número de semillas por vaina, dimensiones de semillas e índice de redondez. Los resultados evidenciaron variaciones morfológicas entre sitios de colecta, observándose valores similares en los frutos provenientes de UNISON y Hermosillo, mientras que Guamúchil presentó ligeras diferencias en algunos parámetros, lo que sugiere posible influencia de las condiciones ambientales y variabilidad genética.

En cuanto a la germinación de semillas de *P. juliflora*, la prueba de tetrazolio mostró 100% de viabilidad en todos los sitios de colecta. En los ensayos de escarificación, el tratamiento con lija grano 360 presentó mayores porcentajes de germinación *in vitro* con un 75 a 90% en comparación con la lija grano 80 con lo que se obtuvo de



un 50 a 70% de germinación, demostrando que una abrasión mecánica fina favorece la ruptura de la dormancia física sin comprometer la integridad del embrión.

En el establecimiento de un banco de germoplasma ex vitro de las semillas provenientes de las distintas localidades, el porcentaje de germinación ex vitro ascendió a 90% en semillas colectadas en Guamúchil y 80% para las semillas de UNISON y Hermosillo, evidenciando una respuesta germinativa favorable en todos los casos.

La información obtenida contribuye al conocimiento morfológico de *Prosopis juliflora* (Swartz) así como conservación a través del establecimiento de un banco de germoplasma ex vitro del noroeste mexicano, para el futuro desarrollo e implementación de un programa de mejoramiento genético de esta especie en México.

Palabras clave: Mezquite, *Prosopis juliflora*, morfología, banco de germoplasma.

ABSTRACT

Mesquite [*Prosopis juliflora* (Swartz) DC] is a species native to arid and semi-arid regions of northwestern Mexico, characterized by its high adaptability to extreme climatic conditions and the nutritional value of its fruits, which have a high content of proteins, sugars, fiber, essential amino acids, minerals, and important fatty acids such as oleic and linoleic acids. Additionally, mesquite is considered a forestry and agro-industrial resource of high economic importance due to its use in the production of furniture, utensils, rural houses, and gums used as emulsifiers and stabilizers in various foods.

Therefore, the objective of this research was to perform the morphometric characterization of fruits and seeds of *Prosopis juliflora* from northwestern Mexico and to establish an ex vitro germplasm bank that contributes to the conservation of the species' regional variability.

Mature pods were collected from various locations in Sonora (Hermosillo, UNISON, and Pesqueira) and Sinaloa (Guamúchil). Morphometric characterization was then performed by measuring pod length and width, number of seeds per pod, seed dimensions, and roundness index. The results showed morphological variations among collection sites, with similar values observed in pods from UNISON and Hermosillo, while Guamúchil presented slight differences in some parameters, suggesting a possible influence of environmental conditions and genetic variability.

Regarding the germination of *P. juliflora* seeds, the tetrazolium test showed 100% viability at all collection sites. In scarification trials, the treatment with 360-grit sandpaper showed higher in vitro germination rates 75-90% compared to 80-grit sandpaper, which yielded 50-70% germination. This demonstrates that fine mechanical abrasion promotes the breaking of physical dormancy without compromising embryo integrity.



In the establishment of an ex vitro germplasm bank of seeds from different locations, the ex vitro germination rate reached 90% for seeds collected in Guamúchil and 80% for seeds from UNISON and Hermosillo, demonstrating a favorable germination response in all cases.

The information obtained contributes to the morphological knowledge of *Prosopis juliflora* (Swartz) as well as to its conservation through the establishment of an ex vitro germplasm bank in northwestern Mexico, for the future development and implementation of a genetic improvement program for this species in Mexico.

Keywords: Mesquite, *Prosopis juliflora*, morphology, germplasm bank.

I. INTRODUCCIÓN

El mezquite [*Prosopis juliflora* (Swartz) DC] es una especie arbórea nativa de regiones áridas y semiáridas del noroeste de México, reconocida por su alta capacidad de adaptación a condiciones ambientales extremas, como sequía prolongada, suelos salinos y baja disponibilidad de nutrientes. Presenta numerosas flores dispuestas en espigas cilíndricas de 5 a 15 cm de largo; corola de color blanco verdoso que se vuelve amarillo, estambres de 5 a 8 mm de largo y vainas de color marrón pálido amarillento. El fruto es una legumbre recta con punta curvada, en ocasiones encorvada, de color amarillo pajizo a marrón, comprimido, lineal con márgenes paralelos y acuminados, con 8 a 30 cm de largo y 0.8 a 1.7 de diámetro, con mesocarpo carnoso y endocarpo segmentado hasta en 25 partes, en su mayoría más ancho que largo. Contiene semillas ovales, de color marrón (CABI, 2020; PIER, 2021).

El uso de las vainas de mezquite en la alimentación humana es muy antiguo, tanto en América, como en Asia y África. Las vainas de mezquite son dulces por su alto contenido de sacarosa, así como ricas en fibra, proteínas, minerales, ácidos grasos y aminoácidos esenciales tales como; ácido glutámico, arginina y leucina. Asimismo, su madera es utilizada como fuente de energía y materia prima en diversas aplicaciones como fabricación de muebles, utensilios y casas rurales. No obstante, pese a su relevancia, las poblaciones naturales enfrentan presiones derivadas del cambio climático, la degradación de suelos y el cambio de uso de suelo, lo que puede comprometer la conservación de su diversidad genética (Fortoul, 2020).

En este contexto, la caracterización morfológica de frutos y semillas constituye una herramienta fundamental para evaluar la variabilidad fenotípica entre poblaciones. Por otra parte, la conservación de los recursos genéticos vegetales se ha convertido en una estrategia prioritaria frente a los escenarios actuales de degradación ambiental y cambio climático. El establecimiento de bancos de germoplasma representa una alternativa viable para resguardar la variabilidad genética de

especies de interés ecológico y económico. En el caso de *P. juliflora*, la implementación de un banco de germoplasma ex vitro permite conservar plántulas establecidas bajo condiciones controladas, facilitando su propagación, estudio y eventual utilización en programas de restauración, aprovechamiento sustentable y mejoramiento genético.

La germinación, tanto *in vitro* como ex vitro, es un componente esencial en este proceso, ya que permite evaluar la viabilidad y el comportamiento fisiológico de las semillas provenientes de distintos sitios de colecta. La aplicación de tratamientos pregerminativos, como la escarificación mecánica, resulta determinante para superar la dormancia física característica de esta especie y optimizar los porcentajes de establecimiento.

Por lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo realizar la caracterización morfométrica de frutos y semillas de *P. juliflora* del noroeste mexicano y establecer un banco de germoplasma ex vitro que contribuya a la conservación, propagación y aprovechamiento sustentable de la especie.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES DE *P. juliflora*

Prosopis juliflora es un árbol espinoso, nativo de México, perteneciente a la familia Fabaceae. Mide hasta 20 m de altura, presenta copa irregular de follaje ralo extendido; hojas compuestas, alternas, pinnadas y bipinnadas; Fuste irregular, bifurcado desde la base, con espinas en sus ramas jóvenes; Inflorescencia de color amarillo dispuesta en racimo cilíndrico espigado. Frutos leguminosos fibrosos e indehiscentes, semillas aplanadas y rodeadas por una membrana dulce (Rubén, 2020).

Los nombres comunes de la especie son: mezquite, algarrobo, nacascol, nacascolote y Campeche negro.

2.2 TAXONOMÍA

Descripción taxonómica según Folliott y Thames (1983):

Reino: Vegetal (Plantae)

Sub-reino: Traqueobionta (Plantas vasculares)

Superdivisión: Spermatophyta (Plantas con semilla)

División: Magnoliophyta (Plantas con flor)

Clase: Magnoliopsida (Dicotiledóneas)

Sub-clase: Rosidae

Orden: Fabales

Familia: Fabaceae (Leguminosas)

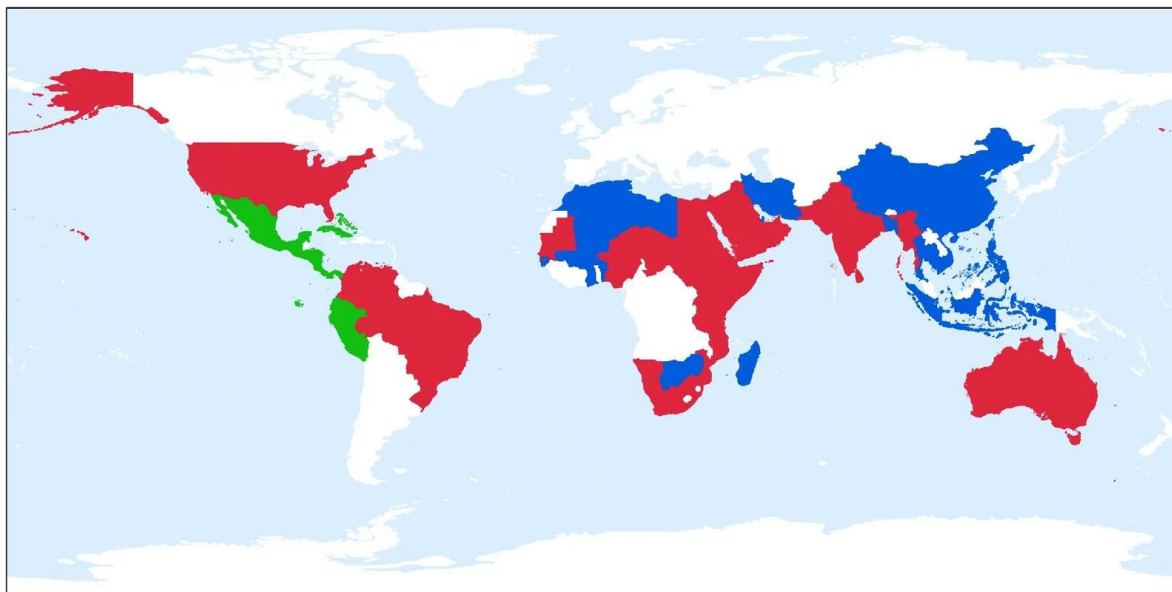
Género: *Prosopis*

Especie: *P. juliflora*

2.3 ORIGEN Y DISTRIBUCIÓN DEL MEZQUITE

El mezquite (*P. juliflora*) es originario de las zonas áridas y semiáridas de América. El centro de su origen es México sin embargo, se distribuye en diversas regiones de Latinoamérica (Rodríguez, 2009).

