

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL



Prueba De Progenies y Heredabilidad Para *Pinus greggii* Engelm. En Arteaga, Coahuila

Por:

JOSÉ FRANCISCO ARGUETA GARNICA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Noviembre, 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL

Prueba De Progenies y Heredabilidad Para *Pinus greggii* Engelm. En Arteaga, Coahuila

Por:

JOSÉ FRANCISCO ARGUETA GARNICA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada por el Comité de Asesoría:


Dr. Eladio H. Comejo Oviedo
Asesor Principal


M.C. Salvador Valencia Manzo
Coasesor


Dr. Celestino Flores López
Coasesor


Dr. José Antonio González Fuentes
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Noviembre, 2021

Declaración de no plagio

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

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

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante



José Francisco Argueta Garnica

DEDICATORIA

A mis padres Valentín Argueta Bello y Lorenza Garnica Elizondo por el apoyo incondicional que me han brindado durante mis estudios; además del cariño, comprensión, consejos y en especial por la educación y enseñanzas que me han dado, pero sobre todo por apoyar y cuidar de mi hijo y a mi esposa mientras he estado ausente.

A mis hermanos Maricela, Martín, María Guadalupe, Javier, Susana, María de la Luz y María de la Cruz por el apoyo moral que siempre me han dado a mí y a mi familia. A mis hermanos Daniel, Flor y Carla Fernanda por el apoyo económico y moral que me han brindado; pero muy en especial a mis hermanos María del Sagrario y Marco Antonio por la amistad y por siempre cuidar de mí en momentos de dificultades y por todos los ánimos que me han dado para poder lograr este objetivo.

A mi abuelita Elvira Elizondo por el cariño y apoyo que me ha dado desde niño.

A mis cuñados Valentín Guzmán y Salomón Campos por los apoyos económicos y morales, además de su amistad incondicional.

A mi esposa Yakenis Guzmán Rivera por el amor, cariño, apoyo, amistad y consejos que me ha dado, además por ayudarme a cumplir un sueño, pero en especial por cuidar de mí todo el tiempo. Pero además por el cuidado, amor y la educación que le ha dado a nuestro hijo.

Este trabajo está dedicado principalmente a mi hijo **José Yareth** a manera de disculpa por todo este tiempo que he estado ausente en su infancia y por no haber podido estar presente el día de su nacimiento. Por todo el amor y cariño que le tengo, además del orgullo que representa para mí, ya que, él y mi esposa fueron el pilar más fuerte para cumplir este sueño.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la Virgen María por guiarme y por sacarme de los baches que he tenido en mi vida.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por darme la oportunidad y abrirme sus puertas para lograr un sueño, al permitir formarme como profesional.

Al Dr. Eladio H. Cornejo Oviedo por la dirección y empeño puesto en este trabajo, pero en especial por los consejos, apoyo, amistad y la confianza puesta en mí.

Al M.C. Salvador Valencia Manzo por su apoyo y contribuciones brindadas al presente trabajo, además de su amistad y consejos.

Al Dr. Celestino Flores López por su apoyo y contribuciones brindadas al presente trabajo.

A todos mis compañeros de carrera, en especial a mis amigos Uriel González, Álvaro Ambrosio, Gregorio Tirso, Hugo Vázquez, Fernando Vázquez, Adriana Gutiérrez, Marco Antonio Santiago y Royer Gómez por la amistad y apoyo que me brindaron, en especial a la memoria de mi amigo y hermano Eduardo Salinas Ventura por la amistad y apoyo incondicional.

A los profesores del Departamento Forestal y de otros departamentos, así como, a los profesores del Tecnológico de Costa Rica por su conocimiento compartido para mi formación profesional. En especial al Dr. Eladio Cornejo Oviedo, M.C. Salvador Valencia Manzo, Dr. Celestino Flores López, M.C. Andrés Nájera Castro, Dr. Genaro García Mosqueda, Dr. Alejandro Zárate Lupercio, MC. Aniseto Díaz Balderas, Dr. Francisco Cruz García, Dr. Eduardo A. Lara Reimers, Dr. Olman Murillo Gamboa e Ing. Alejandro Meza Montoya.

Al Ing. Federico Alejandro Castro Rosas, Ing. Brissia Pérez Mares y al Ing. Alejandro Guzmán Castro por su apoyo y amistad durante mis prácticas profesionales.

A todas aquellas personas que de una u otra forma me brindaron su amistad incondicional y que ayudaron a terminar el presente trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CONTENIDO	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE CUADROS	iv
RESUMEN	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos	3
1.2. Hipótesis.....	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Variación natural.....	4
2.2. Selección natural	6
2.3. Mejoramiento genético forestal.....	7
2.4. Heredabilidad	8
2.5. Ensayos de progenie.....	10
2.6. Pinus greggii Engelm.	12
1.1.1 Hábitat y distribución.....	12
1.1.2 Importancia	13
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
3.1. Descripción del área experimental	15
3.1.1. Ubicación y localización.....	15
3.1.2. Fisiografía e hidrología.....	16

3.1.3.	Geología y edafología	16
3.1.4.	Clima y vegetación	16
3.2.	Diseño experimental.....	16
3.3.	VARIABLES EVALUADAS.....	17
3.4.	Análisis estadístico.....	17
3.5.	Cálculo de la heredabilidad.....	18
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
4.1.	Sobrevivencia.....	20
4.2.	Altura total	27
4.3.	Diámetro a la base.....	33
4.4.	Diámetro normal	38
4.5.	Heredabilidad	42
5.	CONCLUSIONES.....	46
6.	RECOMENDACIONES	47
7.	LITERATURA CITADA.....	48
8.	ANEXOS	62
	Anexo 1: Programas en SAS para el análisis de varianza y cálculo de heredabilidad.....	62
	Anexo 2: Resultados de análisis de varianza para las variables.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ubicación del Campo Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) de la UAAAN donde se encuentra el ensayo de progenies de <i>Pinus greggii</i> Engelm. en Los Lirios, Arteaga Coahuila y ubicación de las procedencias utilizadas en el ensayo.	15
Figura 2. Supervivencia del ensayo de progenies de <i>Pinus greggii</i> Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coah., a los 16 años de establecido (2021).	23
Figura 3. Altura total promedio por familia en 2015, a los 10 años de establecido el ensayo de progenies de <i>Pinus greggii</i> Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.	28
Figura 4. Altura total promedio por familia en 2021, a los 16 años de establecido el ensayo de progenies de <i>Pinus greggii</i> Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.	29
Figura 5. Diámetro a la base promedio por familia en 2015, a los 10 años de establecido el ensayo de progenies de <i>Pinus greggii</i> Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.	34
Figura 6. Diámetro a la base promedio por familia en 2021, a los 16 años de establecido el ensayo de progenies de <i>Pinus greggii</i> Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.	35
Figura 7. Diámetro normal promedio por familia en 2015, a los 10 años de establecido el ensayo de progenies de <i>Pinus greggii</i> Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.	39
Figura 8. Diámetro normal promedio por familia en 2021, a los 16 años de establecido el ensayo de progenies de <i>Pinus greggii</i> Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.	40

ÍNDICE DE CUADROS

Página

Cuadro 1. Supervivencia (%) reportada por otros autores y su comparación con la del ensayo de progenies de <i>Pinus greggii</i> Engelm. establecido en Los Lirios, Arteaga, Coah., a los 10 y 16 años de su evaluación (2015 y 2021, respectivamente).....	21
Cuadro 2. Altura total (m) reportada por otros autores y su comparación con la del ensayo de progenies de <i>Pinus greggii</i> Engelm. establecido en Los Lirios, Arteaga, Coah., a los 10 y 16 años de su evaluación (2015 y 2021, respectivamente).....	31
Cuadro 3. Diámetro a la base (cm) por otros autores y su comparación con la del ensayo de progenies de <i>Pinus greggii</i> Engelm. establecido en Los Lirios, Arteaga, Coah., a los 10 y 16 años de su evaluación (2015 y 2021, respectivamente).....	37
Cuadro 4. Diámetro normal (cm) por otros autores y su comparación con la del ensayo de progenies de <i>Pinus greggii</i> Engelm. establecido en Los Lirios, Arteaga, Coah., a los 10 y 16 años de su evaluación (2015 y 2021, respectivamente).....	41
Cuadro 5. Componentes de varianza en porcentaje para las características de crecimiento en un ensayo de progenies de <i>Pinus greggii</i> Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coah., a los 10 y 16 años de establecido (2015 y 2021).....	43
Cuadro 6. Análisis de varianza para las características de crecimiento en un ensayo de progenies de <i>Pinus greggii</i> Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coah., a los 10 y 16 años de establecido (2015 y 2021).....	67

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la sobrevivencia, la altura total, el diámetro a la base y el diámetro normal en un ensayo de 35 progenies de *Pinus greggii* a 10 y 16 años de establecido en el Campo Experimental Sierra de Arteaga (CAESA), Los Lirios, Arteaga, Coah., con un diseño experimental de bloques completos al azar. Además, se estimó la heredabilidad individual y medias de familias.

