

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE
INGENIERO FORESTAL



Ensayo de Tres Procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini: Supervivencia,
Crecimiento y Proporción Sexual tras 22 Años en Mesa de Las Tablas, Arteaga,
Coahuila

Por:

SEBASTIAN FLORES PEREZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México
Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE
INGENIERO FORESTAL

Ensayo de Tres Procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini:
Supervivencia, Crecimiento y Proporción Sexual tras 22 Años en Mesa de Las
Tablas, Arteaga, Coahuila

Por:

SEBASTIAN FLORES PEREZ

TESIS

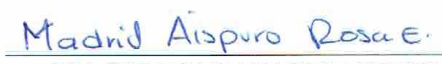
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada por el Comité Asesor:


DR. CELESTINO FLORES LOPEZ
Asesor Principal


DR. ELADIO HERIBERTO CORNEJO OVIEDO
Coasesor


DRA. ROSA ELVIRA MADRID AISPURO
Coasesor


DR ALBERTO SANDOVAL RANGEL
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México
Junio 2026

Derechos de Autor y Declaración de no plagio

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

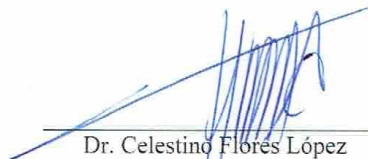
Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo tengo conocimiento de cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.



Sebastián Flores Pérez

Autor principal



Dr. Celestino Flores López

Asesor principal

El presente trabajo de tesis ha sido financiado y apoyado por el Proyecto de Investigación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, con clave 38111-425103001-2173, Producción de semilla e indicadores reproductivos de pináceas y agaváceas del norte de México. Proyecto que está a cargo del Dr. Celestino Flores López, Profesor-Investigador del Departamento Forestal.

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a mi madre Martha Leticia Flores Pérez porque gracias a ella, a sus enseñanzas, consejos y regaños, soy la persona que ahora soy. Estoy seguro que, sin su apoyo y formación, nunca habría llegado hasta este punto de mi vida. De ella aprendí que las metas se alcanzan con esfuerzo, dedicación y perseverancia, y que cada acción, buena o mala, tendrá sus consecuencias. También me enseñó el valor de la vida, que hay que disfrutar cada segundo, ya sean momentos buenos o malos, porque al final lo más valioso que conservamos son los recuerdos compartidos con nuestros seres queridos; por eso hay que disfrutar cada momento, cada abrazo, cada pelea o cada regaño, porque llega un punto en el que hasta eso se extraña.

A Dios por todo lo que me ha dado; tal vez a veces pienso en lo que no tengo o me hace falta, pero muy pocas veces me detengo a pensar en lo bendecido y afortunado que soy por tener una familia que me quiere y apoya. A mis hermanos Lorena y Alam Gael, por el cariño que me tienen; a mi sobrina Frida, que es ese rayito de luz que ilumina mi ser; a mis tíos Erick y David, por sus sabios consejos, además de fortalecer mi gusto por el campo e inspirarme a elegir una carrera relacionada con la agronomía; a mi tía Celia y mis primas Joyreth, Eva María y Sayuri, que me brindan su apoyo incondicional; y a mis abuelos Dionisio Flores Hernández y Evarista Pérez Escalona, que me cuidan desde el cielo.

A la mejor universidad de agronomía de México, la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por darme la oportunidad de estudiar en sus magníficas instalaciones y que cada momento que pase aquí me ayudó a formarme como profesionista. A mis grandes amigos de la universidad, que me hicieron pasar buenos momentos, me enseñaron a trabajar en equipo y fueron parte fundamental en mi tiempo en la universidad.

AGRADECIMIENTOS

A la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO, por haber sido una segunda casa para mí, por todas las oportunidades que nos brinda, internado, comedor y las valiosas prácticas de campo que me relacionaron mucho con el sector laboral.

Al Departamento Forestal, por darme la oportunidad de aprender de los mejores maestros, de los cuales, de todos, me llevo valiosas enseñanzas tanto académicas como personales. Al Dr. Celestino Flores López, por ser un gran maestro, por su apoyo, paciencia y por haberme dado la oportunidad de realizar tesis con él. Al Dr. Eladio Heriberto Cornejo Oviedo y a la Dra. Rosa Elvira Madrid Aispuro por su ayuda y consejos durante mi proceso de elaboración de tesis.

A mi madre, Martha Leticia Flores Pérez, principalmente por darme la vida, por educarme y siempre inspirarme a cumplir mis sueños.

A mis mejores amigos de la carrera, Miguel Ángel López Blancas, Leonel Rocha Ramos, Carina Itzel Rico Cruz y Merced Martínez Gallardo, por compartir valiosos momentos durante clases, prácticas, etc. A mis mejores amigos de universidad, Gabriel Cuevas Ortega, Delfino Flores Carvajal y Jaziel Gonzales, por pasar grandes momentos en la universidad y por haberme ayudado en el levantamiento de datos de mi tesis. A mis compañeros de cuarto Alejandro Monroy, Adal Martínez, Brandon Martínez y Heriberto Miranda por hacer más amena mi vida de foráneo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos e hipótesis	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1. Características biológicas y ecológicas de <i>Pinus johannis</i>	5
2.2. Crecimiento y adaptación de <i>Pinus johannis</i>	6
2.3. Estudios sobre <i>Pinus johannis</i>	7
2.4. Estudios comparativos de crecimiento en <i>Pinus johannis</i>	8
2.5. Metodología en ensayos de procedencia.....	8
2.6. Ensayos de procedencia en especies forestales	9
2.7. Factores ambientales y crecimiento en ensayos de procedencias	9
2.8. Proporción sexual en coníferas.....	10
2.9. Proporción sexual y su relación con el crecimiento y adaptación.....	11
2.10. Vacío económico y justificación del presente estudio	12
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
3.1. Antecedentes del ensayo de procedencias	13
3.1.1. Ubicación y localización	13
3.1.2. Clima	14
3.2. Procedencias.....	16
3.3. Establecimiento de la prueba de progenie.....	16
3.4. Diseño experimental	16

3.5. Variables dasométricas evaluadas	17
3.6. Evaluación de la proporción sexual.....	18
3.7. Análisis estadístico	19
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
4.1. Supervivencia en las procedencias	22
4.1. Crecimiento en altura total (m)	23
4.2. Crecimiento en diámetro basal (cm).....	25
4.3. Cobertura de copa (m ²)	27
4.4. Número de verticilos.....	29
4.6. Análisis de la expresión sexual por procedencias	30
4.6.1. Proporción de hembras por procedencia	30
4.6.2. Proporción de machos por procedencia.....	31
4.6.3. Proporción monoico-hembra por procedencia.....	32
4.6.4. Proporción monoico-macho por procedencia	33
4.6.5. Distribución sexual en la plantación	33
5. CONCLUSIONES.....	36
6. RECOMENDACIONES.....	37
7. LITERATURA CITADA.....	38

ÍNDICE DE CUADROS

Página

Cuadro 1. Características geográficas y climáticas de las tres procedencias (Salaverna, La Encantada y Laguna de Sánchez) de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini: coordenadas geográficas, altitud (msnm), precipitación media anual (mm) y temperatura media anual (°C).	16
Cuadro 2. Efecto de la procedencia sobre la supervivencia mediante un modelo lineal generalizado mixto (GLIMMIX) de un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.	22
Cuadro 3. Estimación de los componentes de varianza (bloque, interacción bloque*procedencia y residual) del modelo mixto (REML) para la altura total (m) de un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.	23
Cuadro 4. Prueba de efectos fijos de la procedencia sobre la altura total (m) mediante un modelo mixto (REML) con bloques aleatorios de un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah. Se muestran grados de libertad (numerador y denominador), valor F y nivel de significancia.	24
Cuadro 5. Estimación de los componentes de varianza (bloque, interacción bloque*procedencia y residual) del modelo mixto (REML) para el diámetro basal (cm) de un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.	25
Cuadro 6. Prueba de efectos fijos de la procedencia sobre el diámetro basal (cm) mediante modelo mixto (REML) con bloques aleatorios en un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.	25
Cuadro 7. Estimación de los componentes de varianza (bloque, interacción bloque*procedencia y residual) para la cobertura de copa (m ²) mediante modelo mixto REML en un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.	27

Cuadro 8. Prueba de efectos fijos de la procedencia sobre la cobertura de copa (m2) mediante modelo mixto (REML) de un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.	27
Cuadro 9. Estimación de los componentes de varianza (bloque y residual) para el número de verticilos. Modelo mixto REML de un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.	29
Cuadro 10. Prueba de efectos fijos de la procedencia sobre el número de verticilos mediante modelo mixto (REML) de un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.	29
Cuadro 11. Número de verticilos promedio (media $\pm$ error estándar) de un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah. Se indica el tamaño de muestra (n) por procedencia.	29
Cuadro 12. Estimación de componentes de varianza asociado al efecto aleatorio de bloque (BL) para la proporción de hembras en un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.....	30
Cuadro 13. Prueba de efectos fijos de la procedencia sobre la probabilidad de ser hembra, mediante un modelo lineal generalizado mixto (GLMM) con distribución binomial y función de enlace logit. de un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.....	31
Cuadro 14. Proporción estimada (probabilidad predicha) de individuos hembras por procedencia, con error estándar, obtenida del GLMM binomial (logit) en un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.	31

Cuadro 15. Prueba de efectos fijos de la procedencia sobre la probabilidad de ser macho (GLMM binomial, logit) en un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.	31
Cuadro 16. Proporción estimada (probabilidad predicha) de individuos machos por procedencia con error estándar (GLMM binomial) en un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.	32
Cuadro 17. Prueba de efectos fijos de la procedencia sobre la probabilidad de ser monoico-hembra (GLMM binomial) en un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah. Debido a la frecuencia extremadamente baja (1 individuo), los resultados deben interpretarse con cautela.	32
Cuadro 18. Proporción estimada (probabilidad predicha) de individuos monoico-hembra por procedencia, con error estándar (GLMM) en un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.	32
Cuadro 19. Prueba de efectos fijos de la procedencia sobre la probabilidad de ser monoico-macho (GLMM binomial) en un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.	33
Cuadro 20. Proporción estimada (probabilidad predicha) de individuos monoico-macho por procedencia, con error estándar (GLMM) en un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1. Localización geográfica del ensayo de procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coahuila, México (25° 15' 9.6" N, 100° 25' 30" O). Escala aproximada 1:50,000. Fuente: Elaboración propia con datos topográficos de INEGI (2026), (modificado por el autor).....	13
Figura 2. Climograma de Gaussen para la estación de San Antonio de las Alazanas, Arteaga, Coah. (Periodo 1981-2010). Se muestra la temperatura media mensual (°C) y la precipitación mensual (mm). Datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2026b).	15
Figura 3. Climograma de Gaussen para la estación de Jame, Arteaga, Coah. (Periodo 1991-2020). Se muestra la temperatura media mensual (°C) y la precipitación mensual (mm). Datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2026a).....	15
Figura 4. Croquis del diseño de bloques completos al azar con 4 bloques. Cada celda representa un árbol: color azul = La Encantada, color rosa = Salaverna, color verde = Laguna de Sánchez, X = faja de protección. Los números indican el código de familia.....	17
Figura 5. Supervivencia (%) de un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah. Las barras de error representan el error estándar.....	22
Figura 6. Altura total promedio (m) (media $\pm$ error estándar) de un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah. Las letras diferentes (a, b) indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). n = 100 para Salaverna, 33 para Laguna, 120 para La Encantada. En este caso, no se detectaron diferencias significativas, por lo que todas comparten la letra "a".....	24
Figura 7. Diámetro basal promedio (cm) (media $\pm$ error estándar) de un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.	26

Figura 8. Área de copa promedio (m ²) (media ± error estándar) con intervalos de confianza del 95 % de un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey, $\alpha = 0.05$).	28
Figura 9. Distribución de las categorías sexuales (macho, hembra, monoico-hembra, monoico-macho) en un ensayo de tres procedencias de <i>Pinus johannis</i> M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah: (A) general de las tres procedencias (n = total de árboles con sexo determinado), (B) Salaverna, (C) Laguna de Sánchez, (D) La Encantada. Los porcentajes se basan en árboles vivos con sexo identificado.	34

RESUMEN

En este estudio se evaluó la supervivencia, el crecimiento y la proporción sexual en un ensayo de procedencias de *Pinus johannis* a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coahuila, bajo un diseño de bloques completos al azar (DBCA) integrado por cuatro bloques. Se evaluaron tres procedencias: La Encantada, representada por 13 familias; Salaverna, por 10 familias; y Laguna de Sánchez, por 3 familias, para un total de 26 familias con cuatro repeticiones cada una. El análisis estadístico se realizó mediante modelos mixtos ajustados por máxima verosimilitud restringida (REML), considerando la procedencia como efecto fijo y los bloques como efecto aleatorio. Se analizaron las variables supervivencia, altura total, diámetro basal, diámetro de copa, número de verticilos y proporción sexual.

Los resultados mostraron que no existen diferencias estadísticas significativas entre procedencias para la mayoría de las variables evaluadas; la supervivencia promedio de la plantación fue de 60.82 % (n inicial = 416 árboles; n final = 253 árboles vivos); Laguna de Sánchez presentó la mayor supervivencia (69 %). Se encontraron diferencias altamente significativas ($F = 5.65$; $p = 0.0040$) para el diámetro de copa (área de copa). La prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) indicó que Laguna de Sánchez tuvo el mayor valor promedio (2.96 m²), diferenciándose estadísticamente de Salaverna (2.44 m²; $p = 0.0413$) y Encantada (2.26 m²; $p = 0.0026$). Se observó una predominancia de individuos femeninos sobre masculinos, mientras que los individuos monoicos representaron una proporción reducida (< 5 %).

Palabras clave: *Pinus johannis*, ensayo de procedencias, modelos mixtos, supervivencia, altura, diámetro, cobertura y proporción sexual.

ABSTRACT

This study evaluated survival, growth, and sex ratio in a provenance trial of *Pinus johannis* 22 years after establishment in Mesa de las Tablas, Arteaga, Coahuila, using a randomized complete block design (RCBD) with four blocks. Three provenances were evaluated: La Encantada, represented by 13 families; Salaverna, by 10 families; and Laguna de Sánchez, by 3 families, for a total of 26 families with four replicates each. Statistical analysis was performed using mixed models adjusted for restricted maximum likelihood (REML), considering provenance as a fixed effect and blocks as a random effect. The variables analyzed were survival, total height, basal diameter, crown diameter, number of whorls, and sex ratio.

The results showed no statistically significant differences between provenances for most of the variables evaluated. The average plantation survival rate was 60.82% (initial $n = 416$ trees; final $n = 253$ live trees), with Laguna de Sánchez exhibiting the highest survival rate (69%). Highly significant differences ($F = 5.65$; $p = 0.0040$) were found for crown diameter (crown area). Tukey's test ($\alpha = 0.05$) indicated that Laguna de Sánchez had the highest average value (2.96 m^2), statistically differentiating it from Salaverna (2.44 m^2 ; $p = 0.0413$) and Encantada (2.26 m^2 ; $p = 0.0026$). A predominance of female over male individuals was observed, while monoecious individuals represented a small proportion ($<5\%$).