Su distribución va desde Norteamérica [Arizona, Nuevo México, Texas (EE.UU.), y gran parte de México, incluyendo Sonora, Nuevo León, Coahuila, Tamaulipas y Sinaloa] hasta Latinoamérica (regiones áridas de Centro y Sudamérica, incluyendo Perú, Colombia y Venezuela) y otras zonas del mundo (naturalizado en el norte de África, Australia y Hawái) como se muestra en la Figura 1 (Palacios,2006).



● Nativa ● Cultivada ● Invasiva ● Introducida

Figura 1. Distribución geográfica del mezquite

2.4 IMPORTANCIA ECOLÓGICA

P. juliflora constituye un componente ecológico fundamental en ecosistemas áridos y semiáridos, donde desempeña un papel estratégico en la funcionalidad y resiliencia del sistema edáfico-vegetal. Esta especie se distingue por su capacidad de fijación biológica de nitrógeno atmosférico, lo que contribuye significativamente al enriquecimiento del suelo y a la mejora de su fertilidad. Asimismo, su sistema radical profundo y extensivo favorece la estabilización del suelo, reduciendo los procesos de erosión eólica e hídrica, además de participar en la fijación de dunas y en la conservación de la estructura edáfica.

En contextos de degradación ambiental, el mezquite presenta alta tolerancia a condiciones extremas, incluyendo suelos salinos, compactados o con bajo contenido de materia orgánica, lo que le confiere un papel relevante en procesos de recuperación de suelos y fitorremediación. Desde el punto de vista ecológico, actúa como especie nodriza, ya que su dosel genera microambientes con menor radiación solar y mayor retención de humedad, facilitando el establecimiento y desarrollo de otras especies vegetales.

Adicionalmente, representa un recurso trófico de importancia para la biodiversidad local, al producir vainas y follaje que sirven como fuente de alimento para ganado bovino y caprino, así como para diversas especies de fauna silvestre. Sus inflorescencias constituyen también un recurso nectarífero relevante para la apicultura, contribuyendo a la producción de miel y al sostenimiento de poblaciones de polinizadores. En conjunto, estas características posicionan al mezquite como una especie clave en la dinámica ecológica y productiva de regiones áridas y semiáridas (Batista Roche & Huera Ocampo, 2023).

2.5 RELEVANCIA ECONÓMICA

El mezquite, es un recurso forestal tanto maderable como no maderable de gran relevancia en zonas áridas y semiáridas, cuya importancia económica se sustenta en su amplia diversidad de usos productivos. Destaca por la producción de forraje de alto valor proteico a partir de sus vainas, las cuales, junto con las semillas, constituyen un excelente alimento para el ganado bovino, caprino y ovino debido a su contenido de proteínas (33–39%) y azúcares, especialmente fundamental durante periodos de sequía. Asimismo, su madera dura y resistente es ampliamente utilizada en la fabricación de muebles, postes y durmientes, y principalmente como leña y carbón vegetal de alta demanda por su elevado poder calorífico. En el ámbito agroindustrial, las vainas pueden procesarse para la elaboración de harinas con potencial comercial, mieles y diversos productos para consumo humano, mientras que de su corteza se obtiene una goma con capacidad de sustituir a la goma arábica. Además, distintas partes de la planta, como hojas, corteza y flores, se

emplean en la medicina tradicional, lo que de igual manera le confiere un valor terapéutico y comercial (Ribazki, 2014; Rodríguez Saucedo et al., 2014).

2.6 IMPORTANCIA MÉDICA

Las plantas medicinales, y en particular las del género *Prosopis*, son ricas en su composición química (Tablas 1, 2 y 3) y fitoquímicos, entre ellos alcaloides, compuestos fenólicos, especialmente flavonoides y ácidos fenólicos, glucósidos, esteroides, taninos y triterpenoides, (Figura 2), cada vez más reconocidos por sus efectos beneficiosos para la salud (Sharifi Rad et al., 2019).

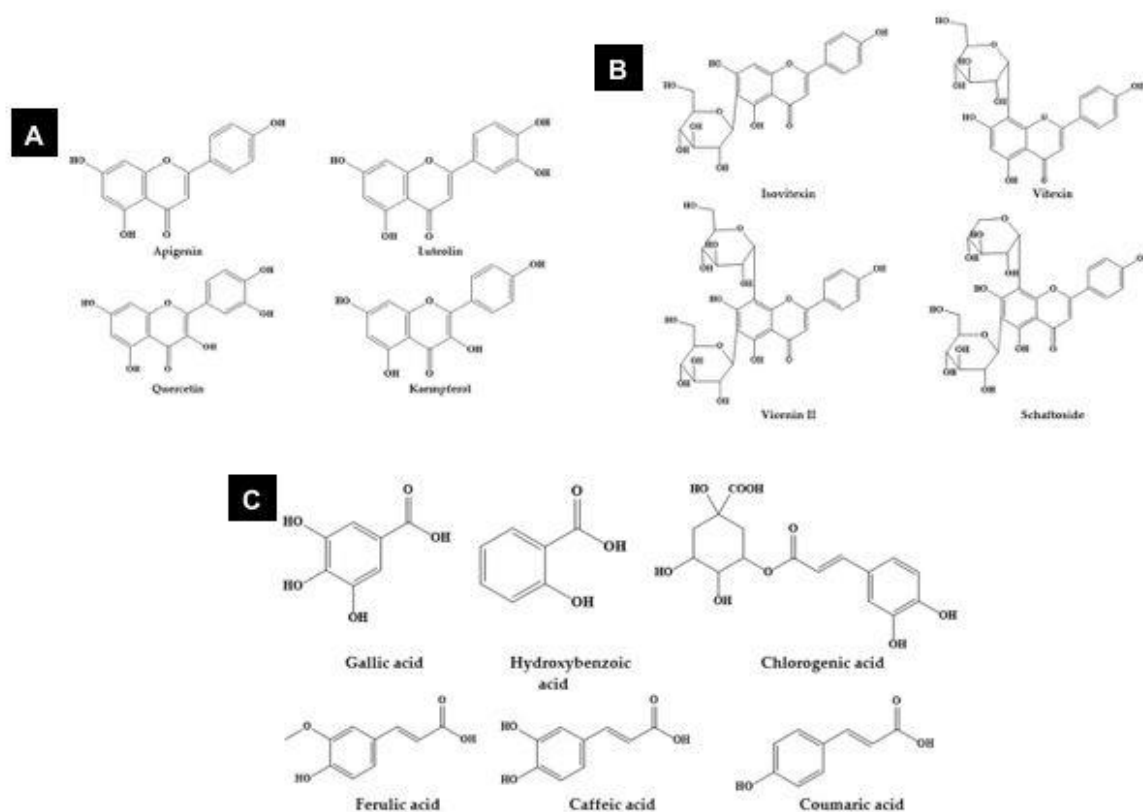


Figura 2. Composición fotoquímica en plantas de *Prosopis*. (A) Flavonoides; (B) Flavonas- C-glicosiladas; (C) Ácidos fenólicos.

Tabla 1. Composición química de las vainas de *Prosopis* en distintos estados de maduración

Componente (%)	Vaina tierna	Vaina madura	Vaina seca
Materia seca	33.33	37.13	80.48
Grasa orgánica	86.12	89.58	96.23
Proteína	18.13	12.3	13.44
Grasa	7.21	7.53	2.59
Fibra detergente neutro	47.62	27.74	26.7
Fibra detergente ácido	31.66	20.31	10.54
Hemicelulosa	15.96	7.43	16.06
Ceniza	13.83	10.42	3.77
Carbohidratos	13.16	42.01	53.5
Energía	2.43	2.86	3.03

Adaptado de Montañez Valdez et al., 2021.

Tabla 2. Composición fisicoquímica de grano de *Prosopis*

Composición del grano de mezquite	Porcentaje (%)
Humedad	9,38 ± 0,20
Ceniza	3,09 ± 0,12
Proteína	17,55 ± 0,44
Grasa	1,18 ± 0,02
Carbohidrato	66,89 ± 0,86
Fibra	0,91 ± 0,02

Adaptado de Maciel de Melo Cavalcante et al., 2022.