Para la sobrevivencia en 2015 el análisis de varianza no encontró diferencias entre familias, mientras que, para la sobrevivencia en 2021 se encontraron diferencias altamente significativas entre las familias ($p = 0.0059$). En 2015 la sobrevivencia fue de $84 \pm 1.39 \%$ y en 2021, disminuyó a $72 \pm 1.78 \%$.

Para la altura total en 2015 y 2021 se presentaron diferencias estadísticas altamente significativas entre familias ($p = 0.0016$; $p = 0.0009$, respectivamente). En 2015 la altura total promedio fue de 2.7 ± 0.04 metros y en 2021 aumentó a 5.9 ± 0.05 m. En el diámetro a la base en 2015 y 2021 hubo diferencias estadísticas altamente significativas entre familias ($p = 0.0001$). En 2015 el valor promedio fue de 5.3 ± 0.08 cm y en 2021, aumentó a 14.2 ± 0.16 cm. El diámetro normal en 2015 y 2021 indicó que hubo diferencias estadísticas altamente significativas entre familias ($p = 0.0007$; $p = 0.0001$, respectivamente). En el 2015 el valor promedio fue de 3.4 ± 0.07 cm y en 2021, aumentó a 9.3 ± 0.12 cm. De manera general, las familias T275, J25 y S7 presentaron los valores más altos en todas las variables evaluadas y la familia J7 fue la que registró los menores valores.

En 2015 la heredabilidad individual (h^2_i) para la variable altura total, diámetro a la base y diámetro normal fueron de 0.37, 0.55, 0.35 respectivamente; mientras que en 2021 cambio a 0.26, 0.61 y 0.49, respectivamente. La heredabilidad a nivel de familias (h^2_f) en el 2015, para las variables altura total, diámetro a la base y diámetro normal fue de 0.60, 0.71 y 0.59, respectivamente; mientras que en 2021 fue de 0.51, 0.74 y 0.68, en ese mismo orden.

Palabras clave: progenie, familias, *Pinus greggii*, sobrevivencia, heredabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

En los bosques de coníferas de México las especies del género *Pinus* son las que mayor presencia tienen (Rzedowski, 2006), lo cual se debe en gran medida a la enorme diversidad de pinos, ya que México es considerado un centro de diversidad genética de este género (Sánchez, 2008). A pesar de esta gran diversidad de especies, en México no existe alguna política nacional para realizar estudios sobre la variación genética de estas especies y tampoco se han establecido mecanismos para dar seguimiento a la pérdida genética y vulnerabilidad de las especies (López *et al.*, 2011).

Desafortunadamente, la pérdida de la variación genética junto con las actividades humanas e incendios forestales, ha ocasionado una continua disminución de la cobertura de los bosques de pino y pino-encino en México (Sánchez, 2008).

Por lo anterior, es importante considerar que el manejo forestal se enmarca en los principios básicos de conservación de la biodiversidad, de la sustentabilidad y protección del ambiente (Varela, 2010). Por lo que, es necesario considerar distintos aspectos relacionados con la estimación, mantenimiento o aumento de la variabilidad genética de las especies forestales, pues determinan en gran medida la evolución futura de las poblaciones, su adaptación al medio y su conservación (Alfá *et al.*, 2003).

En este sentido, es de interés la conservación de la diversidad genética existente entre poblaciones para la conservación de los recursos genéticos forestales, especialmente porque puede referirse al mantenimiento a largo plazo de la diversidad genética en poblaciones viables (Amaral y Yanchuk, 2007).

Por lo tanto el mejoramiento genético sólo es posible cuando existe variación fenotípica, por lo que un programa de mejoramiento genético comienza con la selección de individuos que presentan características fenotípicas de interés (Balcorta y Vargas, 2004). En este sentido, la variación genética constituye la materia prima del mejoramiento genético (Herrera, 2013).

Por tal motivo el mejoramiento genético forestal es una aplicación práctica que aprovecha e identifica las causas de la variación genética presente en las poblaciones e identificar la magnitud de esa variación cuando dicha variación es de índole genética y no ambiental, con la finalidad de poder seleccionar las poblaciones o individuos dentro de la especie con caracteres económicos y ecológicos de interés (Flores *et al.*, 2014, Yanchuk, 2007).

Alía *et al.* (2003) mencionan que la variación genética en los rasgos en las especies forestales, está ligada a la amplitud de su distribución geográfica y a diferencias en las características ambientales. Por lo tanto, la finalidad del mejoramiento genético es maximizar esas características, como son la adaptabilidad, el crecimiento, la resistencia a enfermedades y sequías de una especie al sitio potencial de plantación; por lo que, el mejoramiento genético se resume en la creación de genotipos superiores y la identificación de esos mejores genotipos, a partir de experimentos de campo (Vilela *et al.*, 2018).

Pinus greggii Engelm. es una especie endémica de México de importancia ecológica y económica, la cual se distribuye en poblaciones aisladas a lo largo de la Sierra Madre Oriental, donde ocurren dos variedades: *P. greggii* var. *greggii* que se ubica al norte del área de distribución y *P. greggii* var. *australis* que se localiza al sur del área de distribución de la especie (Donahue y López, 1999). Esta especie es aprovechada para la obtención de madera para la industria del aserrío, en la obtención de postes para cerca y uso como combustible (Ramírez *et al.*, 2005). Además, la especie ha mostrado altas tasas de crecimiento en diámetro y altura en ensayos de plantaciones (Azamar *et al.*, 2000; Alba *et al.*, 2009; Muñoz *et al.*, 2012; Velasco *et al.*, 2012), aunado a lo anterior, la especie tiene alto potencial para adaptarse a condiciones de poca humedad (López y Muñoz, 1991), lo que permite utilizarla en programas de reforestación para la restauración de suelos degradados y en programas de plantaciones forestales comerciales (Azamar *et al.*, 2000; Flores *et al.*, 2007).

Sin embargo, de acuerdo con López y Donahue (1995) mencionan que las poblaciones naturales de *Pinus greggii* se encuentran amenazadas por diferentes factores naturales y antropogénicas, en especial las poblaciones del norte, dado que sus poblaciones son reducidas y aisladas entre sí (Curiel, 2005). Aunado a lo anterior, en México, incluyendo la región norte del país, hay una demanda insatisfecha de germoplasma en cantidad y calidad para los programas de reforestación y restauración (Vargas, 2003), por lo que una alternativa es el

establecimiento de los ensayos de progenie para contar con semilla seleccionada genéticamente y mejorar la supervivencia de las plántulas (López, 2010). Por tal motivo, el presente trabajo se hizo con el objetivo de aportar al conocimiento de la especie, a fin de generar información sobre su el crecimiento y desarrollo, además de identificar los genotipos que responden mejor a condiciones específicas de las áreas aledañas al CAESA que permita en un futuro cercano tener una fuente de semilla de calidad para los programas de reforestación.

1.1. Objetivos

El objetivo general del trabajo fue evaluar diferentes variables de crecimiento, en un ensayo de progenies de *Pinus greggii* a 10 y 16 años de establecido en el Campo Experimental Sierra de Arteaga (CAESA), Los Lirios, Arteaga, Coah.

Los objetivos específicos del trabajo fueron:

Determinar si existen diferencias entre familias para la sobrevivencia, la altura total, el diámetro a la base y el diámetro normal, en un ensayo de progenies de *Pinus greggii*, establecido en el CAESA, a los 10 y 16 años de su plantación.

Estimar la heredabilidad en sentido stricto a nivel individual y a nivel medias de familias para las variables altura total, diámetro a la base y diámetro normal, en un ensayo de progenies de *Pinus greggii*, establecido en el CAESA, a los 10 y 16 años de su plantación.

1.2. Hipótesis

Las hipótesis nulas propuestas son las siguientes:

Ho: Los valores promedio de la sobrevivencia, la altura total, el diámetro a la base y el diámetro normal son iguales entre las familias de un ensayo de progenies de *Pinus greggii*, establecido en el CAESA, a los 10 y 16 años de su plantación.

Ho: No existe heredabilidad en sentido estricto a nivel individual y a nivel de medias de familia para la altura total, el diámetro a la base y el diámetro normal en un ensayo de progenies de *Pinus greggii*, establecido en el CAESA, a los 10 y 16 años de su plantación.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

La biodiversidad hace referencia a la variedad y variabilidad entre los organismos vivos y los complejos ecológicos en los que se encuentran (OTA, 1987); comprende la diversidad de los ecosistemas, entre las especies y dentro de cada especie (Rusch *et al.*, 2021), además de la diversidad genética (Noss, 1990). En este contexto, la diversidad genética es la base fundamental de todos los niveles de diversidad, por ser, en gran medida, determinante en la adaptación y la evolución, además de ser básica para todos los procesos ecológicos (OTA, 1987) y puede ser considerada como parte de la salud del ecosistema (Kanashiro *et al.*, 2002).

De acuerdo con Piñero *et al.* (2008) la diversidad genética en general es el factor más esencial de la biodiversidad definiéndose como las variaciones heredables que acontecen dentro de cada organismo, entre los individuos de una población y entre las poblaciones dentro de una especie.