Keywords: *Pinus johannis*, provenance trial, mixed models, survival, height, diameter, cover and sex ratio.

1. INTRODUCCIÓN

Los pinos piñoneros representan un grupo significativo dentro de la vasta diversidad del género *Pinus* en México (cerca del 42 % de las especies mundiales), con un alto porcentaje de endemismos (>55 %) concentrados en islas biogeográficas (Perry, 1991; Dvorak *et al.*, 2000). *Pinus johannis* es una de estas especies endémicas, cuya distribución se restringe a poblaciones fragmentadas en zonas montañosas y áridas del centro-norte de México (Yeaton, 1982; García & Passini, 1993; Romero *et al.*, 2000).

Los pinares desempeñan funciones ecológicas importantes dentro de los ecosistemas forestales, debido a su participación en procesos relacionados con la dinámica del suelo, el ciclo hidrológico y la recuperación de áreas perturbadas (Khan *et al.*, 2025). Además, proporcionan refugio y recursos alimenticios para diversas especies de fauna silvestre (Thompson *et al.*, 2009). La presencia de estos árboles contribuye a disminuir la erosión y favorece la estabilidad del suelo mediante el desarrollo de sistemas radicales profundos, los cuales también facilitan la infiltración y retención de humedad (Gómez-Aparicio *et al.*, 2009). Asimismo, ofrecen importantes servicios ambientales, como agua, oxígeno, recreación y captura de carbono, e influyen en el clima regional (García & González, 2003; Ramírez-Herrera *et al.*, 2005). Tienen un alto valor económico, ya que son fuente de madera, leña, pulpa, resinas, semillas comestibles y otros productos. Los piñones se han utilizado para el consumo humano desde el Paleolítico debido a su alto valor nutricional; se caracterizan por un elevado contenido de proteínas y proveen alimento a la fauna local (Romero-Manzanares & García-Moya, 2002; Mutke *et al.*, 2005; Zuleta *et al.*, 2017).

Pinus johannis M.-F. Robert-Passini es una especie sujeta a protección especial por su baja densidad y hábitat impactado (SEMARNAT, 2025). Esta condición la hace particularmente vulnerable a procesos de extinción por factores demográficos y ambientales (Janzen, 1986; Goodman, 1987; Shaffer, 1987; Burkey 1993a, 1993b). Las poblaciones de pinos piñoneros se ven amenazadas principalmente por factores como el cambio de uso de suelo, sobrepastoreo, extracción masiva de semilla, la deforestación, extracción de leña, ataque de plagas y enfermedades, etc. (Parra *et al.*, 2021). Estos factores reducen las áreas piñoneras, siendo sin duda alguna las mayores amenazas que afectan estas comunidades vegetales (Parra *et al.*, 2021). Estos efectos pueden conducir a la extinción de especies que crecen en poblaciones pequeñas y

aisladas, y en las cuales se esperaría una diversidad genética baja por la acción de la deriva genética y la endogamia (Allendorf *et al.*, 2013), como es el caso de *P. johannis*. Estudios genéticos revelan una diversidad moderada y aislamiento poblacional (García-Gómez *et al.*, 2014); en poblaciones pequeñas y de baja densidad se ha encontrado que existen riesgos elevados de endogamia y homocigosis. Esto puede llevar a la expresión de alelos deletéreos y la reducción en la capacidad reproductiva de la especie (Quiroz *et al.*, 2017), lo que exige estrategias de conservación que preserven su adaptabilidad genética a largo plazo (Frankham *et al.*, 2002).

Una buena estrategia de conservación son los ensayos de procedencia, que comparan el desempeño de distintas poblaciones en diversos ambientes para detectar interacciones genotipo-ambiente (Mesen, 1994). Estas pruebas son la base para seleccionar el material genético óptimo antes de iniciar programas de reforestación o mejoramiento genético, evitando así esfuerzos infructuosos (Mesen, 1994). Esto podría representar una gran solución, pero muchas veces la falta de mejoramiento genético en los ensayos de procedencia se da por la cancelación temporal o definitiva de la mayoría de los programas debido a la falta de financiamiento, ya que requieren una importante inversión económica y logística, además de enfrentar ciclos de selección sumamente extensos antes de ofrecer resultados significativos (Vallejo Reyna & Cob Uicab, 2021). Para *P. johannis*, esto implica diseñar programas de manejo sustentable con poblaciones genéticamente representativas que minimicen riesgos como la endogamia y la pérdida de adaptación.

Por lo tanto, y ante la necesidad de generar estrategias de conservación basadas en evidencia científica para *Pinus johannis*, se priorizó la identificación y caracterización de sus poblaciones residuales como primer paso. Se documentaron las características generales de seis poblaciones naturales de la especie, consideradas candidatas para funcionar como Áreas de Conservación o Unidades Productoras de Germoplasma Forestal: Mesa del Rosario y Laguna de Sánchez (Villa de Santiago, N.L.), San Antonio de la Osamenta (Santa Catarina, N.L.), La Siberia (Zaragoza, N.L.), Concepción del Oro (Zacatecas) y el Cerro del Coahuilón (Arteaga, Coahuila). La descripción de cada rodal se realizó siguiendo los criterios técnicos establecidos por la CONAFOR para la selección de germoplasma forestal (Delgado Valerio *et al.*, 2013).

No obstante, la selección de procedencias para programas de restauración o conservación no puede basarse únicamente en características estáticas; requiere evaluar su comportamiento y adaptación a largo plazo en campo. Para responder a esta necesidad, el núcleo de esta tesis consiste en la evaluación de tres de estas procedencias —Salaverna, en Mazapil, Zacatecas; La Encantada, en Zaragoza, Nuevo León; y Laguna de Sánchez, en Santiago, Nuevo León— en un ensayo de procedencias de 22 años, establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coahuila. El objetivo principal fue identificar las procedencias con el mejor desempeño dasométrico, aclimatación y estabilidad reproductiva. Los resultados proporcionarán información clave y sólida para orientar decisiones estratégicas de conservación *ex situ*, restauración ecológica y manejo sustentable de *P. johannis*, aplicando directamente el principio de los ensayos de procedencia como herramienta fundamental para su preservación.

1.1 Objetivos e hipótesis

Objetivo general

- Evaluar la supervivencia, el crecimiento, la aclimatación y la proporción sexual de tres procedencias de *Pinus johannis* en un ensayo de 22 años en Mesa de las Tablas, Coahuila, con el fin de identificar la procedencia con mejor desempeño dasométrico.

Objetivos específicos

- Comparar la supervivencia, el crecimiento en altura total, diámetro basal, cobertura de copa y número de verticilos entre las tres procedencias.
- Evaluar la proporción de individuos machos, hembras y monoicos en cada población.

Hipótesis

H₀: No existen diferencias significativas entre las procedencias de *Pinus johannis* en las variables supervivencia, altura total, diámetro basal, diámetro de copa, número de verticilos, ni en la proporción de sexos.

H₁: Existen diferencias significativas entre las procedencias de *Pinus johannis* en al menos una de las variables evaluadas, como la supervivencia, la altura total, diámetro basal, diámetro de copa, número de verticilos o proporción de sexos.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Características biológicas y ecológicas de *Pinus johannis*

Esta especie se caracteriza por presentar un porte arbustivo de tallos múltiples y es muy raro encontrarlo con un tallo simple dominante. Llega a medir hasta 4 metros de altura, pero es más común encontrar plantas de 2 a 3 metros de altura. Su copa es baja, redondeada y densa. La corteza de estos pinos cuando son jóvenes es de color gris, mientras que cuando estos ya son viejos, su corteza se vuelve áspera y escamosa. Los fascículos están formados por tres acículas, ocasionalmente 2, rara vez 4; presentan una longitud que va desde 3 a 5 cm y de 0.9 a 1.2 mm de espesor. La vaina del fascículo es flexible y caduca, mientras que las vainas de los fascículos son de color marrón anaranjado de 3 mm de longitud. Tiene estomas solo en la superficie ventral y 2 canales resiníferos dorsales externos (Perry, 1991).

El cono tiene una forma oblonga, dehiscente y ligeramente resinosa, de 3 a 4 cm de longitud y de 2 a 3 cm de ancho. El pedúnculo es muy corto, de color café y mide cerca de 10 mm de ancho con escamas cónicas, delgadas y rígidas. La semilla tiene testa dura y de color blanquecino con una longitud de 11-14 mm (Robert, 1978). La madera de *Pinus johannis* es de color marrón amarillento pálido y es de uso comercial, ya que es utilizada como combustible y sus semillas se utilizan como alimento. La parte comestible de los piñones puede ser de color rosa, amarillo, blanco o marfil; en el caso de *P. johannis*, sus piñones llegan a contener 48.2 % de proteína, incluso más que lo que proporciona la nuez de castilla (Fonseca, 2003).

P. johannis es una especie endémica de México; está representada por cinco poblaciones distribuidas en zonas áridas de la Sierra Madre Oriental, en los estados de Coahuila, Nuevo León y Zacatecas. La descripción original de la especie se hizo de la población ubicada entre los poblados de Concepción del Oro y Mazapil en el estado de Zacatecas (Delgado Valerio *et al.*, 2013). Los bosques formados por *P. johannis* contribuyen a la reforestación de zonas áridas y semiáridas, además de proveer alimento y hábitat a la fauna local. Asimismo, las copas de estos árboles proporcionan sombra a especies herbáceas y arbustivas, las cuales tienen más probabilidad de sobrevivir por la mayor disponibilidad de humedad (Perry, 1991; Romero-Manzanares y García-Moya, 2002).

2.2. Crecimiento y adaptación de *Pinus johannis*

Es una especie de distribución restringida y con poblaciones fragmentadas, que se desarrolla principalmente en suelos calizos pobres y pedregosos, regularmente suelos leptosoles (Barrera, 2007). En climas semiárido-templado con precipitaciones menores a los 300 mm anuales, temperatura media anual de 16 °C, y con heladas durante diciembre y enero. La especie tiene un límite de resistencia al frío hasta de -12.1 °C (Bannister y Neuner, 2001). Se considera que estos factores ambientales extremos (de suelo y temperatura) podrían estar afectando negativamente la viabilidad de la especie (SEMARNAT, 2025).

Para la conservación y manejo de una especie, es necesario tener información fundamental sobre su presencia, distribución y abundancia en un área específica. Esta información es esencial para entender la estructura y función de los ecosistemas, identificar las especies en riesgo y desarrollar estrategias de conservación efectivas. Este tipo de información puede ser obtenida en inventarios donde se utilizan diferentes métodos para determinar parámetros clave como el diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total, volumen, además de utilizar herramientas como forcípulas, hipsómetro, relascopio, cintas métricas para medir área basal, grosor de corteza, etc. (FAO, 2010; Müller-Dombois & Ellenberg, 1974). Estos parámetros dasométricos permiten evaluar el crecimiento, desarrollo estructural y vigor de los individuos, proporcionando información clave para comprender la dinámica poblacional y la capacidad de aclimatación de la especie en ambientes limitantes.

Los indicadores de adaptación pueden ser morfológicos, fisiológicos o genéticos, y permiten comprender la respuesta de las plantas a diferentes condiciones climáticas y ambientales (Aitken *et al.*, 2008). Para evaluar la adaptación de *Pinus johannis*, pueden emplearse enfoques genéticos, ambientales y fisiológicos. Los análisis genéticos permiten estimar la diversidad genética de las poblaciones, lo cual se relaciona con su capacidad de respuesta frente a condiciones ambientales variables (Jump & Peñuelas, 2005). Una herramienta ampliamente utilizada es el modelado de nicho ecológico, mediante el cual se simula la distribución actual y futura de *P. johannis* bajo distintos escenarios climáticos, lo que permite inferir su posible respuesta ante el cambio ambiental (Peterson *et al.*, 2011).

Los estudios de fisiología y tolerancia ambiental permiten evaluar la respuesta de la especie a variaciones en temperatura, humedad y disponibilidad de nutrientes (Larcher, 2003). Asimismo,

el monitoreo de poblaciones a largo plazo facilita el análisis de la dinámica poblacional y su respuesta ante cambios ambientales (Jump & Peñuelas, 2005; Aitken *et al.*, 2008). La integración de estos enfoques proporciona una visión más completa de los procesos de adaptación y evolución de *P. johannis*, así como de su posible comportamiento frente al cambio climático y otras alteraciones ambientales.

2.3. Estudios sobre *Pinus johannis*

Diversos estudios han analizado aspectos ecológicos, genéticos y adaptativos, como Pérez-Miranda *et al.* (2019), que analizó cómo el cambio climático afectará la ubicación geográfica de cuatro especies de pinos piñoneros endémicos en México (dentro de ellos *P. johannis*). Mediante el uso de herramientas de análisis espacial y el algoritmo MaxEnt, los investigadores compararon la distribución actual con proyecciones futuras basadas en variaciones de temperatura y precipitación. Los resultados indicaron que *P. johannis* se encuentra entre las especies más sensibles al cambio climático, con reducciones proyectadas cercanas al 60 % de su superficie potencial. Los autores concluyen que las modificaciones en los patrones de temperatura y precipitación podrían afectar severamente la distribución futura de la especie, incrementando su vulnerabilidad ante el cambio climático.

Con relación al desempeño en ensayos de procedencia, Solano Montoya (2016) evaluó la supervivencia, el crecimiento en altura, diámetro basal, número de ramas y la capacidad reproductiva de tres procedencias de *P. johannis* en una plantación experimental en Mesa de las Tablas, Coahuila, México. El autor reportó que no encontró diferencias en la supervivencia, altura total, diámetro basal y número de ramas después de 13 años de establecida. Así mismo, el potencial y la eficiencia de semillas son similares entre las tres procedencias. Por otra parte, García-Gómez *et al.* (2014) analizaron la diversidad genética y la estructura poblacional de *P. johannis* a lo largo de su área de distribución natural en México, con el objetivo de evaluar el estado de conservación genética de la especie y orientar estrategias de manejo y restauración. Los autores encontraron que *P. johannis* presenta niveles moderados a bajos de diversidad genética y una estructura poblacional significativa, lo que sugiere una limitada conectividad entre poblaciones, posiblemente asociada a la fragmentación del hábitat, la baja regeneración natural y su sistema reproductivo particular.

2.4. Estudios comparativos de crecimiento en *Pinus johannis*

Es importante señalar que, en la evaluación de los ensayos de procedencias, las variables más utilizadas son el diámetro a la base, la altura total y la sobrevivencia de las plantas, así como el potencial y la eficiencia de las semillas, con el fin de determinar si una procedencia puede considerarse una fuente viable de semilla (Mesen, 1994). Como antecedentes, Muñoz (2006) evaluó el ensayo de procedencia en estudio al año y a los dos años de establecida. El autor reportó diferencias significativas entre las procedencias para las variables altura y número de ramas, debido a que estas son fácilmente perceptibles a temprana edad. De igual manera, Sánchez (2013) evaluó dicho estudio, encontró también una diferencia significativa entre las procedencias para las variables altura y número de ramas. Además, Sánchez (2013) evaluó las variables de sobrevivencia y proporción de sexo; en estas variables no encontró diferencia significativa alguna.