Tabla 3. Composición de la harina de *Prosopis* a diferentes temperaturas de secado

Composición de la harina (%)	Secado a 50 °C	Secado a 60 °C	Secado a 70 °C
Humedad	4.14	2.94	2.11
Cenizas	2.64	2.54	2.36
Proteínas	17.56	16.96	14.16
Grasa	3.26	3.32	2.32
Carbohidratos	69.42	70.51	74.13
Fibra	2.98	3.73	4.92

Adaptado de Maciel de Melo Cavalcante et al., 2022.

2.7 CONSERVACIÓN DE *P. juliflora*

El cambio climático incide de manera significativa en la fisiología, distribución y dinámica poblacional de *P. juliflora*, principalmente a través de alteraciones en los patrones de precipitación y temperatura. Se ha documentado que la variabilidad en la disponibilidad hídrica influye directamente en el desempeño fisiológico de la especie, afectando parámetros como la tasa fotosintética, conductancia estomática y acumulación de biomasa. En condiciones de sequía prolongada, se observa una reducción en el crecimiento y en el intercambio gaseoso; sin embargo, la especie presenta alta plasticidad fisiológica, lo que le permite tolerar periodos de estrés hídrico y recuperarse ante incrementos en la humedad del suelo. Asimismo, los modelos de distribución basados en escenarios climáticos futuros (RCP4.5 y RCP8.5) proyectan una expansión potencial de las áreas climáticamente adecuadas para *P. juliflora* hacia mediados y finales del siglo XXI. Este incremento en la idoneidad climática podría favorecer su establecimiento en nuevas regiones, intensificando su comportamiento invasivo y generando impactos sobre la

biodiversidad nativa y los servicios ecosistémicos. En conjunto, la evidencia científica sugiere que el cambio climático actúa como un factor dual para *P. juliflora*: por un lado, impone condiciones de estrés asociadas a sequías más intensas y eventos extremos; por otro, podría facilitar su expansión geográfica debido a su amplia tolerancia ecológica y capacidad adaptativa (Kebede et al., 2020).

Diversas estrategias de conservación se han implementado para garantizar la permanencia y el manejo sostenible del mezquite, particularmente en regiones áridas y semiáridas donde esta especie cumple funciones ecológicas claves. Una de las estrategias más empleadas es la restauración ecológica mediante revegetación y reforestación con especies nativas, incluyendo el mezquite como especie facilitadora. Debido a su capacidad de fijación de nitrógeno y tolerancia a condiciones edáficas adversas, *P. juliflora* ha sido utilizada en programas de rehabilitación de suelos degradados y control de la desertificación (Pasiecznik et al., 2001). Esta práctica favorece la recuperación de la estructura del suelo y la sucesión vegetal en ecosistemas alterados.

De igual manera, la conservación *in situ* y *ex situ* ha sido considerada como medida complementaria. La conservación *in situ* protege poblaciones naturales dentro de su rango ecológico, mientras que la conservación *ex situ*, a través de bancos de germoplasma y viveros forestales, permite resguardar la diversidad genética y facilitar programas de restauración (FAO, 2014).

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El mezquite (*P. juliflora*) es una especie arbórea nativa de las regiones áridas y semiáridas del noroeste de México que posee alto valor ecológico, económico y social.

Ante escenarios de cambio climático, se prevé un incremento en la aridez y la degradación de suelos, lo que hace necesario conservar y utilizar especies nativas adaptadas a condiciones extremas. En este contexto, la conservación de recursos genéticos mediante su caracterización morfométrica para identificar posibles variaciones poblacionales así como, el establecimiento de bancos de germoplasma ex vitro representa una estrategia fundamental para preservar la diversidad genética del mezquite adaptado a las condiciones climáticas extremas del noroeste mexicano.

IV. JUSTIFICACIÓN

El mezquite es una especie arbórea nativa de las zonas áridas y semiáridas del noroeste de México, reconocida por su alta adaptación a condiciones edafoclimáticas restrictivas, fijación de nitrógeno y producción de vainas con valor nutricional y forrajero. Adicionalmente, cumple funciones ecológicas esenciales en la estabilización de suelos, restauración de áreas degradadas y mantenimiento de la biodiversidad en ecosistemas desérticos. En la actualidad, las poblaciones naturales de mezquite enfrentan presiones derivadas de la degradación del hábitat, cambio de uso de suelo y aprovechamiento no regulado, lo que puede conducir a la pérdida de diversidad genética local.

En este contexto, la caracterización morfométrica de frutos y semillas constituye una herramienta fundamental para identificar variabilidad fenotípica y seleccionar material vegetal con potencial para programas de conservación, restauración y aprovechamiento. El análisis de parámetros como tamaño, forma y peso permite reconocer diferencias entre poblaciones y establecer criterios de selección de germoplasma adaptado a las condiciones del noroeste de México.

De igual manera, la germinación de *P. juliflora* en condiciones naturales puede verse limitada por la latencia física de la semilla y la variabilidad en la viabilidad, lo que dificulta la propagación y conservación de la especie. Por lo anterior, el establecimiento de un protocolo óptimo de germinación *in vitro* permitirá obtener plántulas en condiciones controladas, uniformes y libres de patógenos, facilitando la multiplicación de genotipos seleccionados y su posterior establecimiento bajo condiciones ex vitro.

La generación de un banco de germoplasma ex vitro representa una estrategia clave para la conservación y manejo sustentable de los recursos genéticos del mezquite del noroeste de México, ya que permitirá resguardar material vegetal representativo de la variabilidad regional y disponer de plántulas para programas de reforestación, mejoramiento genético, restauración ecológica y aprovechamiento productivo.



Asimismo, contribuirá a la preservación del patrimonio genético de la especie frente a procesos de degradación ambiental y cambio climático.

En conjunto, la presente investigación aportará información morfológica y biotecnológica relevante sobre *Prosopis juliflora* del noroeste de México, sentando bases para su conservación, propagación y aprovechamiento sustentable, fortaleciendo el conocimiento científico de una especie clave de los ecosistemas áridos de nuestro país.



V. HIPOTESIS

A partir de frutos de mezquite (*Prosopis juliflora*) caracterizados morfométricamente, se establecerá un banco de germoplasma ex vitro de la especie, adaptada a las condiciones climáticas extremas del noroeste mexicano.

VI. OBJETIVOS

6.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar morfométricamente y establecer un banco de germoplasma ex vitro de una población de *Prosopis juliflora* (Swartz) DC del noroeste de México.

6.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Colectar y analizar a nivel morfométrico frutos y semillas de *Prosopis juliflora* (Swartz) del noroeste mexicano.
- Establecer un protocolo óptimo de germinación *in vitro* de semillas de *P. juliflora* (Swartz) provenientes del noroeste de México.
- Generar un banco de germoplasma ex vitro de *Prosopis juliflora* (Swartz) del noroeste de México.

VII. METODOLOGÍA

7.1 Colecta de material vegetal

La colecta de frutos maduros de mezquite (*P. juliflora*) se realizó durante el mes de julio del 2025, en diferentes zonas del estado de Sonora (Hermosillo) y Sinaloa (Salvador Alvarado) mediante muestreos dirigidos, buscando obtener muestras representativas de cada lugar.

Las muestras fueron trasladadas al Laboratorio de Fisiología y Biología molecular vegetal en las instalaciones del CIIDIR Unidad Sinaloa y almacenadas a temperatura ambiente para sus análisis posteriores.

7.2 Caracterización morfométrica de frutos de *P. juliflora*

La caracterización morfométrica del fruto, se realizó a partir de 30 vainas por punto de colecta. Con vernier milimétrico digital, se obtuvieron las medidas (largo y ancho) de cada una de las muestras. Posteriormente, se realizó la extracción de semillas, generando diferentes cortes en la vaina de mezquite apoyados de tijeras que facilitaron la extracción de las semillas el interior del endocarpio. Asimismo, se realizó la determinación del largo y ancho de 50 semillas por cada punto de colecta utilizando vernier milimétrico digital.

Finalmente, se determinó el índice de Redondez (IR) de las semillas con la formula **IR= A/L**.

donde:

A = Ancho

L = Largo

El Índice de Redondez de semilla (Sánchez, 2015) es un parámetro morfométrico que permite evaluar la forma de la semilla a partir de la relación entre su ancho (A) y su largo (L), proporcionando una medida cuantitativa de qué tan cercana es su morfología a una forma esférica. Valores de IR igual a 1 indican que la semilla es perfectamente circular o esférica, es decir, que el ancho y el largo son prácticamente iguales; mientras que valores menores a 1 indican que la semilla presenta una forma elíptica, ovoide o alargada, debido a que el largo supera al ancho.

7.3 Germinación *in vitro* de semillas de *P. juliflora*

7.3.1 Determinación de curva de imbibición

Para la realización de esta actividad, se seleccionaron 20 semillas viables (sin daños físicos visibles) por zona de colecta utilizando 10 semillas para cada tratamiento. Seguido, se limpiaron de forma manual con la finalidad de eliminar residuos de pericarpio e impurezas.