Por otro lado Frankham (1996) menciona que la conservación de la diversidad genética es fundamental para la conservación de la biodiversidad, dado que es la materia prima para el cambio evolutivo dentro de las poblaciones y permite que las poblaciones evolucionen por efecto de los cambios ambientales, enfermedades y plagas, competidores, la disminución del efecto invernadero o la contaminación. Por lo que, el estudio y comprensión de la diversidad genética es relevante tanto para la conservación y el avance de la genética evolutiva, como para la sustentabilidad y la productividad agrícola, pecuaria y forestal.

2.1. Variación natural

Noguera y Hernández (2009) definen la variación como un fenómeno relacionado a los seres vivos que ha permitido evolucionar a los primeros organismos vivos; la consecuencia histórica de esa particularidad en interacción con la selección natural, es la enorme biodiversidad que hoy conocemos. Po lo que, sin variación no hay diversidad y evolución (Noguera y Hernández, 2009).

La comprensión de la variación al nivel de la genética individual y de la genética a nivel poblacional es fundamental para el entendimiento de la evolución (Fuentes, 2016). Por lo que es importante señalar que la variación ocurre entre especies, poblaciones e individuos (Piñero *et al.*, 2008). La variación entre los individuos dentro de las poblaciones permite que las especies difieran en la distribución de sus respuestas al ambiente, a pesar de que las poblaciones a las que pertenecen no difieren, en promedio (Clark, 2010).

De acuerdo con Mesén (1994a) existen tres clases principales de variación en las poblaciones de una especie: una de ellas la variación en desarrollo, que resulta por las diferencias de edad entre los individuos; otra es la variación ambiental la cual se presenta por diferencias de los factores bióticos y abióticos, y no afectan por igual a todos los organismos; y la tercera es la variación genética, la cual ocurre por la diferencia en el código genético que cada individuo ha heredado de sus dos progenitores, diferenciándolo de otros individuos de la misma especie y de otras especies.

Es importante señalar, que la variación es el principal ingrediente indispensable para la selección natural, pero no establece la tasa, ritmo o patrón de cambio; es decir sin variación no puede haber selección y por ende tampoco evolución, ya que la variación en las poblaciones se genera continuamente, de tal manera que la selección puede disponer de materia prima sobre la cual actuar (Sánchez, 2005). La principal fuente de variación genética es la mutación, considerándose a ésta, cualquier cambio permanente en la información genética de un individuo (Barbadilla, 1999).

De acuerdo con Frankham (1996) el grado de variación genética dentro de una especie representa un equilibrio entre mutación, deriva y selección natural; dado que, la variación genética se genera por mutación y se pierde de las poblaciones por deriva genética debido al tamaño finito de la población. La selección natural puede deteriorar la variación genética al fomentar a la fijación de alelos o favorecer su retención como resultado de la selección equilibrada o diversificada (Frankham, 1996). En términos prácticos, la variación genética surge por mutaciones que alteran el material genético ya existente y la selección natural determina el destino de tales variantes (Lessa, 2004), es decir, moldea la variación en relación con las condiciones del ambiente (Fuentes, 2016); por lo que, si no existe variación genética en la población, no se puede hacer mejoramiento genético (Alía *et al.*, 2003).

2.2. Selección natural

La selección natural es un mecanismo el cual es dependiente de un conjunto de eventos independientes en la naturaleza, el cual es un promotor de adaptaciones (Marone *et al.*, 2002). La selección natural es el fenómeno que tiende a disminuir la variabilidad dentro de poblaciones y a aumentar la variabilidad entre poblaciones (Mesén, 1994a), de manera tal que favorece a los individuos más aptos y con más capacidades para sobrevivir y reproducirse en un entorno particular donde crece la población (Eriksson *et al.*, 2020). Tal fenómeno se le conoce como aptitud, la cual es una combinación de fertilidad del individuo y adaptabilidad de la descendencia, lo que hace alusión básicamente a la habilidad del individuo de transmitir sus genes a la siguiente generación (Mesén, 1994a). La selección natural favorecerá un rasgo si existe una variación genética para ese rasgo y si la característica mejora el éxito reproductivo de por vida (Mery, 2013).

En ese sentido, la selección natural es el mantenimiento de unas variables genéticas con respecto a otras (Barbadilla, 1999) y junto con la deriva genética promueven la diferenciación entre poblaciones (Eriksson *et al.*, 2020). Lewontin (1970) menciona de manera más estricta que la selección natural es el proceso que surge en una población cuando se cumplen los tres principios siguientes que enmarcan la base de la evolución por selección natural: 1.- variación fenotípica: que hay entre los distintos individuos de una población que tienen diferencias morfológicas, fisiológicas y comportamientos; 2.- aptitud diferencial: cuando los diferentes fenotipos tienen distintas tasas de sobrevivencia y reproducción en ambientes diferentes. 3.- aptitud hereditaria: cuando hay una correlación entre padres e hijos en la contribución de cada uno a las generaciones futuras.

Por lo tanto la selección natural mantiene en funcionamiento los mecanismos en contra de la formación constante de mutaciones que pueden ser malas, es decir, la selección natural es usualmente un purificador o estabilizador (Sánchez, 2005), por lo que en general, la selección natural favorece la formación de poblaciones altamente adaptadas a su ambiente, de tal manera que estimula la diferenciación entre poblaciones distintas (Mesén, 1994a).

2.3. Mejoramiento genético forestal

El mejoramiento genético forestal es una herramienta práctica sobre la constitución genética de los árboles forestales, la cual forma parte de la silvicultura: este mejoramiento, se logra mediante el control parental combinado con otras actividades de manejo del bosque, con la finalidad de lograr la mejorar del rendimiento y la calidad de los productos forestales lo más económicamente posible (Zobel y Talbert, 1988).

De acuerdo con Murillo (1994) el mejoramiento genético forestal se basa en la aplicación de una serie de actividades con el fin de mantener la demanda de germoplasma forestal en cantidad y calidad, con la mayor ganancia genética posible, al menor costo y en forma permanente. El mejoramiento genético forestal depende y consta de la determinación de la especie, la calidad, el tipo y las causas de variación dentro de la especie, así como, las cualidades deseadas y la finalidad de la producción de los individuos mejorados; por lo anterior, el mejoramiento genético debe formar parte del manejo forestal, ya que por lo general éste se utiliza para alcanzar los objetivos del manejo del bosque (Zobel y Talbert, 1988).

Lo anterior se logra mediante un programa de mejoramiento genético, el cual está compuesto por tres elementos: 1.- Población base: es aquella que permitirá futuras colecciones y reintroducciones del material al programa, dado que se conservan los recursos genéticos de la especie y sus poblaciones, en especial cuando se pretende desarrollar programas a largo plazo; 2.- Población en desarrollo: donde se lleva a cabo el trabajo de mejoramiento e investigación, mediante la evaluación, mejoramiento y recombinación de la base genética; 3.- Población de producción: la cual consiste en la producción de germoplasma en cantidad y calidad suficiente para los programas de plantación (Zobel y Talbert, 1988; Mesén, 1994b).

Asimismo, en un programa de mejoramiento genético se pueden proponer varias estrategias, las cuales pueden ser a corto, mediano y largo plazo, ya que depende de las necesidades del sector forestal. De acuerdo con Murillo (1994) las estrategias a corto plazo son aquellas enfocadas en la producción de semilla o propágulos mejorados, en un tiempo de 1 o 3 años y se basan en la selección fenotípica como son los rodales o áreas semilleras; las estrategias a mediano plazo están enfocadas a producir semilla o propágulos mejorados, en

un tiempo aproximado de 8 a 12 años, para evaluar genéticamente el material seleccionado a través huertos semilleros, plantación de base genética amplia y plantaciones clonales, e incluso ensayos de progenie, ensayos de procedencia y ensayos de procedencia-progenie donde se podría producir semilla mejorada.

Se considera un éxito del mejoramiento genético forestal cuando se obtiene un incremento inmediato de forma rápida y eficiente de los productos deseados y la obtención de una amplia base genética para continuar con el programa por muchas generaciones (Zobel y Talbert, 1988). Además, busca que esos cambios deseados, perduren indeterminadamente a lo largo de las generaciones, lo cual se logra cuando el rasgo de interés es heredable (Mesén, 1994a).

2.4. Heredabilidad

La variación en la naturaleza no necesariamente se debe a la herencia, ya que parte de esa variación puede deberse a efectos ambientales, dado que las plantas tienen la capacidad de modificar su crecimiento y morfología de modo que dos plantas pueden volverse idénticas en apariencia a pesar de tener genes diferentes (Eriksson *et al.*, 2020). Por esta razón es de gran importancia comprender las causas y la naturaleza de la variación genética, ya que es fundamental para llevar a cabo un programa de mejoramiento genético forestal, por lo que es necesario conocer el mecanismo de la transmisión de los rasgos de los progenitores a su descendencia (Mesén, 1994a).