Estudios recientes han demostrado que la adaptación local a factores ambientales influye de manera determinante en el crecimiento de *Pinus johannis*, especialmente bajo condiciones de estrés hídrico (Montoya, 2016). Entre los principales factores limitantes se encuentran la altitud, el clima y la precipitación, ya que se ha documentado que la altitud y las características edáficas del lugar de procedencia influyen significativamente en el crecimiento inicial y la supervivencia en ensayos de campo, y que existe una variabilidad notable en las características de conos y semillas, lo cual sugiere una fuerte aclimatación local (Muñoz, 2006; Sánchez, 2013).

2.5. Metodología en ensayos de procedencia

Los programas modernos de mejoramiento genético forestal se basan en la evaluación de la variación fenotípica y genética para identificar individuos superiores y utilizarlos en nuevos ciclos de selección (Zapata-Valenzuela y Hasbún, 2011). A partir de estos individuos se generan familias y se realizan procesos de selección intrafamiliar con el objetivo de identificar genotipos sobresalientes y multiplicarlos mediante técnicas de propagación vegetativa o clonación (Zobel y Talbert, 1988; White *et al.*, 2007). Los ensayos de procedencia se evalúan comúnmente con diseños de bloques completos al azar. En la actualidad, el análisis estadístico de estos ensayos emplea modelos mixtos y el método REML para manejar datos desbalanceados (Littell *et al.*, 2006).

2.6. Ensayos de procedencia en especies forestales

El principal objeto práctico de los ensayos de procedencia es localizar del modo más rápido y económico posible las procedencias que permiten formar bosques bien adaptados y productivos (Burley & Wood, 1976). En ellos se miden criterios importantes como la supervivencia, la resistencia a factores ambientales desfavorables o plagas, la calidad de la madera y la producción de semilla (Burley, 1969).

En un ensayo de procedencia de *P. greggii* establecido en dos localidades de la Mixteca Alta Oaxaqueña con 13 procedencias, seis de la var. *greggii* y siete de la var. *australis*, se compararon las diferencias en crecimiento, altura y diámetro basal, así como en diámetro de copa, número de ciclos de crecimiento y supervivencia en individuos jóvenes (Valencia-Manzo *et al.*, 2006). Los resultados revelaron que, tras dos años y medio, la supervivencia fue excepcionalmente alta en ambas localidades, alcanzando un promedio del 96 %. Sin embargo, se identificaron diferencias significativas en el desarrollo físico, donde las variedades del centro mostraron un crecimiento superior en altura y diámetro. El estudio concluye que existe una importante interacción entre el genotipo y el ambiente, lo que permite seleccionar semillas específicas para optimizar proyectos de reforestación (Valencia-Manzo *et al.*, 2006).

Otro estudio sobre procedencias es el realizado por De los Ríos *et al.* (2003), en el que probaron la adaptabilidad de tres especies de pinos piñoneros (*P. cembroides* Zucc., *P. nelsonii* Shaw. y *P. pinceana* Gord.) 19 años después (1983–2002) de haber sido plantadas en las laderas del municipio de Iturbide, Nuevo León, México. Los autores indicaron que *P. pinceana* tuvo mayor supervivencia y desarrolló mayor crecimiento en altura en ambos sitios y en diámetro basal exclusivamente en el sitio de mayor altitud. *P. cembroides* desarrolló un mayor crecimiento en diámetro en el sitio de menor altitud. La supervivencia en general es del 50% y ya se presentan indicios de mortalidad de árboles por competencia (De los Ríos *et al.*, 2003).

2.7. Factores ambientales y crecimiento en ensayos de procedencias

Muchos ensayos de procedencia han encontrado evidencia de aclimatación en poblaciones de especies de árboles a las condiciones ambientales locales (Vitasse *et al.*, 2009; Kreyling *et al.*, 2014; Isaac-Renton *et al.*, 2018). Como resultado de estos hallazgos, se recomienda con frecuencia obtener semillas locales para evitar la mala adaptación, al tiempo que se reducen

problemas relacionados con los efectos de endogamia, exogamia, flujo génico reducido y mutaciones deletéreas, que influyen en la habilidad de las especies para su evolución (Frankham *et al.*, 2002; Bischoff *et al.*, 2010). La importancia de utilizar semillas locales para las actividades de plantación de árboles sigue siendo un principio crucial para guiar las decisiones de abastecimiento de semillas (Pedrini & Dixon, 2020). En conjunto, estos resultados indican que el éxito en la plantación de *Pinus johannis* depende en gran medida de emparejar adecuadamente el material genético (procedencias) con las condiciones del nuevo lugar donde se planea establecer (White *et al.*, 2007; Montoya, 2016).

Aguirre-Limón *et al.* (2017) examina la diversidad y conectividad genética de *Pinus pinceana*; mediante el uso de marcadores moleculares RAPD, los autores analizaron seis poblaciones fragmentadas en el norte del país, específicamente en los estados de Coahuila, Nuevo León y Zacatecas. Los resultados revelaron que el flujo genético en las poblaciones de *P. pinceana* aporta beneficios críticos para la supervivencia y la salud de la especie (Aguirre-Limón *et al.*, 2017). El intercambio de genes entre poblaciones ha evitado una pérdida drástica de la variación genética y ha permitido mantener su conectividad genética actual: asimismo, al compartir alelos entre poblaciones, se fortalece la capacidad de la especie para adaptarse a las condiciones del ambiente, lo que reduce la probabilidad de que la selección natural elimine poblaciones con baja variabilidad genética (Aguirre-Limón *et al.*, 2017).

2.8. Proporción sexual en coníferas

La mayoría de las coníferas son monoicas, lo que significa que un mismo árbol produce estructuras reproductivas masculinas (conos de polen) y femeninas (conos de semillas o piñas) (Burrows & McCubbin, 2018). Aunque la mayoría son monoicas, algunas especies, como *Taxus baccata*, *Araucaria angustifolia* y *P. johannis*, son dioicas, es decir, tienen árboles con "sexo" separado (individuos machos e individuos hembras) (Thomas, 2013; Thomas, 2003).

En especies dioicas, la proporción sexual suele acercarse a una relación 1:1, aunque puede presentar variaciones o sesgos (Fisher, 1930). Montoya (2016) evaluó la supervivencia, el crecimiento en altura, el diámetro basal, el número de ramas y la capacidad reproductiva de tres procedencias de *P. johannis* en una plantación experimental establecida en Mesa de las Tablas, Coahuila, México. Los resultados mostraron que, después de 13 años de establecida la plantación, no existían diferencias entre procedencias para la supervivencia, la altura total, el

diámetro basal ni el número de ramas. Sin embargo, en cuanto a la capacidad reproductiva, se observó una predominancia de estructuras reproductivas masculinas, presentes en aproximadamente el 60 % de los individuos evaluados. En contraste, la proporción de individuos con estructuras exclusivamente femeninas fue de 22%, mientras que cerca del 15 % presentó simultáneamente estructuras reproductivas masculinas y femeninas. Se han encontrado más resultados en los que la proporción sexual cambia bajo factores de estrés como lo son la herbivoría, el tamaño, la edad o la disponibilidad de recursos (precipitación, temperatura, etc.) (Flores-Rentería *et al.*, 2013).

En poblaciones fragmentadas y amenazadas, una proporción sexual sesgada hacia los machos reduce el tamaño efectivo de la población, incrementando así la erosión genética y el riesgo de extinción (Dubreuil *et al.*, 2010; Rosche *et al.*, 2018). Por lo tanto, la proporción sexual en coníferas es crítica para la conservación de especies dioicas, por lo que es esencial estudiar la proporción de sexos en árboles dioicos como un indicador de la vulnerabilidad y viabilidad de las especies (Munné-Bosch, 2015; Hultine *et al.*, 2016).

2.9. Proporción sexual y su relación con el crecimiento y adaptación

La proporción sexual es de suma importancia, ya que influye en la eficiencia reproductiva y en la asignación de recursos entre crecimiento y reproducción (Owens, 1998). Este balance determina el éxito de la polinización, la producción de semilla viable y el flujo génico entre poblaciones, lo cual se refleja en la variabilidad genética y en la capacidad de adaptación a condiciones ambientales cambiantes (Robledo-Arnuncio & Gil, 2005; Aitken *et al.*, 2008).

P. johannis es dioico, y en menor cuantía, presenta individuos monoicos dentro de una misma población. La especie representa un sistema ideal para estudiar la evolución de la separación sexual en gimnospermas porque las poblaciones de esta especie contienen individuos masculinos, femeninos y monoicos, y algunos individuos producen estróbilos bisporangiados funcionales (Whitham & Mopper, 1985; Flores-Rentería *et al.*, 2011). La evaluación de la estabilidad de la expresión sexual es necesaria para describir más rigurosamente su sistema sexual y determinar si representa un sistema modelo para evaluar más a fondo las hipótesis de separación sexual en gimnospermas (Flores-Rentería *et al.*, 2013).

Los factores bióticos y abióticos influyen de manera significativa en la expresión sexual de las plantas, lo que puede generar una distribución desigual de individuos masculinos y femeninos dentro de las poblaciones (Freeman *et al.*, 1980; Barrett, 2002). Por ejemplo, factores bióticos como la herbivoría pueden alterar la expresión sexual al modificar la asignación relativa a funciones masculinas y femeninas (Obeso, 2002; Thomson *et al.*, 2004). Regularmente, los machos suelen encontrarse en el límite del hábitat adecuado en condiciones ambientales más estresantes, mientras que las hembras se encuentran en mejores condiciones ambientales (Charnov, 1984; Tikhonova, 2003).

2.10. Vacío económico y justificación del presente estudio

La estabilidad sexual no se ha evaluado en esta especie ni en ninguna otra gimnosperma. A pesar de la alta frecuencia de especies dioicas, sorprendentemente pocos estudios describen el proceso evolutivo que conduce a la dioica en las gimnospermas (Givnish, 1980; Floyd, 1983).

Existen pocos estudios de indicadores reproductivos de *P. johannis* y la mayoría de los estudios del género *Pinus* se han centrado en especies ampliamente distribuidas. Solo dos estudios han abordado especies en peligro de extinción con distribuciones limitadas (p. ej., *P. catarinae* y *P. johannis*) (Castilleja Sánchez, 2016). Por lo tanto, se requieren más estudios que incorporen especies de distribución restringida y poblaciones pequeñas (Castilleja Sánchez, 2016).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Antecedentes del ensayo de procedencias

3.1.1. Ubicación y localización

La plantación se encuentra en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coahuila (25° 15' 9.6" N, 100° 25' 30" O) a 2580 msnm, en una superficie de 5,000 m², con una pendiente de 25 % (CETENAL, 1977) (Figura 1).

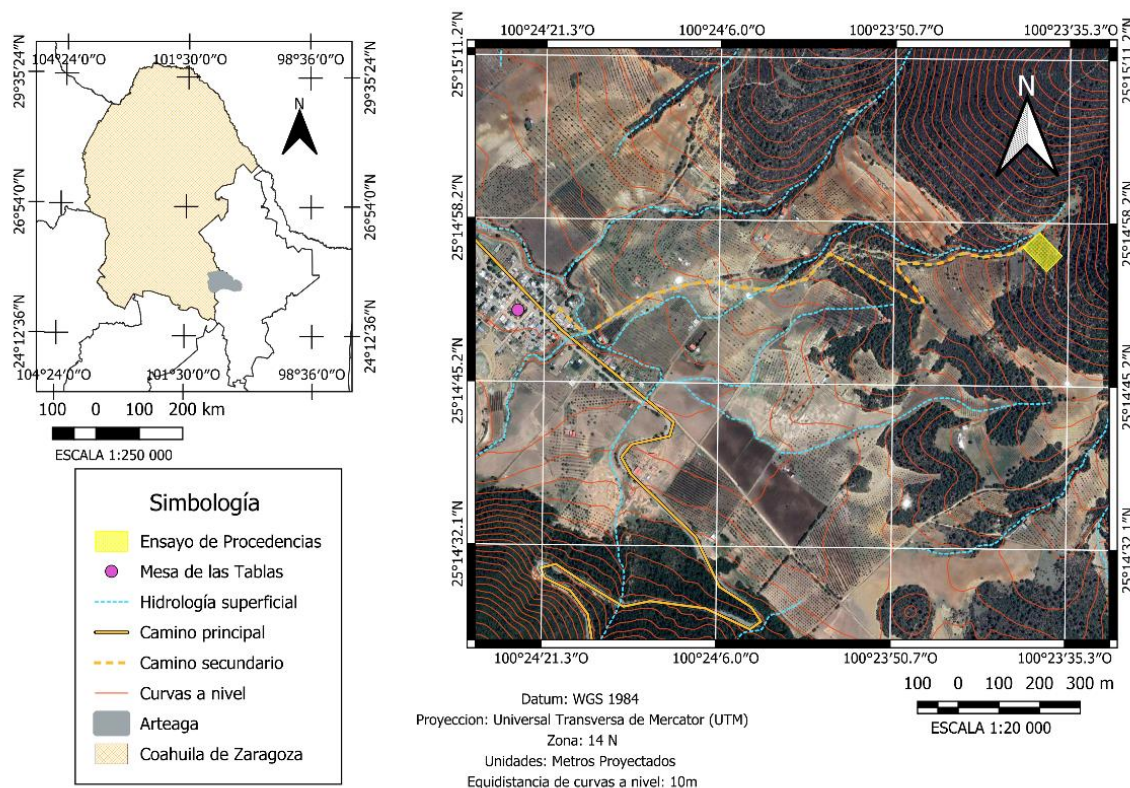


Figura 1. Localización geográfica del ensayo de procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coahuila, México (25° 15' 9.6" N, 100° 25' 30" O). Escala aproximada 1:50,000. Fuente: Elaboración propia con datos topográficos de INEGI (2026), (modificado por el autor).

Predomina el suelo aluvión, con presencia de roca sedimentaria como lutita y caliza, dando origen a la siguiente fórmula de suelos, Hc + E/2, descrito como suelo predominante el feozem calcárico (Hc), como suelo secundario a la rendzina (E) y con una clase de textura media (CETENAL, 1977).

3.1.2. Clima

Presenta vegetación de bosques y chaparrales en las sierras; pastizales y algunos matorrales en bajadas y llanuras altas. El clima que más se extiende es el templado subhúmedo con más de 600 mm de precipitación total anual; los porcentajes de lluvia invernal son relativamente altos; sin embargo, la precipitación alcanza sus niveles máximos en el verano (INEGI, 1983). De acuerdo con la estación meteorológica de San Antonio de las Alazanas, Arteaga, Coah., de la Comisión Nacional del Agua, la temperatura media anual es de 12.7 °C; la precipitación promedio anual es de 470.6 mm, con un régimen de precipitación escasa, aunque puede presentarse lluvia durante todo el año. El mes más cálido es mayo, con una temperatura media de 15.8 °C; los meses de julio y agosto son los que registran una mayor precipitación pluvial y es más escasa en el invierno (Figura 2). El tipo de clima es Cx' b (e') g, descrito como clima templado-subhúmedo, con lluvias escasas todo el año, con un verano fresco largo, muy extremoso (Mendoza, 1983). Se analizaron los datos de otra estación meteorológica cercana a la plantación, puesto que en mesa de las tablas no hay estación meteorológica; los datos analizados fueron los de Jamé, Arteaga, Coah., presenta una temperatura media anual de 13.1 °C; la precipitación promedio anual es de 447.2 mm. El mes más cálido es junio con una temperatura media de 16.5 °C, siendo julio y septiembre los meses con mayor precipitación pluvial (Figura 3). El tipo de clima es Cb (ω_0) (x') (e), el más seco de los subhúmedos, templado con verano fresco largo, con lluvias de verano, que tienden a presentarse todo el año (Mendoza Hernández, 2010; Servicio Meteorológico Nacional, 2026a, 2026b).