El peso inicial (peso seco) de cada semilla se registró utilizando una balanza analítica. Posteriormente, dichas semillas se colocaron en frascos con 50 mL de agua destilada y se retiraron en diferentes intervalos de tiempo establecidos para tomar peso húmedo (0 h, 3 h, 6 h, 12 h, 24 h, 27 h y 30 h).

Previo al registro del peso de las semillas en diferentes tiempos de imbibición se retiró el exceso de humedad utilizando papel absorbente.

7.3.2 Ensayo de viabilidad

Para determinar la viabilidad se utilizó el test de tetrazolio. Semillas de mezquite, sin presencia de daños físicos tales como perforaciones o malformaciones. Seguido, se colocaron en agua destilada durante un lapso de 24 h. Transcurrido dicho periodo, cada semilla se seccionó longitudinalmente utilizando un bisturí asegurándose dejar expuesto al embrión y en contacto directo con el reactivo de tetrazolio al 1%. Enseguida se colocaron las semillas en cajas Petri y a cada muestra se le añadió 1 μ L de tetrazolio, cubriendo completamente los tejidos. Realizado lo anterior, cada caja Petri se llevó a condiciones de oscuridad utilizando papel aluminio y se incubó a temperatura ambiente con un periodo de 1 a 4 h.

Transcurrido dicho periodo se realizó el análisis de las semillas bajo un estereoscopio (AC100-240V 50/60 hz), para determinar la viabilidad de los embriones basados en la coloración rosada de los mismos.

7.3.3 Escarificación mecánica

Semillas de las diferentes de mezquite sin daños físicos ni malformaciones visibles y desprovistas de restos de pericarpio e impurezas fueron seleccionadas para la presente actividad.

Se evaluaron dos tratamientos de escarificación, el tratamiento T1, para escarificación mecánica mediante lijado de testa con lija 80 y tratamiento T2 para escarificación mecánica mediante lijado de testa con lija 360. Cada tratamiento conto con 2 repeticiones de 10 semillas.

La escarificación se realizó mediante lijado manual de la testa por ambos lados de las semillas, evitando le remoción completa de la misma, evitando exponer al embrión y asegurando lijados uniformes. Al término de ambos tratamientos de lijado las semillas se llevaron a imbibición durante 24 h.

7.3.4 Desinfección de semillas escarificadas

Las semillas previamente escarificadas y sometidas al proceso de imbibición se sometieron a tres lavados con agua destilada estéril para iniciar el proceso de desinfección. En campana de flujo laminar, se colocaron en una solución de hipoclorito de sodio comercial al 2% provisto de 3 a 5 gotas de tween 20 durante 10 minutos. Posteriormente, se transfirieron a etanol al 70% durante 1 minuto para favorecer la penetración del desinfectante y eliminar los restos de cloro y detergente. Seguido las semillas se enjuagaron tres veces consecutivas con agua destilada estéril para eliminar residuos químicos y se dejaron en hidratación toda la noche en agua destilada estéril a temperatura ambiente. Finalmente, transcurrido dicho periodo, se sometieron a una segunda desinfección utilizando una solución de hipoclorito de sodio al 2% durante 5 minutos y se enjuagaron de 3 a 5 veces con agua destilada estéril y se colocaron sobre papel absorbente estéril durante 20 minutos antes de su siembra *in vitro* en medio agar-agua.

7.3.5 Germinación *in vitro* de semillas de *P. juliflora*

Para el establecimiento y germinación *in vitro* de las semillas de mezquite de los diferentes sitios de colecta, previamente desinfectadas se utilizó el medio de cultivo agar-agua. Dicho medio se preparó utilizando agua destilada suplementada con agar bacteriológico a una concentración de 6.5 g/L y Plant Preservative Mixture (PPM) a 1 mL⁻¹. La mezcla se agitó hasta la completa disolución del agar y posteriormente se esterilizó en autoclave a 121°C durante 15 minutos. Una vez esterilizado, el medio se vertió en placas Petri en una campana de flujo laminar y se dejó solidificar a temperatura ambiente.

Posteriormente, las semillas escarificadas y desinfectadas, fueron colocadas individualmente sobre la superficie del medio sólido asegurando de no romper el mismo. Las placas se sellaron y se llevaron a cuarto de crecimiento, donde se mantuvieron bajo condiciones de oscuridad para determinar porcentajes de germinación *in vitro* de las semillas.

7.4 Establecimiento de un banco de germoplasma ex vitro de *P. juliflora*

7.4.1 Preparación de sustrato

La preparación del sustrato estéril se realizó, utilizando una mezcla homogénea de peat moss y perlita en proporción 1:1, con el fin de garantizar adecuada aireación, retención de humedad y drenaje del mismo. El sustrato fue esterilizado en autoclave a 121 °C durante 15 minutos y se dejó enfriar a temperatura ambiente para su posterior uso.

7.4.2 Germinación ex vitro de semillas de mezquite

Semillas sometidas previamente a un proceso de imbibición en agua destilada durante 24 horas a temperatura ambiente fueron utilizadas para el desarrollo de la presente actividad.

Se sembraron en el sustrato estéril (húmedo) a una profundidad aproximada de 1 a 2 cm, manteniendo una distancia adecuada entre ellas para evitar que sus raíces se cruzaran y/o se dañaran.

Cuando las plántulas alcanzaron aproximadamente de 8 a 10 cm de altura y presentaron al menos dos hojas verdaderas, se procedió a su individualización en vasos térmicos de 1 L de capacidad. Estos recipientes fueron previamente perforados en la base para permitir el drenaje y suplementados con el mismo tipo de sustrato estéril. El trasplante se realizó evitando daños en el sistema radical y asegurando que la raíz quedara correctamente extendida y cubierta.

Finalmente, se llevó a cabo un proceso de aclimatación gradual. Inicialmente, las plantas se mantuvieron cubiertas con un vaso invertido transparente que actuó como cámara húmeda para conservar alta humedad relativa. Posteriormente, se realizaron pequeños orificios en el vaso de cobertura, incrementando progresivamente su tamaño con el fin de permitir un intercambio gradual de aire y reducir la humedad relativa de manera controlada. Este procedimiento favoreció la adaptación de las plántulas a condiciones ambientales externas, evitando estrés hídrico. Una vez completada la aclimatación, las plantas se mantuvieron bajo sombra parcial antes de su exposición total al ambiente, consolidando así el establecimiento del banco de germoplasma ex vitro.

VIII. RESULTADOS

8.1 Colecta de material biológico

Las zonas de colecta del material vegetal se muestran en la Tabla 4. Los ejemplares colectados en los diferentes sitios de colecta presentaron porte arbóreo, con alturas variables que oscilaban entre los 2 y 8 m, copa amplia e irregular, y ramificación abundante desde baja altura. Sus troncos presentaban corteza rugosa, fisurada y de con tonalidades pardo-grisácea. Las hojas se observaron compuestas, bipinnadas, con folíolos pequeños de color verde claro a verde grisáceo y espinas axilares. Las vainas (legumbres) colgantes, presentaban formas lineales a

ligeramente curvada y coloración amarillenta a café claro en su etapa de madurez (Figura 3).

Tabla 4. Sitios de colecta de frutos de mezquite.

Punto de colecta	Ciudad	Coordenadas geográficas de identificación
UNISON	Zona 1: Agua Dulce, Guaymas	28°18'26.0"N, 111°14'05.0"W
	Zona 2: Mora del Carmen, Costa de Hermosillo	28°54'56.0"N, 111°33'12.0"W
	Zona 3: Escuela de Agricultura, Costa de Hermosillo	29°00'52.0"N, 111°08'01.0"W
	Zona 4: Desierto del León, Pesqueira	29°24'48.0"N, 110°58'48.0"W
	Zona 5: Ciudad de Hermosillo, Hermosillo	29°08'18.0"N, 110°48'11.0"W
GUAMÚCHIL	Zona 6: San isidro, Guamúchil	25°25'55.6"N 108°06'39.8"W