De acuerdo a lo anterior, los genes son la unidad básica de la herencia (Mesén, 1994a) la cual permite que los rasgos genéticos de un individuo puedan ser transferidos a su descendencia, cuando estos rasgos genéticos están ligados al fenotipo del individuo (Delgado, 2019). Mesén (1994b) describe a la heredabilidad como un valor que expresa el grado en que los progenitores transmiten sus rasgos a su descendencia, la cual es elemental para calcular la ganancia genética. Además, la heredabilidad no es un valor fijo y se refiere siempre a una característica específica, de una población específica, que crece en un lugar específico y a una edad específica (Mesén, 1994b; Eriksson *et al.*, 2020), asimismo, no es específica, por ejemplo, de la especie (Van Buijtenen, 1992), por lo que no se debe interpretar como un valor absoluto e invariable (Zobel y Talbert, 1988).

Además, la heredabilidad es la relación que existe entre la variación genética y la variación fenotípica. Dado que la heredabilidad depende de las variaciones genéticas y fenotípicas de un individuo o familia las cuales están determinadas por la variación genética en la población (Lewontin, 1974). De acuerdo con Cornelius (1994) la unidad de selección no necesariamente tiene que ser el árbol individual, ya que muy frecuentemente se selecciona familias enteras, donde el criterio de selección es el promedio de la familia. La heredabilidad de árboles individuales (h^2_i) es la heredabilidad basada en las mediciones de árboles individuales, mientras que la heredabilidad familiar (h^2_f) es la heredabilidad basada en el valor promedio de las familias (Van Buijtenen, 1992).

Por otra parte, en el mejoramiento genético forestal hay dos tipos de heredabilidad a nivel árbol individual que son de gran importancia (Zobel y Talbert, 1988). La heredabilidad en sentido amplio es la proporción de la variación genética total de una población con respecto a la variación fenotípica total y la heredabilidad en sentido estricto se define como la proporción de la varianza genética aditiva con respecto a la varianza total (Zobel y Talbert, 1988).

De acuerdo a Cubero (1999) el parecido entre padres e hijos en un rasgo cuantitativo depende, en gran medida, de la importancia relativa del genotipo y del ambiente sobre ese carácter: mientras más fuerte sea el componente genético sobre la manifestación de ese rasgo cuantitativo, mayor será el parecido entre la descendencia y los padres. La interacción genotipo-ambiente es cuando el genotipo se expresa de manera diferente en distintos ambientes (Scarr y McCartney, 2014). Por lo que, el interés del mejoramiento genético es que ese rasgo cuantitativo esté fuertemente controlado por el genotipo y poco influenciado por el ambiente y que además sea heredable (Cornelius, 1994).

Sin embargo, la heredabilidad no puede ser estimada directamente en rodales naturales, ya que se requiere de una prueba aleatorizada y con réplicas para separar los efectos genéticos y ambientales en los fenotipos, dado que dicha prueba contiene la descendencia de una muestra de árboles de un rodal natural, que no puede experimentar exactamente las mismas condiciones ambientales (White *et al.*, 2007).

Por otro lado, la heredabilidad también puede ser modificada, ya que depende en parte de la variabilidad del ambiente, la cual, en experimentos, está en parte bajo el control del

genetista (Cornelius, 1994). La heredabilidad se aumenta cuando se reduce la variación ambiental, o bien, cuanto mayor sea la influencia del entorno, menor será la heredabilidad (Loo-Dinkins, 1992). Cuando los experimentos de campo se establecen en sitios muy homogéneos y se les da manejo para reducir los efectos del ambiente, además se minimizan los errores de medición, la varianza ambiental es menor, lo que ocasionará que la heredabilidad sea mayor (White *et al.*, 2007). Por esta razón es importante hacer una buena selección de sitio y un diseño apropiado, así como dar el mantenimiento adecuado de la prueba o ensayo (Van Buijtenen, 1992).

También cabe mencionar que aun cuando hay un valor alto de heredabilidad para un rasgo, existe la posibilidad de mejorar este rasgo mediante el mejoramiento, ya que un árbol con un buen fenotipo dará lugar a una progenie con buenos fenotipos. Sin embargo, tal rasgo también tiene el potencial de ser cambiado por selección natural, con el paso del tiempo (Eriksson *et al.*, 2020).

Para cualquier rasgo, el valor de la heredabilidad en sentido estricto (h^2) oscila entre 0 y 1 (White *et al.*, 2007). Si la variación de la población no se debiera a la genética, el valor de heredabilidad sería igual a 0, en cambio, si toda la variación fuera atribuible a la genética, entonces el valor de la heredabilidad sería igual a 1 (Zobel y Talbert, 1988). Por ejemplo, si una característica tiene una heredabilidad de 0.40 quiere decir que el 40 % de la variación en esos rasgos fenotípicos es debido a variación genética, mientras que el 60 % restante depende de la variación en el ambiente (Petino, 2017).

La heredabilidad se puede incrementar de dos maneras, una de ellas es al aumentar la variabilidad genética, mediante la introducción de material nuevo de la población base y la otra, al disminuir la varianza no genotípica, a través de la reducción de la variación ambiental y de la varianza generada por diferencias en edad (Corea, 1994).

2.5. Ensayos de progenie

Los ensayos genéticos son una fuente importante de conocimiento e información, ya que ayudan a localizar, del modo más rápido y económico posible, las procedencias y progenies que permiten formar bosques mejor adaptados y más productivos, mediante la evaluación de la productividad, la supervivencia, la resistencia a condiciones ambientales adversas o plagas,

la calidad de la madera y la producción de semilla de tal progenie (Flores *et al.*, 2014). Lo anterior permitirá mejorar las políticas de desarrollo forestal, dado que se entrega a quienes toman las decisiones, datos reales para la implementación de futuras líneas productivas y medioambientales (Ávila *et al.*, 2016). Por lo que, la finalidad del establecimiento los ensayos de progenie, responde a que en el menor plazo posible los individuos deben ser capaces de expresar su potencialidad de crecimiento (CORFO, 2011).

El término procedencia alude al área geográfica original de la cual se obtuvo la semilla o propágulos (Flores *et al.*, 2014). La variación entre procedencias generalmente es grande, ya que está relacionada con caracteres adaptativos, producto de la selección natural, que por lo general poseen un control genético bastante importante (Vergara, 1998). Los ensayos de procedencias tienen la finalidad determinar las interacciones genotipo-ambiente para identificar las procedencias más sobresalientes (Mesén, 1994c).

Los ensayos de progenie tienen el objetivo de evaluar genéticamente árboles a través de su descendencia mediante la reproducción por semilla o propágulos, con la finalidad de determinar cuáles árboles son genéticamente superiores (Murillo, 1994) y eliminar individuos de bajo valor genético (Ipinza, 1998). Esto permite diferenciar si la superioridad fenotípica de los progenitores se debe a que tienen un buen genotipo o simplemente es resultado de haber crecido en un buen ambiente (Zobel y Talbert, 1988) Sin embargo, el propósito principal es incrementar las ganancias genéticas para la generación actual y futuras del programa de mejoramiento genético forestal (Lambeth, 1994; White *et al.*, 2007).

En México se han establecido y evaluado varios ensayos de procedencias y progenies con *Pinus greggii* var. *greggii* con la finalidad de generar información sobre el crecimiento y desarrollo de la especie.

Serrato (2000) en su estudio de unas pruebas de progenie de *Pinus greggii* en Los Tarihuanes, Cañón de Jamé, Arteaga, Coah., evaluó dos ensayos, en el primero con 18 familias y un testigo y el segundo con 14 familias distribuidas en cinco terrazas, ambos con procedencia de Los Lirios, reportando una sobrevivencia promedio de 65.6 %, con una altura promedio de 1.33 m y un diámetro a la base promedio de 3.32 cm en ambos ensayos, a los cinco años de establecidos.

Por otro lado, Vela (2002) en una prueba de progenies de *Pinus greggii* establecida en el CAESA, Coah., con 22 familias y un testigo encontró una sobrevivencia promedio de 75.36 %, con una altura total promedio de 4.17 m y un diámetro normal promedio de 8.5 cm, a los nueve años y ocho meses de establecida la plantación.

En otro estudio de procedencias y progenies de *Pinus greggii*, establecido en el Ejido 18 de Marzo, Galeana, N.L., con 63 familias de nueve procedencias, Godínez (2005) registró una sobrevivencia de 48.3 %, con una altura total promedio de 1.2 m y un diámetro basal promedio de 3.46 cm, a los cuatro años cinco meses de establecida la plantación.

Rodríguez *et al.* (2013) en un ensayo de procedencias de *Pinus greggii*, establecido en el Cerro El Potosí, Galeana, N.L., evaluaron nueve poblaciones naturales de *P. greggii* de los estados de Coahuila y Nuevo León, reportando un 71.4 % de sobrevivencia, con 6.8 m como la mayor altura total promedio y un diámetro normal promedio de 8.5 cm, a los 10.9 años de establecido el ensayo.