De acuerdo con la cartografía climática del INEGI (2010a), la localidad Mesa de las Tablas presenta un clima Cb (ω_1) (x'), Templado Semifrío Subhúmedo, descrito como templado con verano fresco y largo, con una humedad intermedia; la mayor parte de la precipitación ocurre en los meses de verano y pequeñas precipitaciones en invierno.

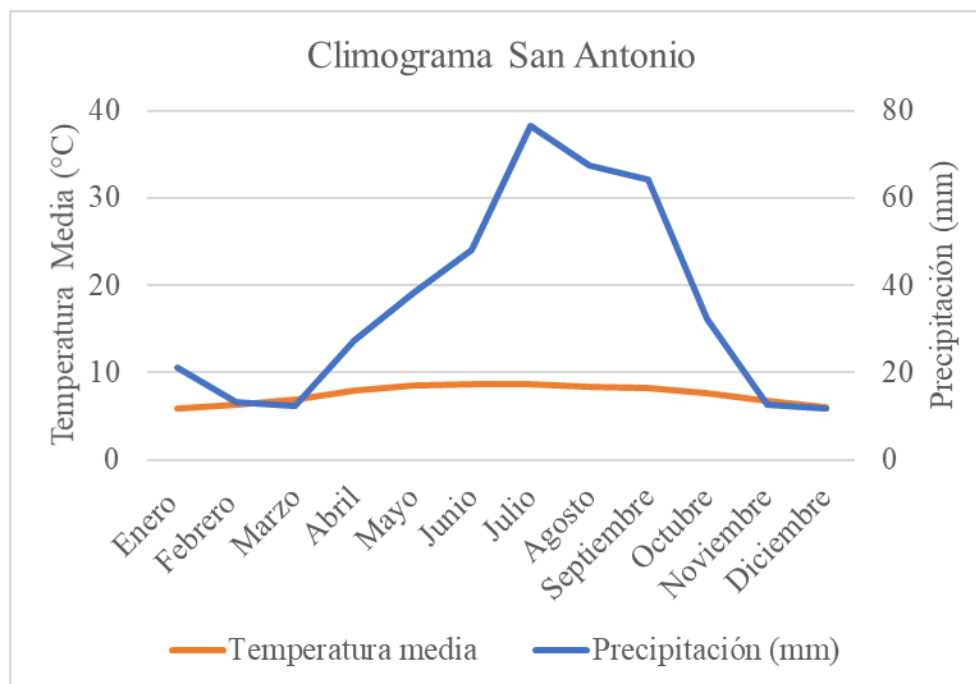


Figura 2. Climograma de Gaussen para la estación de San Antonio de las Alazanas, Arteaga, Coah. (Periodo 1981-2010). Se muestra la temperatura media mensual (°C) y la precipitación mensual (mm). Datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2026b).

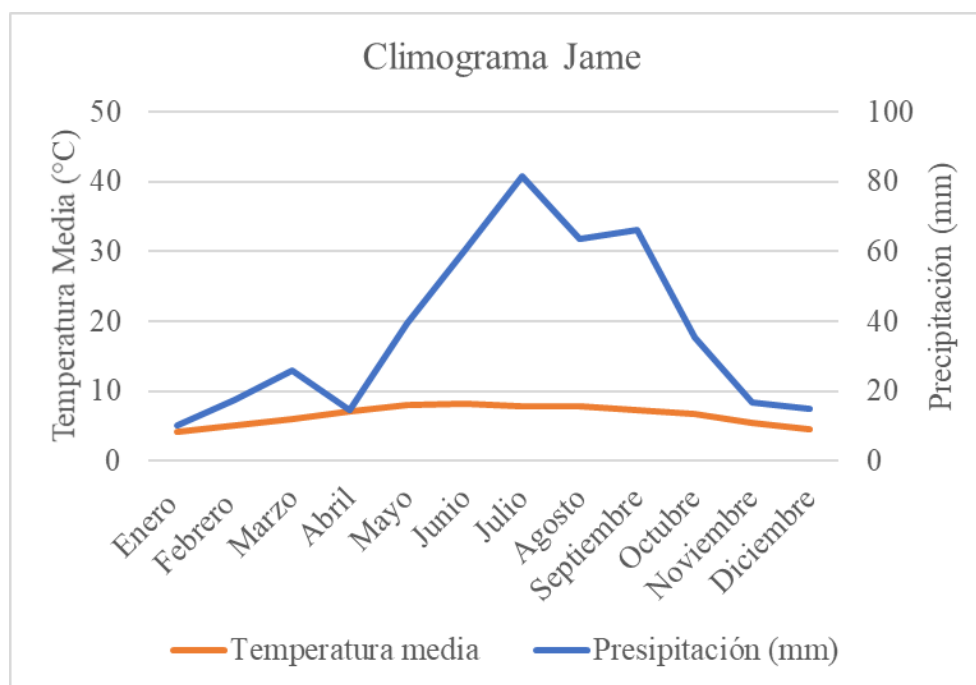


Figura 3. Climograma de Gaussen para la estación de Jame, Arteaga, Coah. (Periodo 1991-2020). Se muestra la temperatura media mensual (°C) y la precipitación mensual (mm). Datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2026a).

3.2. Procedencias

Las procedencias sujetas a estudio fueron Salaverna Mazapil, Zacatecas; La Encantada, Zaragoza, Nuevo León y Laguna de Sánchez, Santiago, Nuevo León (Cuadro 1).

Cuadro 1. Características geográficas y climáticas de las tres procedencias (Salaverna, La Encantada y Laguna de Sánchez) de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini: coordenadas geográficas, altitud (msnm), precipitación media anual (mm) y temperatura media anual (°C).

Procedencias	Localización geográfica		Altitud (msnm)	Pp (mm)	T (°C)
	Latitud Norte	Longitud oeste			
Salaverna, Zac.	24° 36' 44''	101° 27' 44''	2820	200-600	12-22
La Encantada, N.L.	27° 52' 41''	99° 50' 25''	2700	300-1100	8-20
Laguna de Sánchez, N.L.	25° 21' 14''	100° 21' 08''	1730	500-1100	10-24

Pp = Precipitación media anual (mm), T = Temperatura media anual (°C). Fuente: Elaboración propia con información de los Compendios de Información Geográfica Municipal de General Zaragoza, Nuevo León; Mazapil, Zacatecas; y Santiago, Nuevo León (INEGI, 2010b, 2010c, 2010d).

3.3. Establecimiento de la prueba de progenie

El ensayo se estableció el 31 de agosto de 2002 utilizando plantas de *Pinus johannis* de cuatro años, bajo un diseño de bloques completos al azar (DBCA), integrado por cuatro bloques distribuidos de manera perpendicular a la pendiente del terreno. El área en donde se está utilizando el material evaluado fue seleccionado con base en la similitud de aspectos ambientales (clima, suelo, altitud, etc.) que hay entre las procedencias y el área de la plantación (Keiding, 1992), de tal forma que exista una buena representatividad entre estas condiciones en donde *P. johannis* se desarrolla. Las plantas fueron colocadas de forma manual en un sistema de plantación de marco real, en cajetes con una profundidad de 30 cm y una separación entre plantas de 2 m (Muñoz, 2006). Se evaluaron tres procedencias: La Encantada, representada por 13 familias; Salaverna, por 10 familias; y Laguna de Sánchez, por 3 familias, para un total de 26 familias con cuatro repeticiones cada una. La distribución de las familias dentro de cada bloque se realizó al azar utilizando tablas de números aleatorios. Además, el ensayo contó con una faja de protección alrededor de la plantación, con el propósito de disminuir los efectos de borde (Figura 4).

3.4. Diseño experimental

Las tres procedencias se distribuyeron de manera aleatoria; en total se plantaron 416 árboles (104 por bloque × 4 bloques). A los 22 años, se registraron 253 árboles vivos (tasa de

momento de la evaluación con respecto al número de árboles iniciales en el año 2002. De esta manera, el porcentaje (%) de supervivencia se calculó con la siguiente formula:

$$Supervivencia (\%) = \frac{Numero\ de\ plantas\ al\ momento\ de\ la\ evaluación}{Numero\ de\ plantas\ iniciales} (100)$$

Para medir el diámetro de copa se utilizó una cinta métrica, con la que se registraron dos diámetros: uno con orientación norte-sur (D_1) y otro este-oeste (D_2). Con esas dos medidas se calculó un diámetro de copa promedio que posteriormente fue usado para calcular la cobertura en m^2 .

$$Dc = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

Donde:

Dc = Diámetro de copa

D_1 = diámetro norte-sur

D_2 = diámetro este-oeste

La cobertura de copa se calculó:

$$C = (\pi * Dc^2)/4$$

Donde:

C = Cobertura de copa

Dc = Diámetro de copa

3.6. Evaluación de la proporción sexual

La identificación sexual de los individuos se realizó en campo mediante la observación de las estructuras reproductivas y las características morfológicas de las yemas terminales y laterales. Aunque los criterios de identificación son relativamente simples, su correcta aplicación es esencial para evitar errores de clasificación.

Los individuos femeninos tienen más acículas en las yemas, además de tener conos (estróbilos femeninos). Por su parte, los individuos masculinos se caracterizaron por mostrar menor

densidad de acículas en las yemas y una producción de polen (estróbilos masculinos). En el caso de los individuos hermafroditas, presentan simultáneamente estróbilos masculinos y femeninos. Su clasificación se realizó con base en el sexo predominante, determinado mediante la abundancia relativa de estructuras reproductivas observadas en la copa. Los individuos con mayor presencia de estróbilos femeninos fueron clasificados como monoico-hembra, mientras que los que predominaban estróbilos masculinos fueron clasificados como monoico-macho. Generalmente, los estróbilos masculinos tienden a disponerse en los extremos de las ramas inferiores, mientras que los estróbilos femeninos se desarrollan en las ramas superiores de la copa, disposición que favorece la polinización cruzada.

3.7. Análisis estadístico

El procesamiento y análisis estadístico de la información se realizó mediante el programa SAS Institute Inc. versión 9.4 para navegadores web, mientras que la información dasométrica obtenida en campo fue capturada y organizada en hojas electrónicas de cálculo de Microsoft Excel.

El ensayo fue establecido bajo un diseño de bloques completos al azar (DBCA), cuyo modelo estadístico general se representa de la siguiente manera:

$$Y_{ijk} = \mu + P_i + \beta_j + (P*\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

- Y_{ijk} : Es la variable de respuesta (ej., altura) del k-ésimo árbol de la i-ésima población en el j-ésimo bloque.
- μ : Es la media general del ensayo.
- P_i : Es el efecto de la i-ésima población (procedencia). Este es el factor de interés.
- β_j : Es el efecto del j-ésimo bloque. Dado que tus bloques son una muestra aleatoria del área experimental y quieres controlar la heterogeneidad ambiental, lo correcto es tratarlo como un efecto aleatorio. Es decir, $B_j \sim N(0, \sigma^2 B)$.

- $(P*B)_{ij}$: Es el efecto de la interacción entre la población y el bloque. En el contexto de modelos mixtos, este término suele ser el error experimental. Dado que tienes varias parcelas (una por población en cada bloque), pero dentro de cada parcela tienes múltiples árboles, esta interacción representa la variación entre parcelas. Se trata como un efecto aleatorio, $(P*B)_{ij} \sim N(0, \sigma^2_{PB})$.
- ε_{ijk} : Es el error aleatorio asociado a cada árbol individual (variación dentro de la parcela). Se asume $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2_e)$.

Las variables continuas, como altura total, diámetro basal, diámetro de copa y número de verticilos, se analizaron mediante modelos lineales mixtos ajustados por máxima verosimilitud restringida (REML) utilizando el procedimiento PROC MIXED de SAS. Este procedimiento permite evaluar simultáneamente efectos fijos y aleatorios, manejar adecuadamente datos desbalanceados y valores faltantes, así como modelar de manera flexible la variabilidad entre unidades experimentales (SAS Institute Inc., 2015). Los grados de libertad fueron ajustados mediante el método de Kenward–Roger; el modelo final ajustado fue:

```
model var = PRO / ddfm=kenwardroger;
      random BL;
```

La interacción bloque $\times$ procedencia se omitió porque su componente de varianza fue estimado como cero, indicando que no contribuía a la variabilidad observada.

La procedencia fue considerada como efecto fijo, mientras que los bloques fueron considerados efectos aleatorios. Inicialmente, se incluyó la interacción bloque $\times$ procedencia en el modelo; sin embargo, esta se eliminó del análisis final debido a que su componente de varianza fue estimado como cero, indicando que no contribuía significativamente a la variabilidad observada. Los árboles muertos no fueron imputados, ya que el método REML permite utilizar únicamente la información disponible sin necesidad de reemplazar valores faltantes (Littell *et al.*, 2006).

Para las variables discretas, como supervivencia y proporción sexual, se emplearon modelos lineales generalizados mixtos mediante el procedimiento PROC GLIMMIX de SAS, utilizando distribución binomial y función de enlace logit. En el caso de la proporción sexual, se ajustó un modelo independiente para cada categoría sexual (hembra, macho, monoico-hembra y monoico-macho), modelando la probabilidad de ocurrencia en función de la procedencia. La procedencia

se consideró como efecto fijo y el bloque como efecto aleatorio. Este enfoque permite analizar adecuadamente variables de respuesta binarias o proporcionales que no siguen distribución normal (Boykin *et al.*, 2011). La significancia estadística entre procedencias se evaluó mediante pruebas F, considerando niveles de significancia de $\alpha = 0.05$ y $\alpha = 0.01$. Cuando se detectaron diferencias significativas, las medias ajustadas se compararon mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Supervivencia en las procedencias

Para el análisis de varianza realizado para la supervivencia, no se encontraron diferencias entre las procedencias ($F = 1.17$; $p = 0.3118$) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Efecto de la procedencia sobre la supervivencia mediante un modelo lineal generalizado mixto (GLIMMIX) de un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.

Efecto	gl (Num)	gl (Den)	F	p-valor
PRO	2	410	1.17	0.3118

PRO = Procedencia; gl (Núm.) = grados de libertad del numerador; gl (Den) = grados de libertad del denominador; F = Estadístico F; p-valor = Valor p.

Laguna de Sánchez presentó la mayor supervivencia (0.69) y La Encantada la menor probabilidad de supervivencia (0.58) (Figura 5).