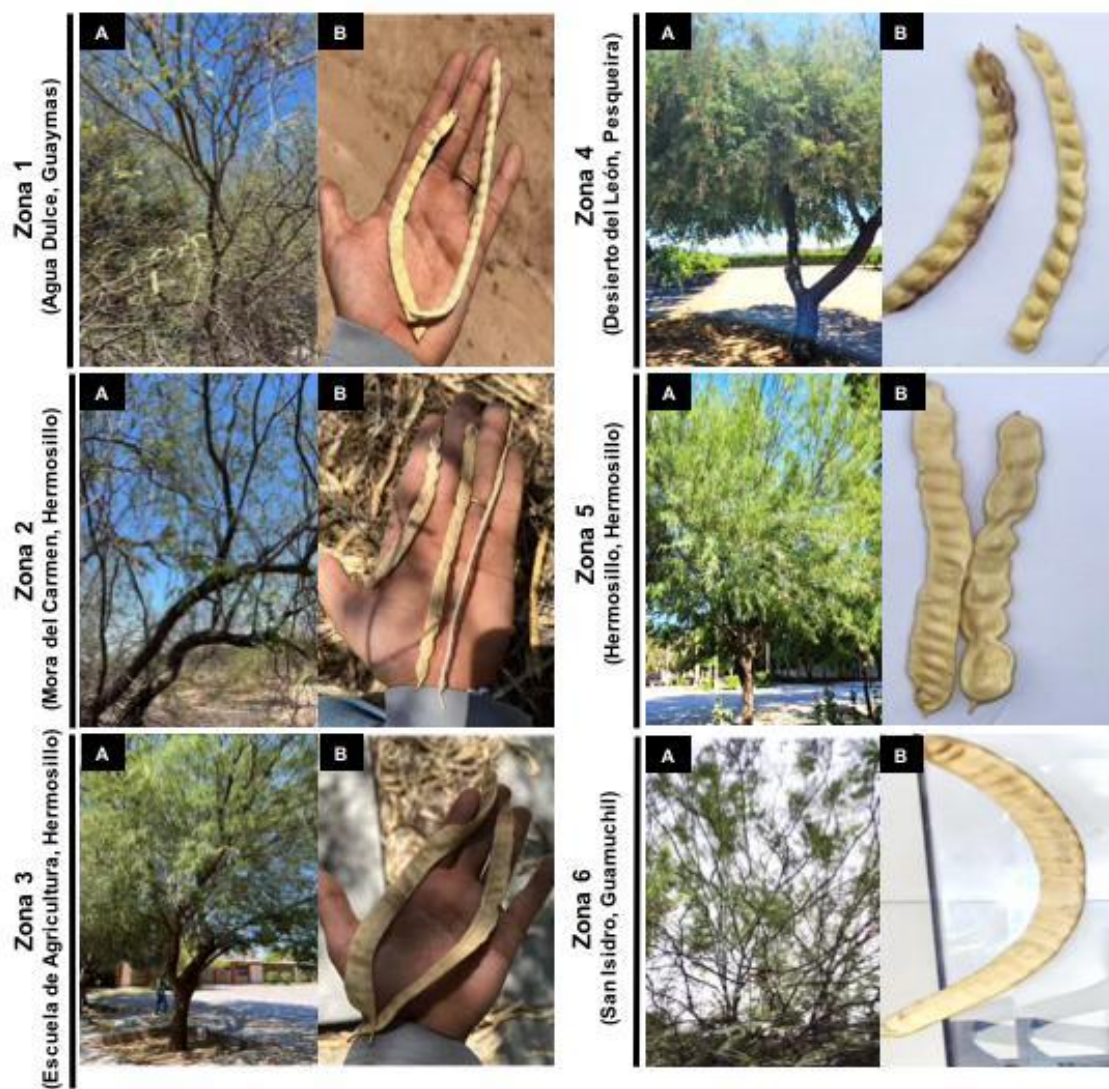


Figura 3. Colecta de frutos maduros de *P. juliflora* en las diferentes localidades.
(A) Árbol; (B) Vainas.

8.2 Caracterización morfométrica de las vainas maduras de *P. juliflora*

El análisis morfométrico de los frutos de mezquite evidenció la existencia de variación entre los tres puntos de colecta (UNISON, Hermosillo y Guamúchil). En relación con el largo de vaina (Figura 4A), fue mayor en el punto UNISON con un valor de 16 cm, seguido de Guamúchil con un tamaño de 15 cm, mientras que Hermosillo registró los valores más bajos los cuales ascendieron a 13 cm. En el ancho de vaina (Figura 4B), las diferencias observadas fueron menos marcadas; no obstante, Guamúchil mostró ligeramente los promedios más altos.

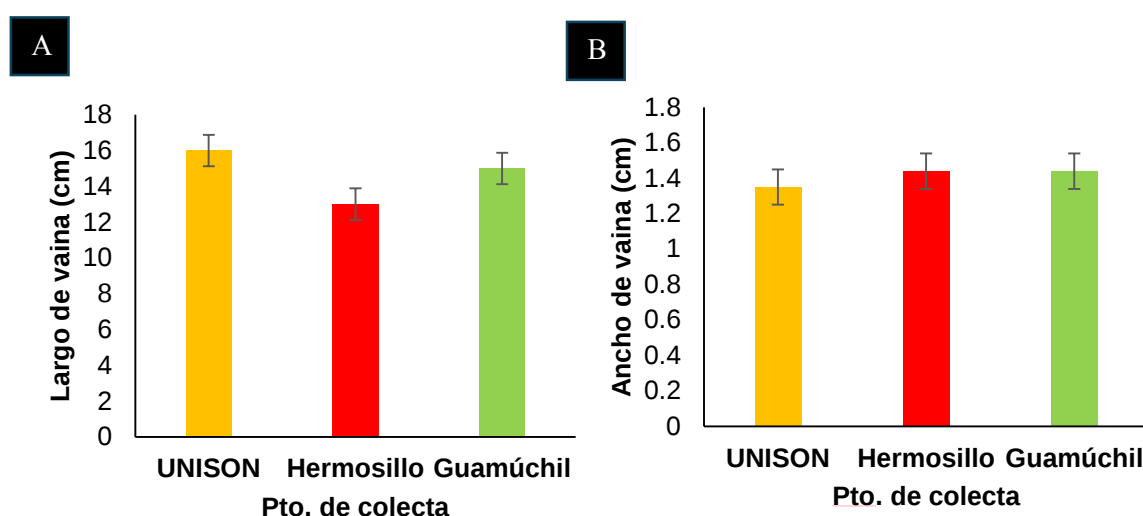


Figura 4. Análisis de largo y ancho de vainas de mezquite. (A) Promedios de largo de vaina; (B) Promedio de ancho de vaina.

En relación al número de semillas por vaina (Figura 5), Guamúchil destacó con 19 semillas en promedio, seguido de Hermosillo 15 semillas y, finalmente, UNISON con un promedio de 10 semillas.

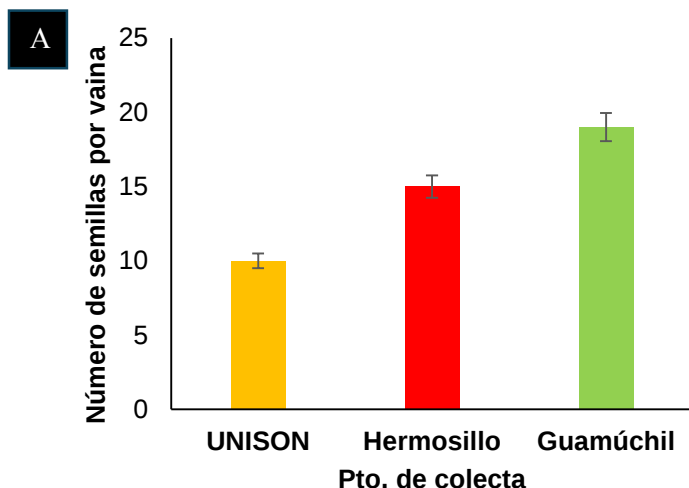


Figura 5. Determinación de número de semillas en las vainas de mezquite de los diferentes puntos de colecta.

Respecto a las dimensiones de las semillas, tanto el ancho como el largo (Figura 6 A y B), fueron superiores en las zonas de colecta de UNISON y Hermosillo, en comparación con los de Guamúchil, el cual presentó los valores más bajos los cuales fueron de 6.7 y 4.4 mm. En conjunto, los resultados indican la presencia de diferencias morfométricas entre las poblaciones analizadas, lo que sugiere una posible variabilidad intraespecífica asociada al origen geográfico donde se desarrollan las plantas de mezquite evaluadas.

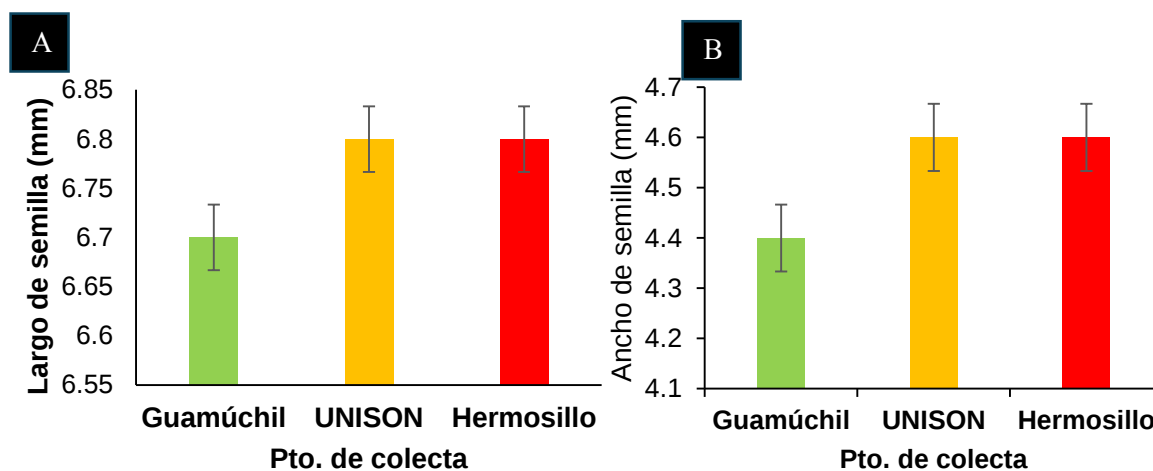


Figura 6. Análisis de largo y ancho de semillas de vainas de mezquite. A) Promedios de ancho de semilla; (B) Promedio de largo de semilla.