Ortíz (2015) evaluó dos ensayos de procedencias de *Pinus greggii* var. *greggii*, establecidos en dos localidades de La Mixteca Alta de Oaxaca; uno en Tlacotepec Plumas y el otro en Magdalena Zahuatlán, donde se incluyeron 13 procedencias de *P. greggii*, seis de la variedad *greggii* (noreste) y siete de la variedad *australis* (centro), reportando una sobrevivencia promedio de 80.2 %, con una altura total promedio de 7.8 m, un diámetro a la base promedio de 14.1 cm y un diámetro normal promedio de 10.9 cm, en ambos ensayos, a los 17 años de establecida la plantación.

2.6. *Pinus greggii* Engelm.

1.1.1 Hábitat y distribución

Pinus greggii es una especie endémica de México que se desarrolla en varios tipos de bosques de montaña entre los principales tipos están los bosques mixtos con latifoliadas, mixtos de pino-encino y en bosques puros de pino (Farjon *et al.*, 1997). Forma parte del dosel dominante en los ecosistemas forestales en que se desarrolla y proporciona un microambiente para diversas plantas herbáceas y arbustivas (Ramírez *et al.*, 2005). Las poblaciones se encuentran aisladas a lo largo de la Sierra Madre Oriental, en zonas semiáridas y a veces

semitropicales, en suelos ácidos o ligeramente alcalinos en la parte norte de su distribución (Farjon *et al.*, 1997).

Actualmente se conocen dos variedades de *Pinus greggii*, la primera es la variedad *greggii* que es la población del norte, la cual sé que se distribuye en los estados de Coahuila y Nuevo León, la segunda es la variedad *australis* que es la población del sur con distribución en los estados de Hidalgo, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí y Veracruz. Ambas variedades no se traslapan entre ellas, ya que se encuentran separadas por 300 km aproximadamente (Donahue y López, 1999).

1.1.2 Importancia

Pinus greggii es un árbol de importancia para los pobladores que habitan en zonas aledañas a su distribución, ya que representa valor económico por su madera, que es utilizada para la industria del aserrío y para la obtención de leña de uso doméstico (Ramírez *et al.*, 2005). Además, es una de las especies de mayor importancia socioeconómica en términos de producción de madera y servicios ambientales en México (Martínez *et al.*, 2020).

Los rodales naturales de *P. greggii* var. *greggii* ha sido afectados fuertemente, por la tala e incendios forestales, principalmente; por otro lado, los rodales naturales de *P. greggii* var. *australis* han sido menos perturbadas, e incluso parecen tener menos problemas de plagas y enfermedades y crecen más rápido, donde destacan las poblaciones de Querétaro (López y Donahue, 1995). Sin embargo, dichas poblaciones podrían verse afectadas por aumento de la temperatura media anual, a causa del cambio climático, de tal manera que se pueden ver afectados los nichos ecológicos actuales y futuros de *P. greggii* en México (Martínez *et al.*, 2020).

Las plantaciones de *Pinus greggii* pueden ser con fines comerciales, de protección, de restauración e incluso en áreas urbanas se utiliza como ornato en parques y campos deportivos (Martínez, 1999). Esta especie es la cuarta especie en importancia en plantaciones del Programa Nacional de Reforestación en México, ya que es una especie con características favorables para establecerla en áreas con suelos degradados, en sitios marginales en diferentes partes de México (Ramírez *et al.*, 2005).

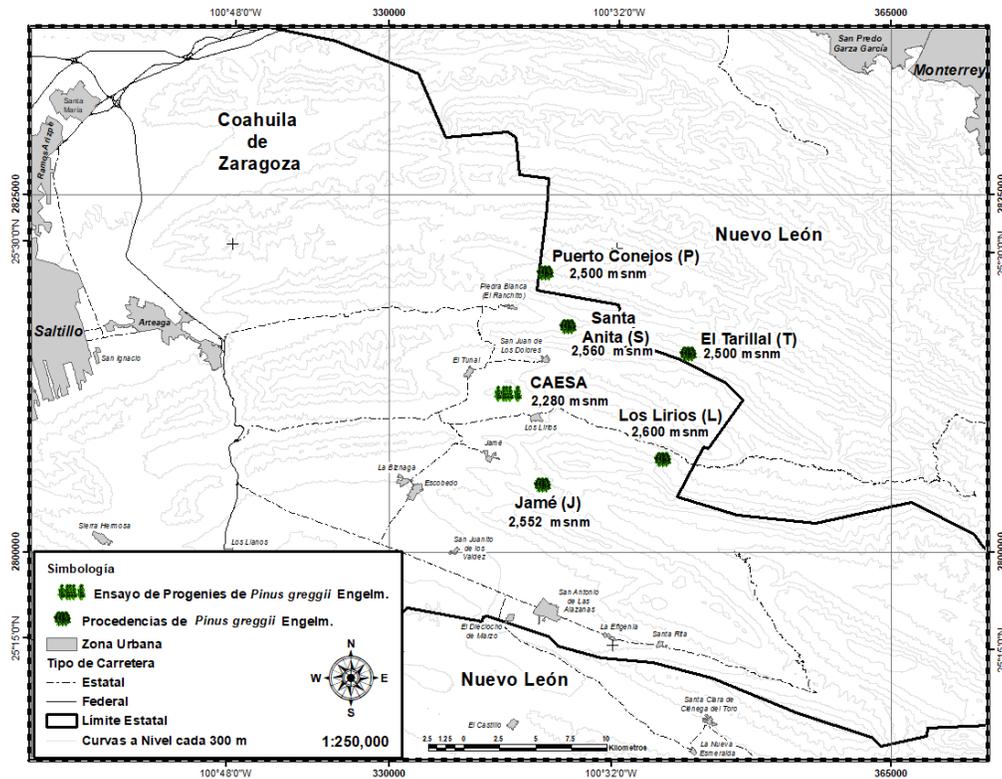
Una de las especies de pinos más utilizadas en plantaciones forestales en México ha sido *Pinus greggii*, dado que es una especie que presenta altas tasas de crecimiento, de acuerdo a los ensayos de plantaciones evaluados (Alba *et al.*, 2009; Azamar *et al.*, 2000; Muñoz *et al.*, 2012; Velasco *et al.*, 2012; Rodríguez *et al.*, 2013; Ortíz, 2015) y a que tiene un gran potencial para adaptarse sitios con limitadas condiciones de humedad (López y Muñoz, 1991). Sin embargo, también es una especie que tiene potencial en plantaciones forestales comerciales como alternativa a *Pinus taeda*, *P. elliottii* y *P. patula* (Dvorak *et al.*, 1996). Actualmente se han establecido plantaciones forestales fuera del área de su distribución natural, donde ha mostrado una buena resistencia a plagas, enfermedades y sequías, y una buena adaptación a suelos degradados (Dvorak *et al.*, 1996; Rodríguez *et al.*, 2013; Domínguez *et al.*, 2017; García, 2017). Por lo anterior, *Pinus greggii* se ha introducido en países como Argentina (Fornes, 2005), India (Pandet, 1982), Australia (Fielding, 1960), Sudáfrica (Darrow y Coetzee, 1983; Dvorak, 2012; Hodge y Dvorak, 2012), Chile (Hodge y Dvorak, 2012), Colombia y Brasil (Dvorak *et al.*, 1996).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Descripción del área experimental

3.1.1. Ubicación y localización

El ensayo de progenies de *Pinus greggii* se localiza dentro del Campo Agrícola Experimental Sierra de Arteaga (CAESA), en la localidad Los Lirios, Arteaga, Coah., en las coordenadas 25° 24' 25.63" latitud norte y 100° 36' 25.11" longitud oeste, a una altitud de 2280 msnm y se ubica aproximadamente a 45 km de la ciudad de Saltillo, Coah. (INEGI, 2000) (Figura 1).



Fuente: Curiel (2005).

Figura 1. Ubicación del Campo Experimental Sierra de Arteaga (CAESA) de la UAAAN donde se encuentra el ensayo de progenies de *Pinus greggii* Engelm. en Los Lirios, Arteaga Coahuila y ubicación de las procedencias utilizadas en el ensayo.

3.1.2. Fisiografía e hidrología

El CAESA está ubicado dentro de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental, dentro de la subprovincia fisiográfica Gran Sierra Plegada, dentro de un sistema de topofomas de tipo sierra plegada-flexionada (INEGI, 2001).

Se encuentra dentro de la región hidrológica Bravo Conchos (RH24), cuenca Rio Bravo-San Juan (RH24B) y en la Subcuenca R. San Miguel (RH24Be) (INEGI, 2010).

3.1.3. Geología y edafología

En área del ensayo ocurren rocas sedimentarias de tipo limolita, en un suelo de tipo aluvial (CETENAL, 1976). El suelo predominante en el área del ensayo es el feozem calcárico y el suelo secundario es rendzina, el cual tiene una textura fina y en fase física petrocálica (CETENAL, 1977).

3.1.4. Clima y vegetación

El clima presente en el CAESA es semiárido templado con la siguiente fórmula climática: BS1k(x') (García, 2004). La temperatura media anual oscila entre 12 y 18°C, mientras que la temperatura del mes más frío es entre -3 y 18°C, y la temperatura del mes más caliente es menor de 22°C. Las lluvias son en verano con una precipitación media anual de 410.7 mm y un porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual (CONABIO, 2001).