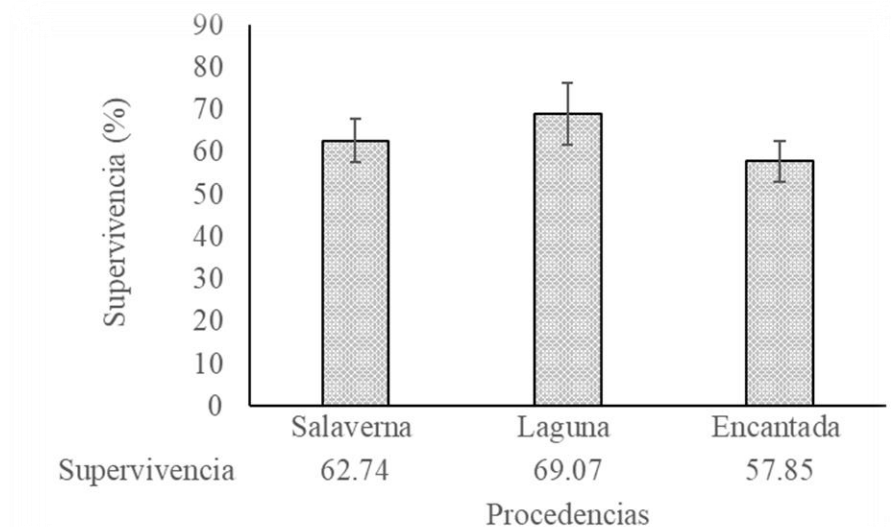


Figura 5. Supervivencia (%) de un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah. Las barras de error representan el error estándar.

La supervivencia promedio de las tres procedencias en la plantación a los 22 años de establecida fue de 60.82 %, valor inferior al reportado por Montoya (2016), quien registró una sobrevivencia promedio de 69.2 %. De igual manera, Sánchez (2013) tampoco encontró diferencias significativas entre procedencias. Sin embargo, en ambos estudios se mantiene el mismo patrón, donde Laguna de Sánchez presenta los mayores valores de supervivencia, seguida de Salaverna y, finalmente, La Encantada. La razón más aceptada por la que no se presentan diferencias es

que las procedencias se desarrollan de manera semejante al estar expuestas históricamente a condiciones ambientales similares. Aunque el porcentaje general de supervivencia fue bajo, este fue superior al reportado por De los Ríos *et al.* (2003), quienes registraron una supervivencia general del 50 %.

De manera similar, Rodríguez-Laguna *et al.* (2009) no detectaron diferencias para la supervivencia en un ensayo de nueve procedencias de *P. greggii* establecido en Galeana, Nuevo León. Los autores plantean que este comportamiento podría estar relacionado con la plasticidad fenotípica de la especie y con la evolución de las procedencias bajo condiciones ambientales semejantes en el norte de México.

4.1. Crecimiento en altura total (m)

El análisis de componentes de varianza encontró que la varianza de los efectos de bloque (BL) y la interacción bloque $\times$ procedencia (BL*PRO) no fueron significativos ($p > 0.05$) (Cuadro 3). En contraste, la varianza residual fue mayor y altamente significativa ($p < 0.0001$), lo que indica que la mayor parte de la variabilidad en la altura se debe, seguramente, a diferencias individuales entre los árboles (Cuadro 3).

Cuadro 3. Estimación de los componentes de varianza (bloque, interacción bloque*procedencia y residual) del modelo mixto (REML) para la altura total (m) de un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.

Componente de Varianza	Estimación	Error Estándar	Valor Z	p-valor
BL	0.00994	0.024	0.41	0.3394
BL*PRO	0.0294	0.031	0.93	0.1756
Residual	0.2968	0.027	10.96	<.0001

BL = Bloque; BL*PRO = Bloque $\times$ Procedencia.

El análisis de varianza indicó que no se encontraron diferencias entre las procedencias con respecto a la altura total ($F = 1.48$; $p = 0.3212$) (Cuadro 4).

Cuadro 4. Prueba de efectos fijos de la procedencia sobre la altura total (m) mediante un modelo mixto (REML) con bloques aleatorios de un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah. Se muestran grados de libertad (numerador y denominador), valor F y nivel de significancia.

Efecto	gl (Núm.)	gl (Den)	F	p-valor
PRO	2	4.44	1.48	0.3212

PRO = Procedencia; gl (Núm.) = grados de libertad del numerador; gl (Den) = grados de libertad del denominador; F = Estadístico F; p-valor = Valor p.

Aunque no se encontraron diferencias entre procedencias en altura total, La Encantada presentó el mayor valor promedio en altura (2.59 ± 0.11), mientras que Salaverna obtuvo los menores valores (2.35 ± 0.11) y la procedencia Laguna de Sánchez presentó los valores intermedios (2.40 ± 0.14) (Figura 6).

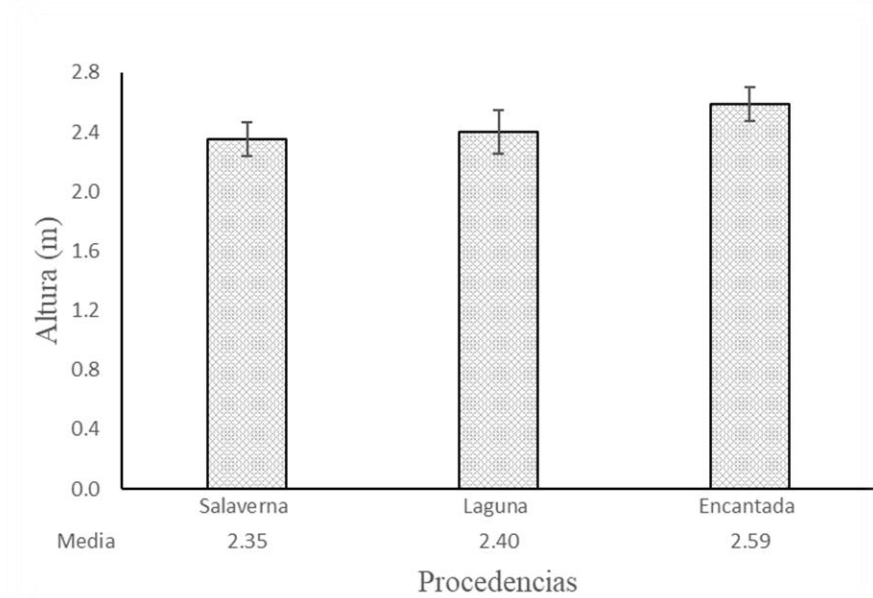


Figura 6. Altura total promedio (m) (media $\pm$ error estándar) de un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah. Las letras diferentes (a, b) indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). $n = 100$ para Salaverna, 33 para Laguna, 120 para La Encantada. En este caso, no se detectaron diferencias significativas, por lo que todas comparten la letra “a”.

Este patrón de altura (Figura 6) donde el valor más alto lo tiene La encantada seguido de Laguna de Sánchez y el valor más bajo Salaverna se repite en estudios anteriores como el de Montoya (2016), donde no encuentra diferencias significativas, pero las alturas se encuentran en el mismo orden, dominando La Encantada. Esto sugiere que las procedencias evaluadas presentan respuestas de crecimiento semejantes bajo las condiciones ambientales de Mesa de las Tablas.

Aunque los resultados de Montoya (2016) indican que las procedencias La Encantada y Laguna de Sánchez presentaron valores de altura muy similares, en la presente evaluación La Encantada mostró una ligera ventaja en crecimiento, lo que podría indicar diferencias acumulativas en aclimatación o respuesta fisiológica conforme avanza la edad de la plantación.

4.2. Crecimiento en diámetro basal (cm)

El análisis de componentes de varianza mostró que el efecto de BL no fue significativo ($p = 0.2679$) (Cuadro 5). Asimismo, la interacción BL*PRO no aportó variación detectable al modelo, lo que se traduce como una inexistente variación entre bloques y procedencias. La variabilidad observada se atribuyó principalmente al error residual (9.9421; $p < 0.0001$), atribuida a la variabilidad individual y al error experimental (Cuadro 5).

Cuadro 5. Estimación de los componentes de varianza (bloque, interacción bloque*procedencia y residual) del modelo mixto (REML) para el diámetro basal (cm) de un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.

Variable	Estimación	Error Estándar	Valor Z	p-valor
BL	0.1794	0.2897	0.62	0.2679
BL*PRO	0			
Residual	9.9421	0.8951	11.11	<.0001

BL = Bloque; BL*PRO = Bloque x Procedencia.

El análisis de varianza mostró que no existen diferencias entre procedencias ($F = 0.59$; $p = 0.5533$) (Cuadro 6). Esto indica que el diámetro promedio es similar entre las procedencias estudiadas.

Cuadro 6. Prueba de efectos fijos de la procedencia sobre el diámetro basal (cm) mediante modelo mixto (REML) con bloques aleatorios en un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.

Efecto	gl (Núm.)	gl (Den)	F	p-valor
PRO	2	249	0.59	0.5533

PRO = Procedencia; gl (Núm.) = grados de libertad del numerador; gl (Den) = grados de libertad del denominador; F = Estadístico F; p-valor = Valor p.

Aunque no se hallaron diferencias entre las procedencias, cabe destacar que Salaverna presentó el mayor valor promedio en diámetro basal (10.92 ± 0.38), Laguna de Sánchez obtuvo los menores valores (10.36 ± 0.59) y, finalmente, La Encantada obtuvo los valores intermedios (10.53 ± 0.35) (Figura 7).

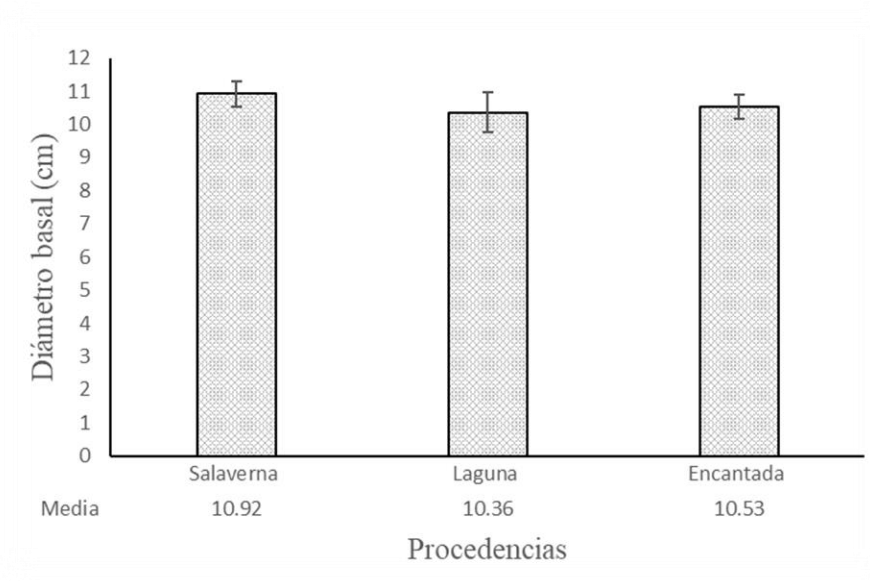


Figura 7. Diámetro basal promedio (cm) (media $\pm$ error estándar) de un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.

La procedencia Salaverna mantuvo el mayor valor promedio de diámetro basal tanto en la evaluación realizada por Montoya (2016) como en la presente evaluación, lo que indica una tendencia consistente hacia un mayor crecimiento en diámetro bajo las condiciones ambientales del sitio de plantación.

En un estudio de Ake Castillo (2014) se evaluó el desempeño de tres procedencias de *Pinus pinceana* Gordon en tres localidades: Los Lirios, Arteaga, Coahuila; Jagüey de Ferniza, Saltillo, Coahuila y San José Carbonerías, Mazapil, Zacatecas. Se analizaron variables como supervivencia, altura total, diámetro basal y el diámetro de copa tras un periodo de cinco años desde la siembra. Los resultados mostraron que el análisis de varianza para el diámetro basal no presentó diferencias en la interacción entre localidades por procedencia; tampoco hubo diferencias entre las procedencias probadas, únicamente entre localidades ($Pr > F = 0.0001$). Se muestra también que San José Carbonerías es la mejor localidad, mostrando que la procedencia de Palmas Altas fue la mejor en el sitio.

Contreras (2005), al evaluar un ensayo de tres procedencias de *P. greggii* en Arteaga, Coahuila, a 12 años de plantado, no encontró diferencias para la variable diámetro basal entre las procedencias probadas; los promedios fueron 7.33 cm para la procedencia de Jamé, 6.45 cm para Los Lirios y 6.64 cm para Cuauhtémoc.

4.3. Cobertura de copa (m²)

El análisis de componentes de varianza indicó que los efectos de BL y BL*PRO presentaron una varianza cercana a cero (Cuadro 7). Esto indica que la mayor parte de la variabilidad observada en cobertura se presentó a nivel residual, es decir, entre individuos dentro de las procedencias. Asimismo, la varianza residual fue significativa ($p < 0.0001$), lo que evidencia una considerable variabilidad individual en el desarrollo de copa (Cuadro 7).

Cuadro 7. Estimación de los componentes de varianza (bloque, interacción bloque*procedencia y residual) para la cobertura de copa (m²) mediante modelo mixto REML en un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.

Variable	Estimación	Error Estándar	Valor Z	p-valor
BL	0			
BL*PRO	0			
Residual	1.148	0.1027	11.18	<.0001

BL = Bloque; BL*PRO = Bloque x Procedencia.

El análisis de varianza encontró diferencias entre las procedencias con respecto a la cobertura de copa; dichas diferencias fueron altamente significativas ($F = 5.65$; $p = 0.0040$) (Cuadro 8).

Cuadro 8. Prueba de efectos fijos de la procedencia sobre la cobertura de copa (m²) mediante modelo mixto (REML) de un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.

Efecto	gl (Num)	gl (Den)	F	p-valor
PRO	2	250	5.65	0.0040

PRO = Procedencia; gl (Núm.) = grados de libertad del numerador; gl (Den) = grados de libertad del denominador; F = Estadístico F; p-valor = Valor p.

La prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$) indicó diferencias entre Laguna de Sánchez y La Encantada ($p = 0.0026$), así como entre las procedencias Salaverna y Laguna ($p = 0.0413$) (Figura 8). Laguna de Sánchez presentó un mayor desarrollo de copa en comparación con las demás procedencias evaluadas.

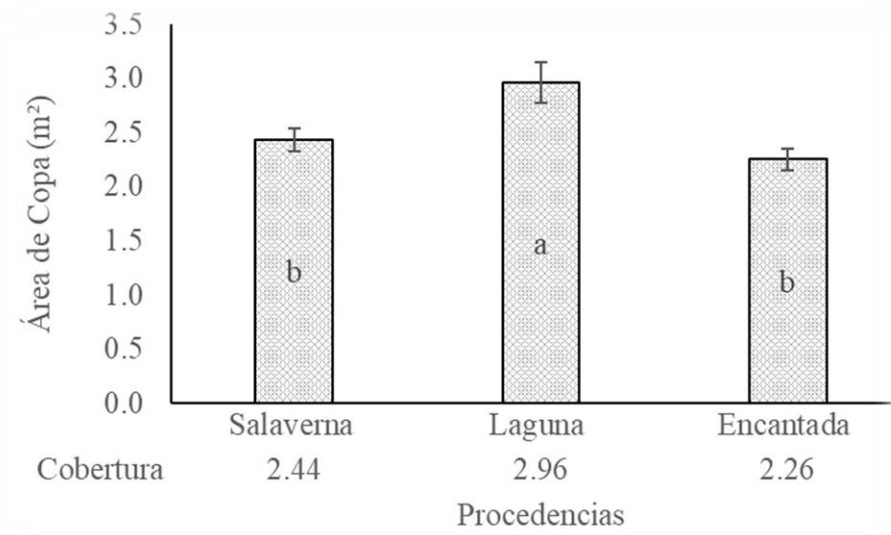


Figura 8. Área de copa promedio (m^2) (media $\pm$ error estándar) con intervalos de confianza del 95 % de un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey, $\alpha = 0.05$).