8.2.1 Índice de Redondez de las semillas de mezquite

Como resultado del análisis del IR, se observó una ligera variación entre los puntos de colectas. Hermosillo y UNISON presentaron valores muy similares, lo que sugiere una estabilidad en la forma de la semilla entre estas poblaciones. Es relevante destacar que, en todos los casos, los valores de IR fueron inferiores a 1, lo que permite interpretar que las semillas evaluadas presentan predominantemente formas elípticas u ovoides, con tendencia a ser más largas que anchas.

8.3 Germinación *in vitro* de semillas de *P. juliflora*

8.3.1 Curva de Imbibición

En el ensayo de imbibición de las semillas de *P. juliflora* se presentó un incremento progresivo en el peso fresco de las mismas, en función del tiempo de hidratación. Desde las primeras 3 h, se observó un aumento con respecto al peso seco inicial (0 h), lo que evidenció una rápida absorción de agua en la fase inicial del proceso de imbibición. Entre las 6 y 12 h, el incremento de peso continuó de manera gradual y consistente en las semillas procedentes de todos los sitios evaluados.

El mayor aumento de peso se registró a las 24 h de imbibición, destacando las semillas provenientes de Guamúchil, las cuales alcanzaron el valor más alto de peso fresco en comparación con los otros sitios de colecta mismo que ascendió a 0.52 g. Posteriormente, a las 27 y 30 h, el peso mostró una tendencia a la estabilización, lo que sugiere una disminución en la tasa de absorción de agua al aproximarse a un punto de saturación hídrica (Figura 7).

En términos generales, todas las semillas presentaron similar respuesta positiva al proceso de imbibición; no obstante, se detectaron diferencias en la cantidad de agua absorbida entre los sitios de colecta. El mayor incremento correspondió a las semillas provenientes de Guamúchil 0.26 ml, seguido por Hermosillo y Universidad de Sonora (UNISON) con 0.12 mL y 0.11 mL respectivamente, lo anterior sugiere una posible variación en las características fisiológicas o estructurales de las semillas asociadas a su origen geográfico.

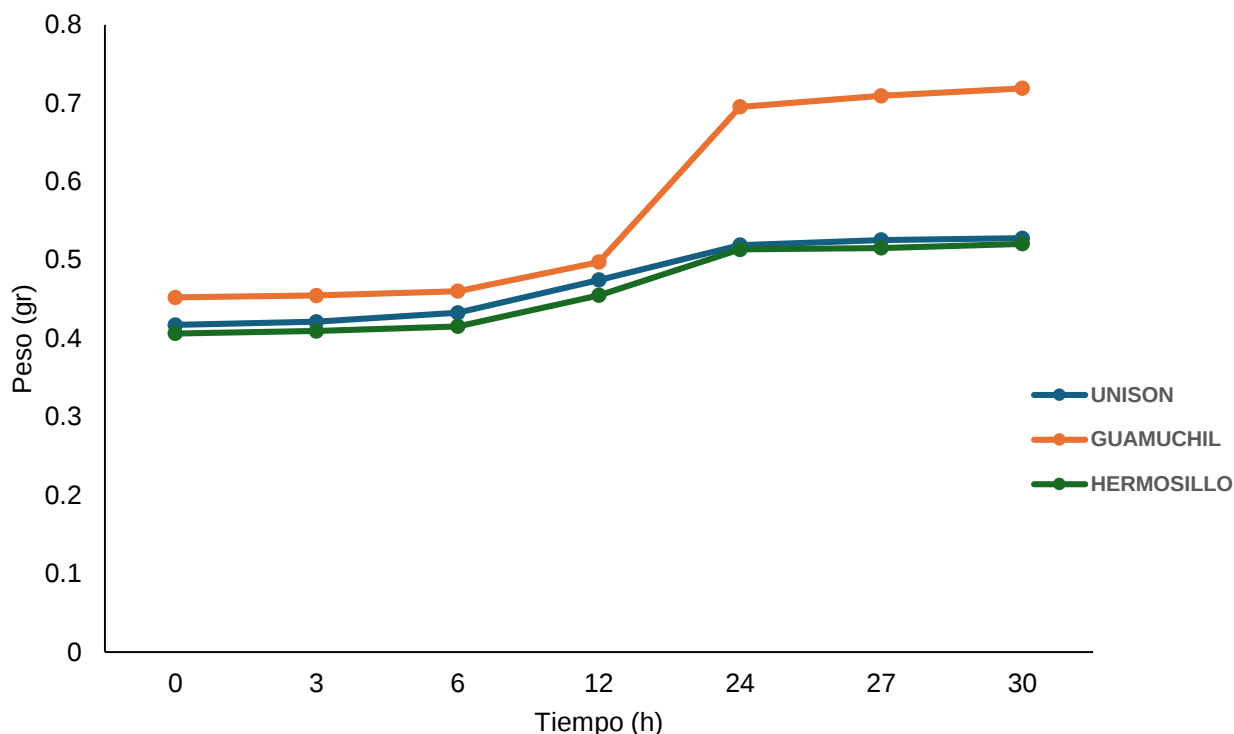


Figura 7. Curva de imbibición de semillas de *P. juliflora*.

8.3.2 Determinación de viabilidad de semillas

Como resultado del análisis de viabilidad mediante el test de tetrazolio se evidenció que el 100% de las semillas evaluadas en los tres sitios de colecta (Universidad de Sonora (UNISON), Guamúchil y Hermosillo), presentaron tinción rosada uniforme del embrión, como se muestra en la Figura 8. Esta coloración es indicativa de actividad enzimática asociada a la respiración celular, lo que confirma la integridad de los tejidos embrionarios y, por consiguiente, la viabilidad de las semillas para su germinar.

No se observaron embriones sin tinción ni con patrones de coloración heterogéneos que sugirieran deterioro fisiológico o pérdida de viabilidad.

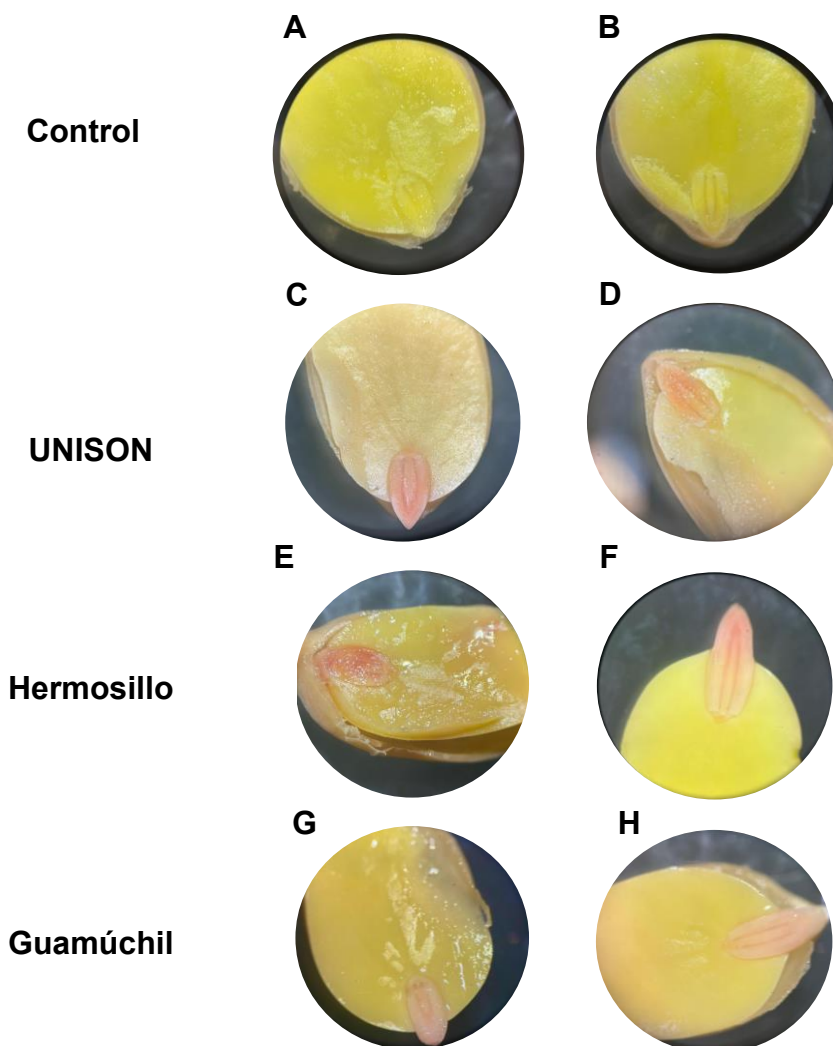


Figura 8. Análisis de viabilidad de embriones de mezquite mediante el test de tetrazolio en semillas.

En conjunto, los resultados demuestran que el material vegetal colectado se encontraba en condiciones fisiológicas óptimas al momento del análisis. Cabe señalar que las semillas de *Prosopis juliflora* presentan testa dura e impermeable, característica asociada a latencia física; por ello, la hidratación previa y la realización de un corte para exponer el embrión resultaron procedimientos esenciales para permitir la penetración del reactivo y obtener una tinción óptima en el test de tetrazolio.