El tipo de vegetación que se encuentra en el área del ensayo es pastizal inducido, en la parte baja (valle) alrededor de la plantación el suelo es de uso agrícola temporal (maíz, avena y frijol) y frutal (manzana), mientras que la vegetación en la parte alta es de bosque de pino y chaparral compuesto principalmente de *Pinus cembroides* Zucc. (CETENAL, 1979).

3.2. Diseño experimental

El diseño experimental de la plantación del ensayo de progenie de *Pinus greggii*, fue de bloques completos al azar. Este ensayo contempla 35 familias de medios hermanos distribuidas en 13 bloques, en unidades experimentales (parcelas) de dos plantas. El origen de las familias es de cinco procedencias la Sierra de Arteaga; cuatro del estado de Coahuila y una del estado de Nuevo León (Figura 1).

La planta para el establecimiento del ensayo se produjo en el vivero del Departamento Forestal y la plantación se realizó el 5 de agosto de 2005. Se plantaron un total de 910 plantas distribuidas con un diseño de marco real a 2.5 metros entre plantas y planta, mediante el sistema de plantación de la cepa común. En este caso no establecieron plantas de borde en el perímetro del experimento.

3.3. Variables evaluadas

Se evaluó la sobrevivencia (sobr), la altura total (ht), el diámetro a la base (db) y el diámetro normal (dn) en marzo de 2015 (Osorio, 2016) y en junio de 2021.

- Para estimar el valor en porcentaje de la sobrevivencia, primeramente se registró para cada planta si se encontraba viva o estaba muerta, posteriormente se estimó el porcentaje de sobrevivencia con base en la siguiente fórmula:

$$\text{sobr} = \frac{\text{No. plantas vivas}}{\text{Total de plantas por parcela}} * 100$$

La altura total se midió con una pértiga telescópica marca Hastings con graduación de centímetros, para ello se midió desde la base del árbol hasta el ápice, colocándola lo más cercano y en forma vertical paralela al fuste principal. El diámetro a la base se midió con una forcípula graduada a milímetros marca Haglöf, posicionándola al ras de suelo y en forma perpendicular a la base del tronco. Para el diámetro normal se utilizó una cinta diamétrica marca Forestry Suppliers graduada a milímetros, midiéndose a una altura de 1.3 m del suelo.

3.4. Análisis estadístico

El registro de los datos de cada variable se realizó con la ayuda del programa Excel de Microsoft. Con base en análisis de varianza preliminares y con los resultados de la sobrevivencia por familia y por bloque se eliminaron, para los análisis definitivos, los bloques 10 y 11 para la medición hecha en 2015 y los bloques 8 y 9 para la evaluación de 2021, trabajando finalmente con 11 bloques diferentes en cada de esas evaluaciones.

El procesamiento y los análisis de varianza para cada una de las variables se hicieron con el software Statistical Analysis System (SAS) versión 9.4. Se usó el programa (Proc) GLM para el análisis de varianza a nivel solo de progenies o familias y el procedimiento (Proc)

Varcomp para determinar la descomposición de la varianza para las variables estudiadas (Anexo 1).

Para la variable sobrevivencia se utilizaron los valores promedio por parcela (2 plantas por parcela) y para las demás variables se utilizaron los valores por individuos.

Con el propósito de cumplir con el supuesto de normalidad la sobrevivencia se transformó con la función del arco-seno. De igual manera el diámetro a la base de 2015 y la altura total de 2021 se transformaron con la raíz cuadrada y la potencia al cuadrado, respectivamente. Pese a ello, los valores promedio de las familias fueron expresados en las unidades originales. El diámetro a la base y diámetro normal de 2021 cumplieron con la normalidad sin transformación. El resto de las variables no cumplieron con la normalidad a pesar de que se hicieron transformaciones.

El modelo estadístico que se utilizó para la evolución como ensayo de familias corresponde al diseño de bloques completos al azar, es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \beta_j + F_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Observación de la i -ésima familia dentro del j -ésimo bloque;

μ = Media general del experimento;

β_j = Efecto del j -ésimo bloque;

F_i = Efecto de la i -ésima familia;

ε_{ij} = Error experimental (efecto de la interacción entre la i -ésima familia y el j -ésimo bloque).

Cuando el análisis de varianza determinó que hubo diferencias estadísticas, entonces se procedió a hacer una comparación de media de las familias con la prueba Tukey de separación de medias, utilizando una alfa de 0.05 (Anexo 1).

3.5. Cálculo de la heredabilidad

La heredabilidad en sentido estricto fue estimada a partir de los componentes de varianza, utilizando los cuadrados de la media del Proc varcomp (Anexo 1).

De acuerdo con Zobel y Talbert (1988) la varianza entre familias de medios hermanos (σ^2_f) representa $1/4$ de la varianza genética aditiva (σ^2_A) cuando se trata de familias con

polinización libre, es decir se considera que son medios hermanos y que hay una correlación entre ellos de 0.25, mientras que al tratarse de hermanos completos, es decir, los individuos que tienen los mismo progenitores, la varianza entre familias representa $1/2$ de la varianza genética aditiva (σ^2_A).

La anterior aseveración supone que los padres no están emparentados y que la endogamia es cero, ya que ninguno de ellos resultó de la autopolinización y todos fueron engendrados por diferentes machos. Sin embargo, generalmente, estas consideraciones no se cumplen en especies forestales y es probable que la correlación entre hermanos sea mayor a 0.25 (Squillace, 1974). Considerar una correlación entre la descendencia de 0.25 por lo general resulta en una sobreestimación de la varianza genética aditiva (Namkoong, 1979), por lo que sugiere utilizar solo $1/3$ de la varianza adictiva para el cálculo de la varianza entre familias (Sorensen y White, 1988; Morales *et al.*, 2013; Genes, 2017).

De acuerdo con lo anterior, se empleó un coeficiente de determinación genética de 3 para el cálculo de la varianza genética aditiva, ya que se supuso que la correlación genética entre hermanos obtenidos por polinización libre es de 0.33, es decir, algunos de los individuos de la misma familia se consideran hermanos completos. Con los componentes de varianza obtenidos se estimó la heredabilidad en sentido estricto, tanto a nivel individual (h^2_i) como de las medias de familia (h^2_f), con las siguientes ecuaciones:

$$h^2_i = \frac{\sigma^2_A}{\sigma^2_p} = \frac{3 * \sigma^2_f}{\sigma^2_e + \sigma^2_f}$$

$$h^2_f = \frac{\sigma^2_f}{\sigma^2_{pf}} = \frac{(CMf - \sigma^2_e)/b}{CMf/b}$$

Donde:

h^2_i = Heredabilidad individual.

h^2_f = Heredabilidad a nivel familia.

σ^2_A = Varianza genética aditiva.

σ^2_p = Varianza fenotípica.

σ^2_f = Varianza entre familias.

σ^2_e = Variación del ambiente.

σ^2_{pf} = Varianza fenotípica por varianza de las familias.

b = Número de bloques.

CMf = Cuadrados medios de las familias obtenidos por Proc Varcomp en SAS.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Supervivencia

En 2015, a los 10 años de establecido el ensayo, la supervivencia fue de 84 ± 1.39 %, con un rango promedio por familia que va de 63.6 a 100 %; dicha supervivencia, a los 16 años de establecida la prueba en 2021, disminuyó a 72 ± 1.78 % con un rango promedio por familia que va de 32.0 a 95.5 % (Figura 2). Tal disminución se debe en parte mortalidad por sequía y por el ataque de plaga que presentaron algunos árboles por presencia del hongo *Fusarium verticillioides* (De León, 2020), que generó canchros resinosos. Para el control del hongo se realizaron cortes de yema principal y en casos extremos se derribó el árbol, además se aplicó un fungicida (Tecto) al suelo.

El análisis de varianza para la supervivencia en 2021 mostró diferencias altamente significativas entre familias ($p = 0.0059$) (Anexo 2). Las familias S10 (99.5 %) y T290 (98.2 %) fueron diferentes a la familia J7 que tuvo el valor más bajo de supervivencia (41.5 %) a los 16 años de establecida la prueba (Figura 2). El análisis de varianza hecho para la supervivencia en 2015 mostró que no hubo diferencias estadísticas ($p = 0.1329$) entre las familias; sin embargo, en 2015 destacó la familia S18 y J25 con un 100 y 95 % de supervivencia, respectivamente.

Las categorías de supervivencia propuestas por Centeno (1993) para plantaciones forestales en Nicaragua, se clasifican en las siguientes: muy bueno: supervivencia del 80 a 100 %, buena: 60 a 79 %; regular: 40 a 59 %; y mala: <40%. Con base en la clasificación de Centeno (1993), la supervivencia evaluada en 2015 (Osorio, 2016) fue muy buena; mientras la supervivencia en 2021, del presente trabajo, fue solamente buena.