Los resultados obtenidos por Sánchez (2013) para la variable cobertura de copa demostraron que no hay diferencias y la procedencia con mayor cobertura fue La Encantada con 0.237 m^2 ; en el presente estudio sí se encontraron diferencias altamente significativas, ya que la procedencia con mayor cobertura fue Laguna de Sánchez con 2.96 m^2 . Las diferencias entre procedencias en cobertura de copa no fueron evidentes en etapas tempranas del ensayo, pero se hicieron más notorias conforme avanzó la edad de la plantación. Esto suena lógico, ya que las copas grandes y densas funcionan como un indicador indirecto de que el árbol está realizando una fotosíntesis eficiente; una copa bien desarrollada representa árboles con un mayor vigor fisiológico, mayor capacidad de rendimiento maderable y una mejor adaptación a su entorno (Hernández Ramos *et al.*, 2022).

Viveros-Viveros *et al.* (2006) reportaron diferencias significativas en el diámetro de copa entre procedencias ($P = 0.03$) y entre sitios de plantación ($P = 0.01$) en *Pinus pseudostrobus* evaluado a los 24 meses de edad. El mayor diámetro promedio de copa se registró en el sitio de menor altitud, Los Amoles (2200 msnm), con 47.1 cm^2 , mientras que en Cerro de Pario (2800 msnm) fue de 40.3 cm^2 . Los autores señalaron que estas diferencias reflejan la influencia del origen genético y de las condiciones ambientales sobre el desarrollo y amplitud de la copa de los árboles.

4.4. Número de verticilos

La varianza entre bloques fue baja (0.118) y no significativa ($p = 0.2466$), lo que indica una escasa influencia de bloques sobre el número de verticilos (Cuadro 9). En contraste, la varianza residual fue considerablemente mayor (5.93) y altamente significativa ($p < 0.0001$), lo que evidencia que la mayor parte de la variabilidad se encuentra a nivel individual. Esto sugiere que el número de verticilos está determinado principalmente por diferencias entre árboles y no por condiciones del sitio o la procedencia.

Cuadro 9. Estimación de los componentes de varianza (bloque y residual) para el número de verticilos. Modelo mixto REML de un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.

Variable	Estimación	Error Estándar	Valor Z	p-valor
BL	0.118	0.172	0.69	0.246
Residual	5.93	0.534	11.12	<.0001

BL = Bloque; BL*PRO = Bloque x Procedencia.

El análisis de la varianza mostró que no se hallaron diferencias entre las procedencias ($F = 0.04$; $p = 0.9641$) (Cuadro 10). Esto indica que el número de verticilos promedio es similar entre procedencias.

Cuadro 10. Prueba de efectos fijos de la procedencia sobre el número de verticilos mediante modelo mixto (REML) de un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.

Efecto	gl (Num)	gl (Den)	F	p-valor
PRO	2	249	0.04	0.9641

PRO = Procedencia; gl (Núm.) = grados de libertad del numerador; gl (Den) = grados de libertad del denominador; F = Estadístico F; p-valor = Valor p.

Aunque no se encontraron diferencias en el número de verticilos, Salaverna obtuvo los mayores valores (17.06 ± 0.30) (Cuadro 11).

Cuadro 11. Número de verticilos promedio (media $\pm$ error estándar) de un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah. Se indica el tamaño de muestra (n) por procedencia.

Procedencia	Media	n
1	17.11 ± 0.43	100
2	16.94 ± 0.72	33
3	17.03 ± 0.38	120

La variabilidad por árbol podría estar influenciada por factores propios del individuo, como microambiente o plasticidad fenotípica, que por el origen genético de las procedencias evaluadas. Los verticilos constituyen un componente fundamental para identificar y medir los patrones de crecimiento y la calidad de la madera (Salazar-García *et al.*, 1999). Además, Mutke (2005) reporta una asociación directa entre el vigor de los brotes, es decir, un mayor número de ramas por verticilo, y la capacidad de floración femenina. Los verticilos más vigorosos producen más flores femeninas y en consecuencia, una mayor producción de piñón; este factor explica hasta el 74 % de la variación en la cosecha final.

Resultados similares fueron reportados por Viveros-Viveros *et al.* (2006), quienes evaluaron la variación genética y el crecimiento de nueve procedencias de *Pinus pseudostrobus* establecidas en dos sitios con diferentes altitudes en el estado de Michoacán. Los autores analizaron variables como supervivencia, altura total, diámetro basal, diámetro de copa y número total de verticilos. Para la variable número de verticilos, evaluada a los 24 meses de edad, no se detectaron diferencias significativas entre procedencias ni entre sitios. Estos resultados sugieren que, a diferencia de otras variables de crecimiento como la altura o diámetro basal, el número de verticilos presentó un comportamiento relativamente homogéneo, sin una influencia detectable del ambiente de establecimiento ni del origen genético del material evaluado.

4.6. Análisis de la expresión sexual por procedencias

4.6.1. Proporción de hembras por procedencia

La estimación de parámetros de componentes de varianza indicó que el efecto aleatorio de bloque fue nulo (Cuadro 12), lo que sugiere que no existe variabilidad atribuible a los bloques en la proporción de hembras.

Cuadro 12. Estimación de componentes de varianza asociado al efecto aleatorio de bloque (BL) para la proporción de hembras en un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.

Variable	Estimación
BL	3.09E-18

BL = Bloque

El efecto fijo de procedencia tampoco mostró diferencias en la proporción de hembras entre procedencias ($F = 0.18$; $p = 0.8377$) (Cuadro 13). Esto indica que la procedencia no tuvo un

efecto sobre la probabilidad de ocurrencia de individuos hembra, por lo que las variaciones observadas pueden atribuirse al azar.

Cuadro 13. Prueba de efectos fijos de la procedencia sobre la probabilidad de ser hembra, mediante un modelo lineal generalizado mixto (GLMM) con distribución binomial y función de enlace logit. de un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.

Efecto	gl (Num)	gl (Den)	F	p-valor
PRO	2	410	0.18	0.8377

PRO = Procedencia; gl (Núm.) = grados de libertad del numerador; gl (Den) = grados de libertad del denominador; F = Estadístico F; p-valor = Valor p.

La proporción estimada de hembras varió entre 33 y 37 % entre procedencias, lo que indica una distribución homogénea de individuos hembra entre las procedencias (Cuadro 14).

Cuadro 14. Proporción estimada (probabilidad predicha) de individuos hembras por procedencia, con error estándar, obtenida del GLMM binomial (logit) en un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.

Procedencia	Proporción estimada %	Error estándar
Salaverna	33.10	3.72
Laguna	37.50	6.98
La Encantada	35.10	3.3

4.6.2. Proporción de machos por procedencia

El efecto aleatorio de bloque para la proporción de machos fue bajo (0.03761 ± 0.06517), lo que indica una influencia mínima de los bloques sobre la distribución de individuos machos. El análisis del efecto de la procedencia sobre la proporción de machos no mostró diferencias ($F = 0.95$; $p = 0.3872$) (Cuadro 15). Esto indica que la distribución de individuos machos es homogénea entre las procedencias evaluadas, por lo que las variaciones observadas pueden atribuirse al azar.

Cuadro 15. Prueba de efectos fijos de la procedencia sobre la probabilidad de ser macho (GLMM binomial, logit) en un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.

Efecto	gl (Num)	gl (Den)	F	p-valor
PRO	2	410	0.95	0.3872

PRO = Procedencia; gl (Núm.) = grados de libertad del numerador; gl (Den) = grados de libertad del denominador; F = Estadístico F; p-valor = Valor p.

Laguna de Sánchez presentó la mayor proporción de machos (26.9 %); La Encantada el más bajo (21 %). Lo que indica una distribución homogénea de individuos machos entre procedencias (Cuadro 16).

Cuadro 16. Proporción estimada (probabilidad predicha) de individuos machos por procedencia con error estándar (GLMM binomial) en un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.

Procedencia	Proporción estimada %	Error estándar
Salaverna	26.7	3.9
Laguna	26.9	6.6
La Encantada	21	3.2

4.6.3. Proporción monoico-hembra por procedencia

La varianza del efecto de bloque para la categoría Monoico-hembra fue casi nula, lo que se debe a la poca frecuencia de individuos en esta categoría. La procedencia sobre la proporción de individuos monoicos hembra no arrojó diferencias ($F = 0.00$; $p = 0.9965$) (Cuadro 17).

Cuadro 17. Prueba de efectos fijos de la procedencia sobre la probabilidad de ser monoico-hembra (GLMM binomial) en un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah. Debido a la frecuencia extremadamente baja (1 individuo), los resultados deben interpretarse con cautela.

Efecto	gl (Num)	gl (Den)	F	p-valor
PRO	1	410	0	0.9965

PRO = Procedencia; gl (Núm.) = grados de libertad del numerador; gl (Den) = grados de libertad del denominador; F = Estadístico F; p-valor = Valor p.

La proporción de individuos monoicos hembra fue prácticamente nula. Únicamente en Salaverna se registró un valor de 0.01875 (equivalente a 1.875 %). Estos resultados indican que la presencia de individuos monoicos hembra es extremadamente limitada en la plantación (Cuadro 18).

Cuadro 18. Proporción estimada (probabilidad predicha) de individuos monoico-hembra por procedencia, con error estándar (GLMM) en un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.

Procedencia	Proporción estimada %	Error estándar
Salaverna	1.87	2.06
Laguna	0	0
La Encantada	0	0

4.6.4. Proporción monoico-macho por procedencia

La estimación del parámetro de componentes de varianza del efecto de bloques fue prácticamente nula ($1.94E-18$), lo que indica que los bloques no influyeron sobre la distribución de la proporción de Monoico-Macho. El análisis de varianza mostró que no se encontraron diferencias entre las procedencias con respecto a la proporción de individuos monoicos con predominancia masculina ($F = 1.36$; $p = 0.2583$) (Cuadro 18). Esto indica que la distribución de esta condición sexual fue similar entre procedencias, y que las diferencias observadas no fueron detectables debido a la baja frecuencia de esta categoría en la población evaluada (Cuadro 19).

Cuadro 19. Prueba de efectos fijos de la procedencia sobre la probabilidad de ser monoico-macho (GLMM binomial) en un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.

Efecto	gl (Num)	gl (Den)	F	p-valor
PRO	2	410	1.36	0.2583

La proporción de individuos monoicos machos fue baja en las tres procedencias evaluadas. Laguna presentó la mayor proporción estimada, seguida por La Encantada y Salaverna. Esto indica una distribución homogénea de esta condición sexual (Cuadro 20).

Cuadro 20. Proporción estimada (probabilidad predicha) de individuos monoico-macho por procedencia, con error estándar (GLMM) en un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah.

Procedencia	Proporción estimada %	Error estándar
Salaverna	0.63	0.00623
Laguna	4.17	0.02884
La Encantada	1.44	0.008267

4.6.5. Distribución sexual en la plantación

En la estructura sexual de los individuos evaluados se observó una mayor proporción de individuos femeninos respecto a masculinos, mientras que los individuos monoicos representaron una fracción reducida de la población (Figura 9).

Montoya (2016) encontró que, a los 17 años, las tres procedencias de *P. johannis* presentan una tendencia marcada hacia la masculinidad, además de registrar presencia de individuos monoicos en las tres procedencias evaluadas. Sin embargo, a los 26 años, las tres procedencias mostraron un cambio en la expresión sexual hacia la feminidad, mientras que únicamente la procedencia Salaverna mantuvo presencia de individuos monoicos.

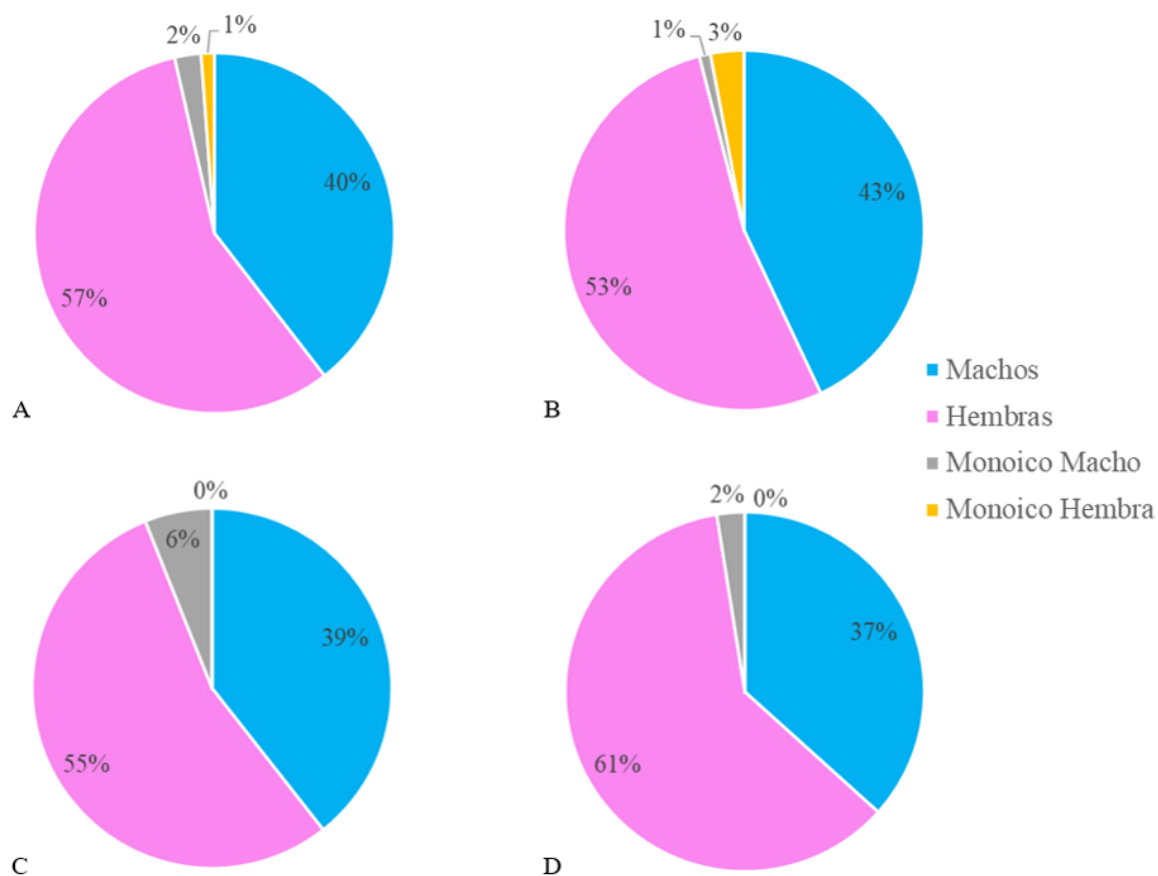


Figura 5. Distribución de las categorías sexuales (macho, hembra, monoico-hembra, monoico-macho) en un ensayo de tres procedencias de *Pinus johannis* M.-F. Robert-Passini a los 22 años de establecido en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah: (A) general de las tres procedencias (n = total de árboles con sexo determinado), (B) Salaverna, (C) Laguna de Sánchez, (D) La Encantada. Los porcentajes se basan en árboles vivos con sexo identificado.