8.3.3 Germinación *in vitro* de semillas de *P. juliflora*

En relación a la germinación *in vitro* de las semillas se observó que los tratamientos de escarificación, desinfección y germinación *in vitro* fueron altamente efectivos. En el tratamiento T1 de escarificación (lija grano 80), se presentó una germinación *in vitro* del 70% es decir, 14 semillas para el punto de colecta de Guamúchil, mientras que para UNISON y Hermosillo los porcentajes de germinación fueron del 60 % (12 semillas) y 50 % (10 semillas), respectivamente (Tabla 5). En contraste, el tratamiento T2 (lija grano 360), mostró porcentajes de germinación *in vitro* superiores en los tres sitios evaluados, con 18 semillas germinadas es decir un 90% para Guamúchil, 16 semillas (80%) para UNISON y 15 semillas (75%) en el caso de las provenientes de Hermosillo.

Tabla 5. Germinación *in vitro* tras tratamientos de escarificación y desinfección de semillas de *P. juliflora*.

Tratamiento escarificación	Punto de Colecta	No. semillas desinfectadas	No. semillas germinadas	Germinación <i>in vitro</i> (%)
Lija grano 80	Guamúchil	20	14	70
	UNISON		12	60
	Hermosillo		10	50
Lija grano 360	Guamúchil	20	18	90
	UNISON		16	80
	Hermosillo		15	75

De manera general, la escarificación con lija grano 360 incrementó la germinación en comparación con la lija grano 80 en todos los sitios de colecta. Estos resultados indican que una escarificación mecánica más fina y superficial favorece la ruptura de la dormancia física característica de la especie sin ocasionar daños significativos al embrión, lo que se refleja en mayores porcentajes de germinación como se puede

observar en la Figura 9. En contraste, el lijado con lija grano 80, aunque efectivo para debilitar la testa, presenta valores de germinación inferiores, posiblemente debido a un adelgazamiento más agresivo que pudo comprometer parcialmente la integridad embrionaria o aumentar la susceptibilidad de las semillas a los agentes desinfectantes utilizados durante el proceso de desinfección.

Asimismo, se observó que el sitio de colecta influyó en la respuesta germinativa, siendo Guamúchil el sitio con mayores porcentajes en ambos tratamientos, seguido de UNISON y Hermosillo, lo que sugiere de igual manera una posible variabilidad fisiológica asociada al origen de los materiales biológicos.

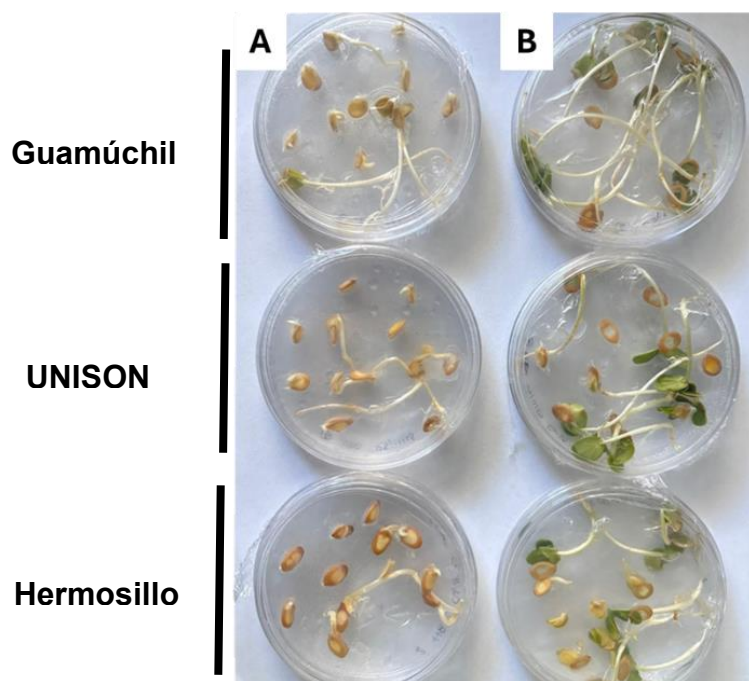


Figura 9. Germinación *in vitro* de semillas de *P. juliflora*. (A) Lija grano 80; (B) Lija grano 360

8.4 Establecimiento de un banco de germoplasma ex vitro de *P. juliflora* (Swartz) del noroeste de México.

Al término de la siembra de las semillas de mezquite de los diferentes puntos de colecta en sustrato húmedo, a una profundidad aproximada de 1 a 2 cm, la emergencia de las plántulas de *Prosopis juliflora* se presentó de manera uniforme y sincrónica a los 10 días post siembra. Posteriormente, la individualización en vasos térmicos con capacidad de 1 L, favoreció el desarrollo adecuado del sistema radical, al reducir la competencia intraespecífica por espacio y recursos. Seguido del trasplante, no se observaron signos severos de marchitez o síntomas evidentes de estrés post-trasplante, lo que indicó una manipulación adecuada y una correcta adaptación inicial al nuevo sustrato (Figura 10).

Durante la fase de aclimatación gradual, las plántulas mantuvieron turgencia foliar y crecimiento activo. La disminución progresiva de la humedad relativa, mediante la perforación controlada del vaso de cobertura, permitió una transición paulatina hacia condiciones ambientales ex vitro, minimizando el choque hídrico y optimizando la aclimatación. Finalmente, las plantas continuaron mostrando crecimiento sostenido y estabilidad fisiológica desarrollando nuevas hojas verdaderas, lo anterior nos permitió establecer exitosamente el banco de germoplasma ex vitro de *P. juliflora* procedente del noroeste de México (Figura 11).



Figura 10. Germinación en sustrato de *P. juliflora*. (A) Siembra de semilla en sustrato; (B) Plántulas; (C) Individualización de plantas.

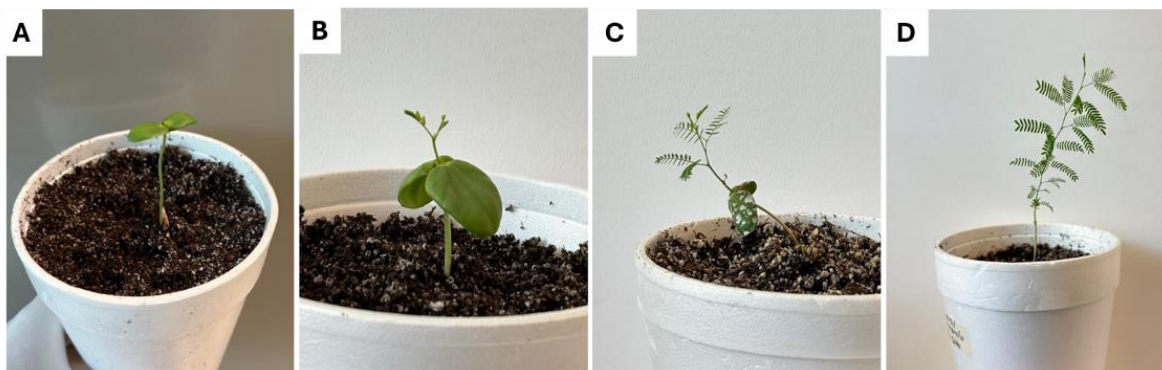


Figura 11. Proceso de Aclimatación gradual de plantas de *P. juliflora* para establecimiento de banco de germoplasma en sustrato. (A) Plántula con diez DPG; (B) Plántula de 4 semanas de crecimiento y desarrollo de primeras hojas verdaderas; (C) Planta con 10 semanas de crecimiento y cinco hojas verdaderas; (D) Planta completamente aclimatada con 15 semanas de crecimiento y doce hojas verdaderas.



En términos comparativos, el mayor porcentaje de germinación ex vitro se registró en las semillas de los frutos colectados en Guamúchil la cual asecendió al 90%, mientras que las semillas provenientes de las colectas realizadas en UNISON y Hermosillo, presentaron valores ligeramente inferiores pero equivalentes entre sí (80%). Estos resultados evidencian una alta capacidad germinativa en los tres sitios de colecta, con variaciones mínimas atribuibles al origen del material vegetal. De igual manera, respaldan la efectividad de las metodologías desarrolladas e implementadas en la presente investigación.

IX. DISCUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente estudio demuestran que la escarificación mecánica influye significativamente en la germinación *in vitro* de *Prosopis juliflora*, observándose mayores porcentajes cuando se utiliza lija grano 360 (75 – 90%) en comparación con lija grano 80 (50 – 70%). Esto confirma que la ruptura de la dormancia física en esta especie depende del grado de abrasión aplicado a la testa, permitiendo la entrada de agua sin comprometer la integridad del embrión.

Al comparar estos resultados con los reportados por González Domínguez et al., 2024, se observa que dichos autores lograron obtener un 100% de germinación, utilizando lija grado 80 seguida de imbibición durante 24 horas, así como con tratamiento químico con H_2SO_4 (ácido sulfúrico) concentrado durante 15 minutos combinado con corte apical de las semillas. En contraste, en el presente trabajo la escarificación mecánica de las semillas con la lija 80, no alcanzó porcentajes máximos de germinación, lo que podría atribuirse a diferencias en la intensidad del lijado manual, el origen del material vegetal o variabilidad genética entre poblaciones de *P. juliflora*.