Serrato (2000) en su estudio de una prueba de progenie de *Pinus greggii* en Los Tarihuanes, Cañón de Jamé, Arteaga, Coah., reportó una supervivencia para el primer ensayo de 74.8 % y para el segundo de 56.31%, con un promedio general de ambos ensayos de 65.6 %; donde éste, es menor a la supervivencia registrada en este trabajo en 2015 y 2021 (Cuadro 1).

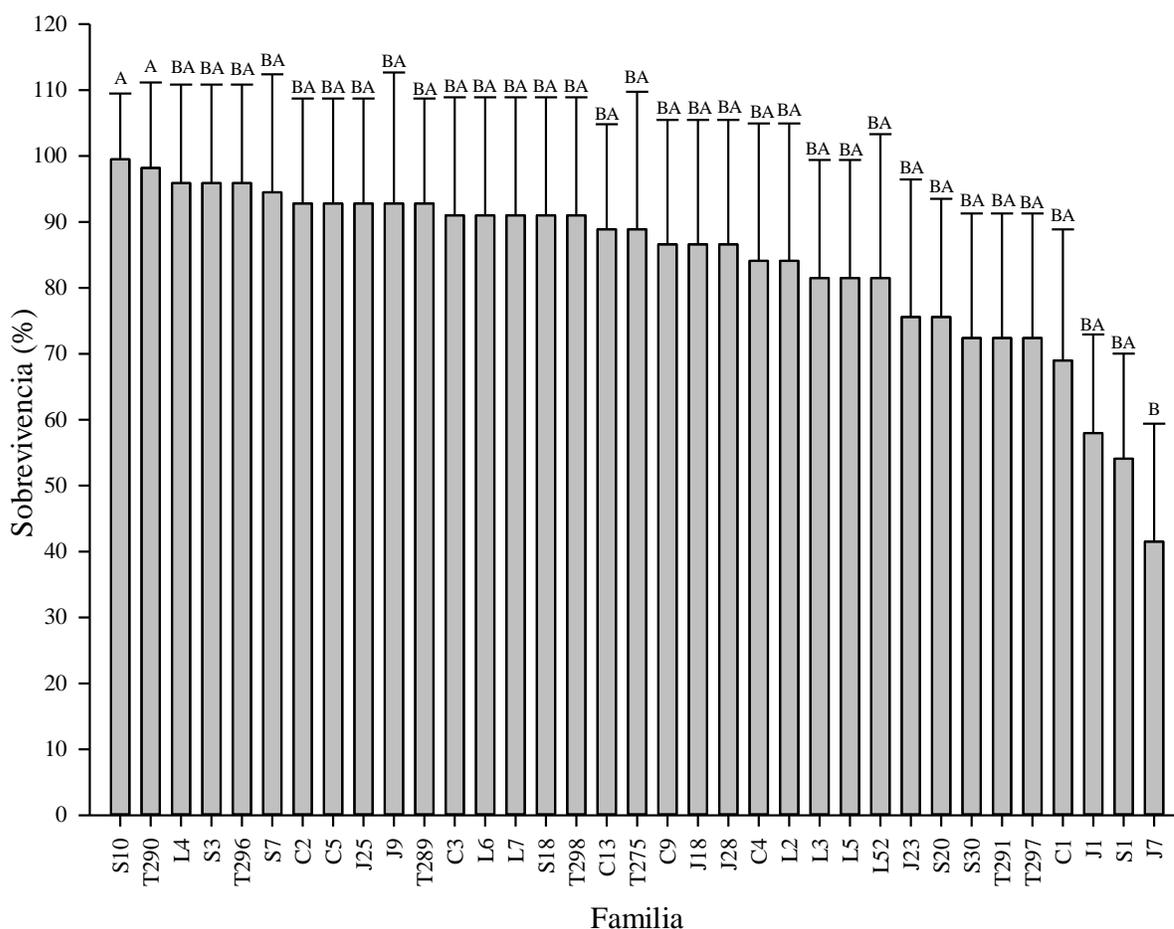
Cuadro 1. Supervivencia (%) reportada por otros autores y su comparación con la del ensayo de progenies de *Pinus greggii* Engelm. establecido en Los Lirios, Arteaga, Coah., a los 10 y 16 años de su evaluación (2015 y 2021, respectivamente).

Autor (Año)	EE (años)	Sobr. (%)	Ubicación (coordenadas LN-LW)	Altitud (msnm)	P (%) (E)	Suelo	Clima
Evaluación 2015	10	84	CAESA, Arteaga, Coah. (25° 24' y 100° 36')	2,280	4 (C)	Rocas de origen sedimentario. Feozem calcárico y rendzina.	Semiárido templado (BS1k(x')), con una TMA de los 12 a 18° C y una PMA de 410 mm.
Evaluación 2021	16	72		2,260			
Vela (2002)	9.8	75	Tarihuanes, Arteaga, Coah. (25° 22' y 100° 36')	2,380	Ladera 8 a 16 (S)	Rocas de origen sedimentario. Feozem calcárico y rendzina asociada con litosol. Poco profundo.	Templado (Cb(x')(e')g), con una TMA de 12.9 °C y una PMA de 428.6 mm.
Serrato (2000)	5	66 (75 y 56)					
Godínez (2005)	4.5	48	Ejido 18 de Marzo, Galeana, N.L. (24° 53' y 100° 11')	2,209	19 (NE)	Rocas de origen sedimentario. Suelo es de tipo crómico y en menor cantidad rendzina. Erosión moderada.	Seco semicálido, con una TMA de 18.6 ° C y una PMA de 365 mm.
Valencia <i>et al.</i> (2006)	2.6	92	Mixteca Alta de Oaxaca (Tlacotepec Plumas: 17° 52' y 97° 26'; Magdalena Zahuatlán: 19° 24' y 97° 12')	2,140		Cambisol cálcico en Tlacotepec Plumas y Luvisol crómico en Magdalena Zahuatlán. Suelos muy someros y erosionados.	Magdalena Zahuatlán: templado semiseco, con TMA de 15 °C a 16.9 °C (mínima 6.6 y máxima 26 °C) y una PMA de 420.8 a 650 mm. Tlacotepec Plumas: Semiseco templado, con una TMA de 15 a 16 ° C (mínima 8.5 y máxima 23.9 °C) y Cuna PMA de 519 mm.
Ortíz (2015)	17	89					

Autor (Año)	EE (años)	Sobr. (%)	Ubicación (coordenadas LN-LW)	Altitud (msnm)	P (%) (E)	Suelo	Clima
Rodríguez <i>et al.</i> (2009)	4.5	95	Cerro el Potosí, Ejido 18 de Marzo, Galeana, N.L. (24° 53' y 100° 12')	2,209	19 (NE)	Debido al uso agrícola anterior, el suelo presenta un nivel de erosión moderado.	Seco semicálido, con una TMA de 18.2° C y una PMA de 401.1 mm.
Rodríguez <i>et al.</i> (2013)	10.9	71					
Gutiérrez <i>et al.</i> (2012)	2	76	Cerro de León, Villa Aldama, Ver. (19° 39' y 97° 14')	2,400			TMA de 12.6 °C y una PMA de 482 mm.
Muñoz <i>et al.</i> (2015)	7	92	Hueyapan, Pue. (19° 53' y 97° 24')	1,620	15 a 30 (NO)	Andosol húmico, de color grisáceo oscuro.	Semicálido húmedo, con TMA de los 18 a 24 °C y una PMA de 3,294 mm.
Vázquez, 2016	0.11	41	San Juan de la Vaquería, Saltillo, Coah. (25° 15' y 101° 13')	1,840	3	Xerosoles cálcicos de 125 cm de profundidad.	Semiseco templado (BS1kx'), con una TMA de los 16 a 20° C.
García, 2017	0.10	85	Ejido La Encantada, Saltillo, Coah. (25° 16' y 101° 04')	1,882		Xerosoles cálcicos con carbonato de cálcico en el límite inferior del suelo	Clima árido, semicálido, con temperaturas entre 18 a 22°C.
Domínguez <i>et al.</i> (2017)	13	91	La Manga Vieja, Santiago de Anaya, Hgo. (20° 25' y 98° 57')			Rendzina con poca profundidad y rocas calizas.	Templado semiseco (BS1kw(w)), con una TMA de 17.23 °C y una PMA de 259.42 mm.

EE = edad de evaluación; LN = latitud norte; LW = longitud oeste; P = pendiente; E = exposición.

Sin embargo, Serrato (2000) menciona que habían transcurrido cuatro años de sequía después de haberse plantado ambos ensayos, lo cual tuvo un efecto negativo en la sobrevivencia a los cinco años que el autor evaluó. En contraste, los valores de sobrevivencia reportados en este estudio a los 10 años de su primera evaluación (Osorio, 2016) y a los 16 años de su segunda evaluación, pese a que ésta última evaluación, en 2021, hay una diferencia de 11 años de edad con respecto a la edad que tenían las plantaciones cuando Serrato (2000) las evaluó, son más altos que lo reportado por el autor citado.



Barras con la misma letra son estadísticamente iguales de acuerdo con la prueba Tukey, $\alpha=0.05$.

Figura 2. Sobrevivencia del ensayo de progenies de *Pinus greggii* Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coah., a los 16 años de establecido (2021).