En algunas especies de pinos, como *Pinus edulis* Engelm., la función masculina se expresa en las primeras etapas reproductivas, seguida de la función femenina, posteriormente, por la expresión de ambas funciones (monoica) cuando el árbol alcanza la madurez reproductiva (Floyd, 1983). Lo anterior es similar con nuestros resultados, puesto que Montoya (2016) indica que, en etapas tempranas, las tres procedencias presentaban predominancia masculina; no obstante, nueve años después, la dominancia cambió hacia individuos femeninos. Este comportamiento podría estar relacionado con la madurez reproductiva de los árboles, así como con los procesos de aclimatación de las procedencias al sitio de establecimiento. Además, la similitud climática entre las zonas de origen de las procedencias y las condiciones ambientales

de la plantación probablemente favoreció la aclimatación y estabilidad reproductiva de los individuos.

En algunas gimnospermas, la expresión sexual es un rasgo lábil asociado a factores ambientales abióticos o bióticos. Los factores abióticos pueden influir en la expresión sexual, lo que resulta en una distribución diferencial de machos y hembras. Los machos suelen encontrarse en el límite del hábitat adecuado, en condiciones ambientales más adversas, mientras que las hembras se encuentran en mejores condiciones ambientales (Charnov, 1984; Tikhonova, 2003).

La mayoría de las variables no presentaron diferencias significativas entre procedencias, posiblemente al bajo número de bloques (4) y la mortalidad del 39.2 % redujeron los grados de libertad, especialmente para altura ($gl(Den) = 4.44$) y para las pruebas de efectos fijos, limitando la capacidad de detectar diferencias reales (error tipo II). Además, no se verificaron formalmente los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas debido al reducido tamaño de muestra. Estos factores son comunes en ensayos forestales de larga duración (Kapeller *et al.*, 2013) y deben considerarse al interpretar la ausencia de diferencias.

5. CONCLUSIONES

1. La procedencia Laguna de Sánchez mostró el mayor valor de supervivencia (69.07 %) y la mayor área de copa, por lo que podría ser preferible para programas de restauración en sitios ecológicamente equivalentes.
2. Para las variables supervivencia ($p = 0.3118$), altura total ($p = 0.3212$), diámetro basal ($p = 0.5533$), número de verticilos ($p = 0.9641$) y proporción de sexos (todas $p > 0.05$), no se rechaza H_0 . Esto indica que no existen diferencias entre las tres procedencias en estos caracteres.
3. Para la variable área de copa, se rechaza la hipótesis nula (H_0) de igualdad entre procedencias ($p = 0.004$). La procedencia Laguna de Sánchez (2.96 m²) superó significativamente a La Encantada (2.26 m²).
4. La ausencia de diferencias en la mayoría de las variables sugiere que las condiciones ambientales del sitio experimental (Mesa de las Tablas) son similares a los sitios de origen de las procedencias, promoviendo respuestas fenotípicas homogéneas.

6. RECOMENDACIONES

1. Continuar con las evaluaciones periódicas del ensayo para documentar la evolución de la supervivencia, el crecimiento y la labilidad sexual de *P. johannis*.
2. Realizar un estudio de diversidad genética mediante microsatélites (SSR) o SNPs para evaluar si la similitud fenotípica se refleja en similitud genética entre las tres procedencias.
3. Establecer ensayos de mezcla de procedencias (provenance mix) para evaluar si la combinación de poblaciones mejora la productividad y estabilidad frente a estrés.
4. En futuros ensayos, aumentar el número de bloques (6-8) y el número de árboles por parcela (16-25) usando un diseño de bloques incompletos balanceados si el terreno es heterogéneo, con el fin de aumentar la precisión de los análisis estadísticos.
5. Para análisis futuros, emplear siempre modelos mixtos (PROC MIXED, GLIMMIX) con el método de Kenward-Roger para manejar datos desbalanceados.
6. En reforestaciones con fines de restauración de suelos degradados, se recomienda usar la procedencia Laguna de Sánchez por su mayor supervivencia y área de copa.

7. LITERATURA CITADA

- Aguirre-Limón, V., Alanís-Flores, G., González-Rojas, J. I., Flores-Suárez, A., & Favela-Lara, S. (2017). Variación genética de *Pinus pinceana* Gordon: evidencia de conectividad en poblaciones fragmentadas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(43), 39–63. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i43.65>
- Aitken, S. N., Yeaman, S., Holliday, J. A., Wang, T., & Curtis-McLane, S. (2008). Adaptation, migration or extirpation: Climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications*, 1(1), 95–111. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x>
- Ake Castillo E. del J. (2014). Evaluación de tres procedencias de *Pinus pinceana* Gordon en tres localidades del noreste de México a cinco años de su plantación. (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/977>
- Allendorf, F. W., Luikart, G., & Aitken, S. N. (2013). Conservation and the genetics of populations (2nd ed.). Wiley-Blackwell. <https://www.wiley.com/en-us/shop/general-introductory-life-sciences/conservation-and-the-genetics-of-populations-2nd-edition-p-9780470671450>
- Bannister, P., & Neuner, G. (2001). Frost resistance and the distribution of conifers. En F. J. Bigras & S. J. Colombo (Eds.), *Conifer cold hardiness* (pp. 3–22). Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9650-3_1
- Barrera A., J. D. (2007). Aspectos ecológicos de poblaciones de *Pinus johannis* M.–F. Robert en la Sierra Plegada de Coahuila y Nuevo León [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/918>
- Barrett, S. C. H. (2002). The evolution of plant sexual diversity. *Nature Reviews Genetics*, 3(4), 274–284. <https://doi.org/10.1038/nrg776>
- Bischoff, A., Steinger, T., & Müller-Schärer, H. (2010). The importance of plant provenance and genotypic diversity of seed material used for ecological restoration. *Restoration Ecology*, 18(3), 338–348. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2008.00454.x>
- Boykin, D., Camp, M. J., Johnson, L. A., Kramer, M., Meek, D., Palmquist, D., Vinyard, B., & West, M. (2011). Generalized linear mixed model estimation using PROC GLIMMIX: Results from simulations when the data and model match, and when the model is misspecified. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 16, 137–158. DOI: [10.4148/2475-7772.1064](https://doi.org/10.4148/2475-7772.1064)
- Burkey, T. V. (1993a). Edge effects in seed and egg predation at two neotropical rainforest sites. *Biological Conservation*, 66(2), 139–143. [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(93\)90145-Q](https://doi.org/10.1016/0006-3207(93)90145-Q)

- Burkey, T. V. (1993b). Living dangerously but independently, or safely and contingently. *Trends in Ecology & Evolution*, 8(8), 302. https://tvburkey.org/documents/TREE_8_8_302.pdf
- Burley, J. (1969). Methodology for provenance trials in the tropics. *Unasylva*, 23(3), 24–28. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/4/93269e/93269e05.htm>
- Burley, J., & Wood, P. J. (1976). A manual on species and provenance research with particular reference to the tropics (Tropical Forestry Papers No. 10). Commonwealth Forestry Institute, University of Oxford. <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:a3b00c7f-f35c-4366-8238-f1eb38d1f72c>
- Burrows, B. A., & McCubbin, A. G. (2018). Plant reproduction. En M. K. Skinner (Ed.), *Encyclopedia of reproduction* (2nd ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.20609-2>
- Castilleja Sánchez, P., Delgado Valerio, P., Sáenz-Romero, C., & Herrerías-Diego, Y. (2016). El éxito reproductivo y la endogamia difieren en poblaciones fragmentadas de *Pinus rzedowskii* y *Pinus ayacahuite* var. *veitchii*, dos pinos endémicos mexicanos amenazados. *Bosque*, 37(1), 177–184. <https://doi.org/10.3390/f7080178>
- CETENAL. 1977. Carta topográfica, G14C45 San Rafael, Nuevo León y Coahuila. Escala 1:50,000. Comisión de Estudios del Territorio Nacional. <https://scholarworks.utrgv.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1176&context=mexmaps>
- Charnov, E. L. (1984). Behavioral ecology of plants. En J. R. Krebs & N. B. Davies (Eds.), *Behavioral ecology: An evolutionary approach* (pp. 362–379). Sinauer Associates. <https://www.biodiversitylibrary.org/part/242237>
- Cochran, W. G., & Cox, G. M. (1965). *Diseños experimentales*. (2ª. ed., versión en español). Trillas. https://books.google.com.mx/books/about/Dise%C3%B1os_experimentales.html?id=haeHOWAACAAJ&redir_esc=y
- Contreras M., R. (2005). Ensayo de tres procedencias de *Pinus greggii* Engelm. Establecido en el C.A.E.S.A. Arteaga, Coahuila. Tesis profesional. UAAAN. Buena Vista, Saltillo, Coahuila, México. 58p. <https://www.sidalc.net/search/Record/KOHA-OAI-UAAAN:58713>
- De los Ríos, E., De Hoogh, R., Domínguez, P. A., & Návar, J. (2003). Ensayos de procedencias con pinos piñoneros en el nordeste de México [Ponencia]. XII Congreso Forestal Mundial, Québec, Canadá. <https://www.fao.org/4/XII/0592-B4.htm>

- Delgado Valerio, P., Rebolledo Camacho, V., Flores López, C., Manzanilla Quiñones, U., & Corona Mora, D. L. (2013). Catálogo descriptivo de áreas productoras de semillas y de conservación del género *Pinus*. CONAFOR–CONACYT. <https://es.scribd.com/document/597193997/5-1-Catalogo-descriptivo-de-areas-productoras-de-semillas-2014>
- Dieters, M. J., White, T. L., Littell, R. C., & Hodge, G. R. (1995). Application of approximate variances of variance components and their ratios in genetic tests. *Theoretical and Applied Genetics*, 91(1), 15–24. <https://doi.org/10.1007/BF00220853>
- Dubreuil, M., Riba, M., González-Martínez, S. C., Vendramin, G. G., Sebastiani, F., & Mayol, M. (2010). Genetic effects of chronic habitat fragmentation revisited: Strong genetic structure in a temperate tree, *Taxus baccata* (Taxaceae), with great dispersal capability. *American Journal of Botany*, 97(2), 303–310. <https://doi.org/10.3732/ajb.0900148>
- Dutkowski, G. W., Costa e Silva, J., Gilmour, A. R., Wellendorf, H., & Aguiar, A. (2006). Spatial analysis enhances modelling of a wide variety of traits in forest genetic trials. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(7), 1851–1870. <https://doi.org/10.1139/x06-059>
- Dvorak, W. S., Jordan, A. P., Hodge, G. R., & Romero, J. L. (2000). Assessing evolutionary relationships of pines in the Oocarpae and Australes subsections using RAPD markers. *New Forests*, 20, 163–192. <https://doi.org/10.1023/A:1006763120982>
- FAO. (2010). Inventarios forestales nacionales: Manual de campo. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/4/ae578s/ae578s00.htm>
- Fisher, R. A. (1930). The genetical theory of natural selection. Clarendon Press. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.27468>
- Flores-Rentería, L., Vázquez-Lobo, A., Whipple, A. V., Piñero, D., Márquez-Guzmán, J., & Domínguez, C. A. (2011). Functional bisporangiate cones in *Pinus johannis* (Pinaceae): Implications for the evolution of bisexuality in seed plants. *American Journal of Botany*, 98(1), 130–139. <https://doi.org/10.3732/ajb.1000275>
- Flores-Rentería, L., Wegier, A., Ortega-Del Vecchyo, P., Ortiz-Medrano, A., Whipple, A. V., Molina-Freaner, F., & Domínguez, C. A. (2013). Genetic, morphological, geographical and ecological approaches reveal phylogenetic relationships in complex groups: An example of recently diverged pinyon pine species (Subsection *Cembroides*). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 69, 940–949. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2013.08.005>
- Floyd, M. E. (1983). Dioecy in five *Pinus edulis* populations in the southwestern United States. *The American Midland Naturalist*, 110(2), 405–411. <https://doi.org/10.2307/2425279>

- Fonseca Juárez, R. M. (2003). De piñas y piñones. *Ciencias*, (69), 64–65. <https://www.revistas.unam.mx/index.php/cns/article/view/11883>
- Frankham, R., Ballou, J. D., & Briscoe, D. A. (2002). *Introduction to conservation genetics*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511808999>
- Freeman, D. C., Harper, K. T., & Charnov, E. L. (1980). Sex change in plants: Old and new observations and new hypotheses. *Oecologia*, 47(2), 222–232. <https://doi.org/10.1007/BF00346825>
- García A., A., y M.-F. Passini. 1993. Distribución y ecología de *Pinus johannis* M.-F. Robert. *Phytologia* 74: 125-127. <https://agris.fao.org/search/en/providers/123819/records/6473634fe17b74d22253fdea>
- García Arévalo, A., & González Elizondo, M. S. (2003). Pináceas de Durango. Instituto de Ecología, A.C. & Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). https://books.google.com/books/about/Pin%C3%A1ceas_de_Durango.html?id=5T5iA AAAMAAJ
- García-Gómez, V., Ramírez-Herrera, C., Flores-López, C., & López-Upton, J. (2014). Diversidad y estructura genética de *Pinus johannis*. *Agrociencia*, 48(8), 863-873. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1125>
- Givnish, T. J. (1980). Ecological constraints on the evolution of breeding systems in seed plants: Dioecy and dispersal in gymnosperms. *Evolution*, 34(5), 959–972. <https://doi.org/10.2307/2408001>
- Gómez-Aparicio, L., Zavala, M. A., Bonet, F. J., & Zamora, R. (2009). Are pine plantations valid tools for restoring Mediterranean forests? An assessment along abiotic and biotic gradients. *Ecological Applications*, 19(8), 2124–2141. <https://doi.org/10.1890/08-1656.1>
- Goodman, D. (1987). Consideration of stochastic demography in the design and management of biological reserves. *Natural Resource Modeling*, 1(2), 205–234. <https://doi.org/10.1111/j.1939-7445.1987.tb00014.x>
- Hernández Ramos, J., Reyes Hernández, V. J., & Beltrán Rodríguez, L. (2022). La copa como indicador fotosintético relevante en el manejo forestal de bosques templados. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(74), 4–33. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i74.1267>
- Huber, D. A., White, T. L., & Hodge, G. R. (1994). Variance component estimation techniques compared for two mating designs with forest genetic architecture through computer simulation. *Theoretical and Applied Genetics*, 88(2), 236–242. <https://doi.org/10.1007/BF00225903>