Es importante destacar que, aunque el estudio citado reporta que la lija 80 fue altamente efectiva, en esta investigación la lija 360 mostró mejores resultados. Lo anterior, sugiere que una abrasión más fina y controlada puede ser suficiente para romper la impermeabilidad de la cubierta seminal, sin generar daños estructurales que afecten la viabilidad o el desarrollo inicial del embrión. La diferencia también puede explicarse por el tamaño de muestra, el número de repeticiones o las condiciones ambientales previas a la colecta de las semillas.

Asimismo, Gonzáles Domínguez et al., 2024 mencionan que la combinación de escarificación mecánica y tratamiento químico permite alcanzar la máxima germinación, aunque señalan que el uso de H_2SO_4 implica riesgos por su carácter altamente corrosivo. En este sentido, los resultados del presente estudio son relevantes, ya que demuestran que es posible obtener altos porcentajes de germinación de hasta un 90% mediante un método exclusivamente mecánico,

evitando el uso de agentes químicos agresivos y favoreciendo un protocolo más seguro, económico y fácil de aplicar.

Por otra parte, las variaciones observadas entre los puntos de colecta, es decir, (Guamúchil, Unison y Hermosillo) indican que el origen geográfico puede influir en la respuesta germinativa, posiblemente debido a diferencias en condiciones ambientales, grado de madurez fisiológica de las semillas o características genéticas propias de cada población. Este comportamiento coincide con lo señalado en la literatura, donde se reconoce que la variabilidad intraespecífica puede modificar la respuesta a tratamientos pregerminativos.

En conjunto, los resultados confirman que la escarificación mecánica es un método eficaz para promover la germinación *in vitro* de *Prosopis juliflora*, y que el grado de abrasión aplicado a la testa es un factor determinante en el éxito del establecimiento. Además, el uso de lija 360 representa una alternativa viable y menos agresiva que otros métodos físicos o químicos reportados en la literatura.

X. CONCLUSIONES

La presente investigación permitió cumplir satisfactoriamente con el objetivo de realizar la caracterización morfométrica y establecer un banco de germoplasma ex vitro de *Prosopis juliflora* procedente del noroeste de México, generando información relevante acerca de la variabilidad morfológica y la respuesta germinativa de la especie en la región.

La caracterización de frutos y semillas evidenció variaciones morfométricas entre los distintos sitios de colecta, lo que sugiere la posible influencia de factores edafoclimáticos, así como la existencia de diferenciación genética entre poblaciones. Estos resultados confirman la presencia de variabilidad intraespecífica, elemento clave para la adaptación y permanencia de la especie en ambientes áridos y semiáridos.

Se logró establecer un protocolo eficiente de germinación *in vitro*, mediante escarificación mecánica, con lija grano 360, obteniendo altos porcentajes de germinación sin comprometer la viabilidad embrionaria.

Finalmente, el banco de germoplasma ex vitro generado representa una herramienta estratégica para la conservación de la variabilidad genética regional de *P. juliflora*, así como un recurso de valor para futuros programas de restauración ecológica, reforestación, mejoramiento y aprovechamiento agroindustrial del mezquite en el noroeste de México.

XI. RECOMENDACIONES

Derivado de los resultados obtenidos en la presente investigación y la información recopilada, se considera importante:

- Monitorear el desarrollo a mediano y largo plazo del banco de germoplasma para así llevar un seguimiento al crecimiento, supervivencia y estabilidad fisiológica de las plantas establecidas en el banco ex vitro, con el fin de evaluar su desempeño en etapas posteriores y su posible transferencia a campo.
- Evaluar tratamientos pre germinativos adicionales, para comparar su efectividad y optimizar aún más los protocolos de germinación establecidos.
- Evaluar el potencial productivo y agroindustrial, considerando el valor nutricional de las vainas de *Prosopis juliflora*, desarrollando investigaciones enfocadas en la caracterización fisicoquímica y funcional de sus harinas de frutos de mezquite, así como en la formulación de productos alimentarios, lo anterior podrá contribuir con el aprovechamiento más sustentable de la especie.

XII. BIBLIOGRAFÍA

- Batista Roche, L. G., & Huera Ocampo, J. Á. (17 de abril de 2023). Mezquite: una planta alergénica de relevancia clínica en México. *SciELO*(24). doi:<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2021.390>
- Fortoul, R. d. (2020). *Uso del mezquite (Prosopis spp.) como recurso alimenticio*. Queretaro: Handbooks-©ECORFAN.
- Gonzáles Domínguez, J. G., Pérez Alvarez, S., Rivas Lucero, B., perez, A., & Anzures, D. (2024). Escarificación y establecimiento *in vitro* de semillas de mezquite. *Biológico Agropecuaria*.
- Maciel de Melo Cavalcante, A., Maciel de Melo , A., Ferreira da Silva, A., da Silva Neto, G., Turola Barbi, R., Benatti Silva, G., & Soares da Silva, O. (2022). Harina de grano de mezquite (*Prosopis juliflora*): Nuevo ingrediente con propiedades bioactivas, nutricionales y fisicoquímicas para aplicaciones alimentarias. *ELSEVIER*, 1-9. Obtenido de <https://pdf.sciencedirectassets.com/777840/1-s2.0-S2666833521X00032/1-s2.0-S2666833522000028/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEFlaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIFseCNnFfX4qPu78BSPWjGX9%2FXDqkDnrNZOPLHTDhb2RAiEAtOKrb87JjDL6LwMZVSvLzvnm4IP2dOA99QDazGr8fm>
- Montañez Valdez, O. D., Reyes Gutiérrez, J. A., Ley de Coss, A., Vicente Perez, R., Gomez Vázquez , A., & Guerra Medina , C. (2021). Composición química y degradación ruminal de la vaina de mezquite (*Prosopisspp.*) a diferente estado de madurez. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 1-8. Obtenido de <https://era.ujat.mx/rera/es/article/view/2857/1498>
- Palacios, R. A. (2006). Los Mezquites Mexicanos: Biodiversidad y Distribución Geográfica. *SciELO*. Obtenido de https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-23722006000100010

- Reyes, M. R. (2017). *Desarrollo de producto a partir de harina de vaina de Mezquite (Prosopis sp.) para las comunidades de San Cristóbal Acasaguastlán, El Progreso*. Obtenido de Universidad del Valle de Guatemala: <https://repositorio.uvg.edu.gt/entities/publication/62d70db3-62d6-48bb-aacc-85f4b16feaf6>
- Ribazki, J. (2014). *EMBRAPA - Centro de Investigación Forestal*. Obtenido de Potencial del Algarrobo (*Prosopis juliflora*) en sistemas silvopastoriles en el semiárido de Brasil: <https://www.fao.org/4/y4435s/y4435s0c.htm>
- Ríos Saucedo, J. C., Trucíos Cacicano, R., Valenzuela Núñez, L. M., Sosa Pérez, G., Rosales Serna, R., & Cueto Wong, J. A. (2011). Importancia de las poblaciones de mezquite en el norte-centro de México. En *Importancia de las poblaciones de mezquite en el norte-centro de México* (pág. 230). Progreso N°. 5, Barrio de Santa Catarina, Delegación Coyoacán: CENID-RASPA.
- Rodríguez Saucedo, E., Rojo Martínez, G., Ramírez Valverde, B., Martínez Ruiz, R., Cong Hermida, M., Medina Torres, S., & Piña Ruiz, H. (2014). ANÁLISIS TÉCNICO DEL ÁRBOL DEL MEZQUITE (*Prosopis laevigata* Humb. & Bonpl. ex Willd.) EN. *Ra Ximhai*, 173-193. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/461/46131111013.pdf>
- Rodriguez, R. C. (Octubre de 2009). *CARACTERISTICAS DEL MEZQUITE (PROSOPIS JULIFLORA) Y SU USO EN LA GANADERIA Y REHABILITACIÓN DE PASTIZALES*. Obtenido de UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/6106/CARACTERISTICAS%20DEL%20MEZQUITE%20%28PROSOPIS%20JULIFLORA%29%20Y%20SU%20USO%20EN%20LA%20GANADERIA%20Y%20REHABILITACI%3%93N%20DE%20PASTIZALES.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Arria>
- Rubén, D. G. (31 de Agosto de 2020). *CONABIO*. Obtenido de Enciclovida. *Prosopis Juliflora*: <https://enciclovida.mx/especies/171791-Prosopis-juliflora>

Sánchez, D. M. (2015). Evaluación de la Forma, Redondez, Esfericidad y Ecuantidad en granos comerciales de maíz amarillo duro (*Zea mays* L.) y arveja (*Pisum sativum*). Lima, Perú.

Sharifi Rad, J., Kobarfard, F., Ata, A., Khosravi Dehaghi, N., Kumar Jugran, A., Kostic, A., . . . Sharopov, F. (2019). Composición química y atributos farmacológicos de la planta *Prosopis* : Orientación de los estudios clínicos a partir de la evidencia preclínica. *Biomolecules*, 46. doi:10.3390/biom9120777

Silva, A. B., Chavez, G., Cabral, P., Suzanne, K., Da silva, F., & Ribeiro, P. (2023). *Prosopis juliflora* : valor nutricional, actividad bioactiva y posible aplicación en la nutrición humana. *Journal of the science of food and agriculture*, 5659-5666.