- Hultine, K. R., Grady, K. C., Wood, T. E., Shuster, S. M., Stella, J. C., & Whitham, T. G. (2016). Climate change perils for dioecious plant species. *Nature Plants*, 2, 16109. <https://doi.org/10.1038/nplants.2016.109>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1983). *Síntesis geográfica de Coahuila*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825220952/702825220952_2.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010a). *Compendio de información geográfica municipal 2010: Arteaga, Coahuila de Zaragoza*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/05/05004.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010b). *Compendio de información geográfica municipal 2010: General Zaragoza, Nuevo León*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/19/19024.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010c). *Compendio de información geográfica municipal 2010: Mazapil, Zacatecas*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/32/32026.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010d). *Compendio de información geográfica municipal 2010: Santiago, Nuevo León*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/19/19049.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2026). Topografía. Recuperado en mayo del 2026, de la página del Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/>
- Isaac-Renton, M., Montwé, D., Hamann, A., Spiecker, H., Cherubini, P., & Treydte, K. (2018). Northern forest tree populations are physiologically maladapted to drought. *Nature Communications*, 9, 5254. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07701-0>
- Janzen, D. H. (1986). The eternal external threat. En M. E. Soulé (Ed.), *Conservation biology: The science of scarcity and diversity* (pp. 286–303). <https://portals.iucn.org/library/node/20185>

- Jarvis, S. F., Borralho, N. M. G., & Potts, B. M. (1995). Implementation of a multivariate BLUP model for genetic evaluation of *Eucalyptus globulus* in Australia. En B. M. Potts, N. M. G. Borralho, J. B. Reid, R. N. Cromer, W. N. Tibbits, & C. A. Raymond (Eds.), *Eucalypt plantations: Improving fibre yield and quality* (pp. 212–216). CRC for Temperate Hardwood Forestry. [https://figshare.utas.edu.au/articles/chapter/Implementation_of_a_multivariate BLUP model for genetic evaluation of Eucalyptus globulus in Australia/23250398?file=40974317](https://figshare.utas.edu.au/articles/chapter/Implementation_of_a_multivariate_BLUP_model_for_genetic_evaluation_of_Eucalyptus_globulus_in_Australia/23250398?file=40974317)
- Jump, A. S., & Peñuelas, J. (2005). Running to stand still: Adaptation and the response of plants to rapid climate change. *Ecology Letters*, 8(9), 1010–1020. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00796.x>
- Kapeller, S., Schüler, S., Huber, G., Božič, G., Wohlgemuth, T., & Klumpp, R. (2013). Provenance trials in Alpine range – Review and perspectives for applications in climate change. En G. Cerbu, M. Hanewinkel, G. Gerosa, & R. Jandl (Eds.), *Management strategies to adapt alpine space forests to climate change risks* (pp. 233–256). <https://doi.org/10.5772/56283>
- Keiding, H. (1992). *Field testing practices of a tree improvement programme* (Lecture Note D-5). Danida Forest Seed Centre. <https://curis.ku.dk/ws/files/20685082/d5.pdf>
- Khan, T., Al-Khayri, J. M., & Mansoor, S. (2025). Forests and their crucial roles in hydrological systems, ecosystem services, and restoration efforts. *Sylwan*. <https://doi.org/10.26202/sylwan.2024074>
- Kreyling, J., Buhk, C., Backhaus, S., Hallinger, M., Huber, G., Huber, L., Jentsch, A., Konnert, M., Thiel, D., & Wilmking, M. (2014). Local adaptations to frost in marginal and central populations of the dominant forest tree *Fagus sylvatica* L. as affected by temperature and extreme drought in common garden experiments. *Ecology and Evolution*, 4(5), 594–605. <https://doi.org/10.1002/ece3.971>
- Larcher, W. (2003). *Physiological plant ecology: Ecophysiology and stress physiology of functional groups* (4th ed.). Springer. <https://link.springer.com/book/9783540435167>
- Littell, R. C., Milliken, G. A., Stroup, W. W., Wolfinger, R. D., & Schabenberger, O. (2006). *SAS for mixed models* (2nd ed.). SAS Institute Inc. [https://books.google.com.mx/books/about/SAS for Mixed Models Second Edition.html?id=z9qv32OyEu4C&redir_esc=y](https://books.google.com.mx/books/about/SAS_for_Mixed_Models_Second_Edition.html?id=z9qv32OyEu4C&redir_esc=y)
- Mendoza H., J. M. (1983). Diagnóstico climático para la zona de influencia inmediata de la UAAAN. Departamento de Agrometeorología. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coah., México. 615 p.

- Mendoza Hernández, J.M. (2010). Escenarios Climáticos para Coahuila. Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Estado de Coahuila. <https://sma.gob.mx/wp-content/uploads/2023/08/ANEXO-4-ESCENARIOS-CLIMATICOS-PARA-COAHUILA.pdf>
- Mesen, F. (1994). Ensayos de procedencias en especies forestales: establecimiento, manejo, evaluación y análisis. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/10718>
- Müller-Dombois, D., & Ellenberg, H. (1974). *Aims and methods of vegetation ecology*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.2307/213332>
- Munné-Bosch, S. (2015). Sex ratios in dioecious plants in the framework of global change. *Environmental and Experimental Botany*, 109, 99–102. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.08.007>
- Muñoz Fernández, T. (2006). Crecimiento de (*Pinus johannis* M.-F. Robert), en un ensayo de procedencia en Mesa de las Tablas, Sierra de Arteaga, Coah. (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/904>
- Mutke Regneri, S. (2005). Modelización de la arquitectura de copa y de la producción de piñón en plantaciones clonales de *Pinus pinea* L (Doctoral dissertation, Montes). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.502>.
- Mutke, S., Gordo, J. y Gil, L. (2005) Variability of Mediterranean Stone pine cone production: Yield loss as response to climate change, *Agricultural and Forest Meteorology*. Volume 132, Pages 263-272. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.08.002>
- Obeso, J. R. 2002. The costs of reproduction in plants. *New Phytologist* 155: 321 – 348. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00477.x>
- Owens, J. N. (1998). Pollination in conifers. *Trends in Plant Science*, 3(12), 479–484. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(98\)01337-5](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(98)01337-5)
- Parra Álvarez, J., Granados Sánchez, D., Granado Victorino, R. L., & Villanueva Morales, A. (2021). Caracterización, clasificación y ordenación de los bosques de pino piñonero del estado de San Luis Potosí. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/8c2b41c2-f443-4169-aa58-bde2138f830e>
- Patterson, H.D., and Thompson, R. (1971). Recovery of inter-block information when block sizes are unequal. *Biometrika*, 58: 545–554. <https://doi.org/10.1093/biomet/58.3.545>
- Pedrini, S., & Dixon, K. W. (2020). International principles and standards for native seeds in ecological restoration. *Restoration Ecology*, 28(S3), S286–S303. <https://doi.org/10.1111/rec.13155>

- Pérez Miranda, R., Romero Sánchez, M. E., González Hernández, A., Rosales Mata, S., Moreno Sánchez, F., & Arriola Padilla, V. J. (2019). Modelado de la distribución actual y bajo cambio climático de pinos piñoneros endémicos de México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 10(56), 218-237. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i56.613>
- Perry, J. P. Jr. 1991. The pines of México and Central America. Timber Press. Portland, Oregon, USA. P. 231
https://openlibrary.org/books/OL1858262M/The_pines_of_Mexico_and_Central_America
- Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., & Araújo, M. B. (2011). Ecological niches and geographic distributions. Princeton University Press.
https://www.researchgate.net/publication/230709994_Ecological_Niches_and_Geographic_Distributions
- Piepho HP, Möhring J, Melchinger AE, Büchse A. BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing. *Euphytica*. 2008;161(1):209-28.
<https://doi.org/10.1007/s10681-007-9449-8>
- Quiroz-Vázquez, R. I., López-Upton, J., Cetina-Alcalá, V. M., & Ángeles-Pérez, G. (2017). Capacidad reproductiva de *Pinus pinceana* Gordon en el límite sur de su distribución natural. *Agrociencia*, 51(1), 91-104.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952017000100091
- Ramírez-Herrera, C., J.J. Vargas-Hernández y J. López-Upton. (2005). Distribución y conservación de las poblaciones naturales de *Pinus greggii*. *Acta Botánica Mexicana* 72: 1-16. <https://doi.org/10.21829/abm72.2005.997>
- Robert, M. F. (1978). Un nouveau pin pignon Mexicain: *Pinus johannis* M.-F. Robert. *Adansonia*. Serie 2. 18(3): 365-373. <https://doi.org/10.5962/p.297157>
- Robledo-Arnuncio, J. J., & Gil, L. (2005). Patterns of pollen dispersal in a small population of *Pinus sylvestris* L. revealed by total-exclusion paternity analysis. *Heredity*, 94, 13–22.
<https://doi.org/10.1038/sj.hdy.6800542>
- Rodríguez-Laguna, R., Meza-Rangel, J., Vargas-Hernández, J., & Jiménez-Pérez, J. (2009). Variación en la cobertura de suelo en un ensayo de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. en el cerro El Potosí, Galeana, Nuevo León. *Madera y bosques*, 15(1), 47-59.
<https://doi.org/10.21829/myb.2009.1511196>
- Romero Manzanares, A., & García Moya, E. (2002). Estabilidad y elasticidad de la composición florística de los piñonares de San Luis Potosí, México. *Agrociencia*, 36(2), 243-254.
<https://www.redalyc.org/pdf/302/30236211.pdf>

- Romero, A., M. Luna, E. García, and M. F. Passini. 2000. Phenetic analysis of the Mexican midland pinyon pines, *Pinus cembroides* and *Pinus johannis*. Bot. J. Linn. Soc. 133: 181-194. <https://doi.org/10.1006/bojl.1999.0315>
- Rosche, C., Schrieber, K., Lachmuth, S., Durka, W., Hirsch, H., Wagner, V., Schleuning, M., & Hensen, I. (2018). Sex ratio rather than population size affects genetic diversity in *Antennaria dioica*. Plant Biology, 20(4), 789–796. <https://doi.org/10.1111/plb.12716>
- Salazar-García, J. G., Vargas-Hernández, J. J., Jasso-Mata, J., Molina-Galán, J. D., Ramírez-Herrera, C., & López-Upton, J. (1999). Variación en el patrón de crecimiento en altura de cuatro especies de *Pinus* en edades tempranas. Madera y Bosques, 5(2), 19–34. <https://doi.org/10.21829/myb.1999.521345>
- Sánchez Roblero, H. (2013). sobrevivencia y crecimiento de (*Pinus johannis* M.-F. Robert) en un ensayo de procedencias a diez años de su establecimiento en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coah. (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/1074>
- SAS Institute Inc. (2015). SAS/STAT® 14.1 User's Guide: The MIXED Procedure. SAS Institute Inc. <https://support.sas.com/documentation/onlinedoc/stat/141/mixed.pdf>
- SEMARNAT. (2025). Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-059-SEMARNAT-2025, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5754858&fecha=14/04/2025
- Servicio Meteorológico Nacional. (2026a). *Datos climatológicos de la estación meteorológica Jamé, Arteaga, Coahuila*. Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx/>
- Servicio Meteorológico Nacional. (2026b). *Datos climatológicos de la estación meteorológica San Antonio de las Alazanas, Arteaga, Coahuila*. Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx/>
- Shaffer, M. (1987), “Minimum Viable Populations pp. Coping with Uncertainty”, en M. E. Soulé, (ed.), Viable Populations for Conservation, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 69-86. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511623400.006>
- Solano Montoya, J. A., Flores López, C. D. A., Braham Sabag, S. I., & Ruiz Torres, N. A. D. (2016). Crecimiento y producción de semillas de *Pinus johannis* M.-F. Robert en un ensayo de tres procedencias a 13 años de su establecimiento en Mesa de las Tablas, Arteaga, Coahuila (Informe técnico/Tesis). Institución responsable. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/8160>
- Thomas P. (2013) *Araucaria angustifolia*. The IUCN Red List of Threatened Species 2013: e.T32975A2829141. Consulta-do 6 feb. 2020. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T32975A2829141.en>

- Thomas, P. A., & Polwart, A. (2003). Biological flora of the British Isles: *Taxus baccata* L. *Journal of Ecology*, 91(3), 489–524. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2003.00783.x>
- Thompson, I., Mackey, B., McNulty, S., & Mosseler, A. (2009). Forest resilience, biodiversity, and climate change. In Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal. Technical Series no. 43. 1-67. (Vol. 43, pp. 1-67). <https://research.fs.usda.gov/treesearch/36775>
- Thomson, V. P., A. B. Nicotra, & S. A. Cunningham. 2004. Herbivory differentially affects male and female reproductive traits of *Cucumis sativus*. *Plant Biology* 6: 621 – 628. <https://doi.org/10.1055/s-2004-821236>
- Tikhonova, I. V. 2003. Sex structure of Scotch pine populations in the dry steppe. *Russian Journal of Ecology* 34: 370 – 374. <https://doi.org/10.1023/A:1027304332042>
- Valencia-Manzo, S. V., García, M. V. V., Cárdenas, M. G., Muñoz, M. R., & Arteaga, M. Á. C. (2006). Ensayo de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. en dos localidades de la Mixteca Alta de Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(1), 27-27. <https://doi.org/10.35196/rfm.2006.1.27>
- Vallejo Reyna, M. Á., & Cob Uicab, J. V. (2021). Tópicos y perspectivas de la investigación científica sobre el mejoramiento genético de especies perennes en INIFAP. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 12(spe), 154-176. Epub 21 de febrero de 2022 <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12iespecial-1.1089>
- Vitasse, Y., Delzon, S., Bresson, C. C., Michalet, R., & Kremer, A. (2009). Altitudinal differentiation in growth and phenology among populations of temperate-zone tree species growing in a common garden. *Canadian Journal of Forest Research*, 39(7), 1259–1269. <https://doi.org/10.1139/X09-054>
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas-Hernández, J. J., & López-Upton, J. (2006). Variación entre procedencias de *Pinus pseudostrobus* establecidas en dos sitios en Michoacán, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(2), 121-121. <https://doi.org/10.35196/rfm.2006.2.121>
- White, Timothy L., Adams, W. Thomas, & Neale, David B. (2007). Forest genetics. CABI. <https://doi.org/10.1079/9781845932855.0000>
- Whitham T.G. & S. Mopper, (1985). Chronic herbivory: impacts on architecture and sex expression of pinyon pine. *Science*, 228, 1089-1091. <https://doi.org/10.1126/science.228.4703.1089>
- Yeaton, R. I. 1982. The altitudinal distribution of the genus *Pinus* in the western United States and Mexico. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 42:55-71. <https://doi.org/10.17129/botsoci.1261>

- Zapata-Valenzuela, J., & Hasbún, R. (2011). Accelerated forest genetic breeding using genomic selection. *Bosque*, 32(3), 209–213. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002011000300001>
- Zobel, B., Talbert, J. (1988). Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. México DF: Limusa. <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/517>
- Zuleta, A., Weisstaub, A., Giacomino, S., Dyner, L., Loewe, V., Del Río, R. y Lutz, M. (2017). Un cultivo antiguo revisitado: Composición química de los piños mediterráneos cultivados en seis países. *Revista Italiana de Ciencias de la Alimentación*, 30 (1). <https://doi.org/10.14674/IJFS-996>