En otra prueba de progenies de *Pinus greggii* establecida en el CAESA, Coah., Vela (2002) encontró una sobrevivencia promedio de 75.36 % (Cuadro 1), la cual fue menor a la de 2015

registrada en este trabajo (Osorio, 2016). Cabe señalar que ambos ensayos, Vela (2002) y el reportado en el presente estudio, están establecidos en el mismo lugar, el CAESA, y que además tienen en común la procedencia de Los Lirios. Pese a ello la sobrevivencia del presente estudio en 2021 (72 %) fue menor que la reportada por Vela (2002) (75.36 %).

De acuerdo a lo anterior, es relevante destacar que la diferencia de sobrevivencia reportada entre el presente trabajo y el de Vela (2002) se puede atribuir, en gran medida, a las condiciones de sequía que se registraron de 1992 a 2001 y que fueron reportadas en estudios dendrocronológicos próximos a la plantación (Villanueva *et al.*, 2009; Constante *et al.*, 2009; Cerano *et al.*, 2011), lo que ocasionó mayor mortalidad de los árboles.

En contraste, Godínez (2005), registró una sobrevivencia de 48.3 %. En dicho ensayo se incluyeron procedencias y familias de las plantadas en el presente estudio (Puerto Conejo, Los Lirios, Jamé y Santa Anita) (Cuadro 1).

La sobrevivencia evaluada en 2015 (Osorio, 2016) y en 2021, en el presente estudio, fue mayor a la encontrada por Godínez (2005) (Cuadro 1). Lo anterior a pesar de la diferencia de edades a las que fueron evaluados los ensayos. Sin embargo, esa baja sobrevivencia reportada por Godínez (2005) se puede atribuir a la sequía que se presentó en el norte del país durante el periodo de 1992 a 2001.

Por otro lado, Valencia *et al.* (2006) reportaron una sobrevivencia promedio para la variedad *greggii* de 92.6 % en Tlacotepec Plumas y de 90.7 % en Magdalena Zahuatlán (Cuadro 1), con un promedio general para esa variedad de ambos ensayos de 91.7 % de sobrevivencia. Los valores de sobrevivencia en este estudio, en 2015 (84 %) y en 2021 (72 %), fueron menores a los valores de sobrevivencia reportados por los citados autores.

Lo anterior se atribuye, seguramente, a la diferencia de edades a las que fueron evaluados los ensayos. Por otra parte las diferencias de las condiciones ambientales entre las localidades de los estudios, también pudieron afectar. Por ejemplo, las temperaturas mínimas y máximas registradas en Tlacotepec Plumas son de 8.5 y 23.9 °C, mientras que en Magdalena Zahuatlán son de 6.6 y 26.0 °C (SMN-CONAGUA, 2020a); en contraste dichas temperaturas mínimas y máximas, en el CAESA son de 4.3 y 20.4 °C (SMN-CONAGUA, 2020b), por lo que las temperaturas en el CAESA son menores a las prevalecientes en La Mixteca Alta de Oaxaca,

en consecuencia, dicha discrepancia en esas temperaturas pudo haber contribuido a la diferencia de sobrevivencia registrada entre el presente trabajo y el estudio de Valencia *et al.* (2006) (Cuadro 1).

En una prueba de procedencia de *Pinus greggii*, Rodríguez *et al.* (2009) registraron un 95 % de sobrevivencia a los cuatro años y medio de establecida la plantación (Cuadro 1); dicho valor de sobrevivencia es mayor a la sobrevivencia registrada en 2015 (84 %) (Osorio, 2016) y en 2021 (72 %) del presente trabajo. Lo anterior se debió a la diferencia de edades a la que fueron evaluados los ensayos, ya que hay una diferencia de cinco años y medio entre la evaluación del 2015 (Osorio, 2016) y la del citado artículo. La sobrevivencia que reportan los autores citados (95 %) fue mayor a la registrada en la evaluación en 2021 (72 %) de presente trabajo. Lo anterior se atribuye, principalmente, a la diferencia de edades a las que fueron evaluados los ensayos.

En una prueba de procedencias/progenies de *Pinus greggii*, establecida en el Cerro de León, Villa Aldama, Ver., Gutiérrez *et al.* (2012) reportaron un promedio de sobrevivencia del 75.65 % (Cuadro 1). La sobrevivencia registrada en el presente estudio en 2015 (84 %) fue mayor a la reportada por los citados autores, mientras que la del 2021 (72 %) fue similar a la del citado trabajo, pese a que la plantación al momento de la evaluación era mayor, con 14 años (Cuadro 1).

Por otro lado, en el mismo ensayo de procedencias de *Pinus greggii* en el Cerro El Potosí, Galeana, N.L. Rodríguez *et al.* (2013) reportaron un 71.4 % de sobrevivencia, pero a los 10.9 años de establecido el ensayo (Cuadro 1). El valor de sobrevivencia reportado por Osorio (2016) fue superior al valor registrado por esos autores, pese a que ambos ensayos se evaluaron aproximadamente a la misma edad de su plantación. En contraste, el valor de sobrevivencia reportado en este estudio a los 16 años (72 %) de establecido el ensayo fue similar por esos autores. Rodríguez *et al.* (2013) reportaron que el dueño de la parcela sin llevar un registro de su ubicación en los bloques o de sus procedencias; extrajo árboles de toda la plantación, para vender algunos como árboles de navidad, lo que ocasionó seguramente, que ese valor de sobrevivencia reportado por los autores sea más bajo con respecto a la reportada en 2015 (84 %) (Osorio, 2016) y en 2021 (72 %) de este estudio.

En los mismos ensayos de procedencias y progenies de *Pinus greggii*, en dos localidades de La Mixteca Alta de Oaxaca, Ortíz (2015) reportó una sobrevivencia promedio de 95.9 % en Tlacotepec Plumas y de 82.4 % en Magdalena Zahuatlán, con un promedio general para ambos ensayos de 80.2 % de sobrevivencia a los 17 años de establecida la plantación (Cuadro 1). La sobrevivencia reportada en 2015 (84 %) por Osorio (2016) y en 2021 (72 %) de este estudio, es menor a la reportada por el citado estudio, a pesar de que hay una diferencia de 7 años, respectivamente, en la edad a la que fue evaluado el ensayo por el citado autor. Como ya se mencionó anteriormente, las temperaturas, mínima y máxima, en el CAESA son menores a las prevalecientes en la Mixteca Alta de Oaxaca, lo que pudo haber contribuido a la diferencia de sobrevivencia registrada entre el presente trabajo y el estudio citado.

En una comparación del crecimiento entre *Pinus chiapensis*, *P. greggii* y *P. patula*, en una plantación comercial, establecida en 2001, en Hueyapan, Pue., Muñoz *et al.* (2015) registraron una sobrevivencia del 92 % (Cuadro 1). La sobrevivencia reportada en 2015 (84 %) por Osorio (2016) y en 2021 (72 %) de este estudio, es menor a la reportada por el citado estudio.

La sobrevivencia registrada en este estudio en 2015 y 2021 difiere con la reportada por Muñoz *et al.* (2015), principalmente, por la diferencia de edades a las que fueron evaluados los ensayos; por otra parte, esa diferencia también se debe, seguramente, a las condiciones de precipitación del área donde se establecieron los ensayos. La precipitación media anual registrada en el CAESA es de 410.7 mm (SMN-CONAGUA, 2020b); en contraste la precipitación en Hueyapan es de 3,294.7 mm (SMN-CONAGUA, 2020c), por lo que la precipitación en el CAESA es menor a la prevaleciente en Hueyapan, en consecuencia, dicha discrepancia en esas precipitaciones pudo haber contribuido a la diferencia de sobrevivencia registrada entre el presente trabajo y el estudio de Muñoz *et al.* (2015) (Cuadro 1).

En plantaciones evaluadas de *Pinus greggii*, establecidas con diferentes tratamientos al suelo, en Saltillo, Coah., registraron sobrevivencias del 41.1 % (Vázquez, 2016) y 85 % (García, 2017) (Cuadro 1). La sobrevivencia registrada por Osorio (2016) es mayor a la reportada por Vázquez (2016), pero similares a la encontrada por García (2017). Por otro lado, en plantaciones realizadas en suelos degradados y con escasa precipitación, en Santiago de Anaya, Hgo., Domínguez *et al.* (2017) encontraron una sobrevivencia de 91 % (Cuadro

1); la cual es mayor a la sobrevivencia registrada en 2015 (84 %) por Osorio (2016) y en 2021 (72 %) de este estudio.

En la misma prueba de procedencias/progenie de *Pinus greggii*, establecida en el ejido “Cerro de León”, Villa Aldama, Ver., Ramírez *et al.* (2018) registraron un promedio de sobrevivencia del 63.4 % a los cinco años de establecida (Cuadro 1). La sobrevivencia registrada por los autores citados, es menor a la registrada en 2015 (84 %) por Osorio (2016) y en 2021 (72 %) de este estudio, pese a la diferencia de edad a la que fue evaluado el ensayo.

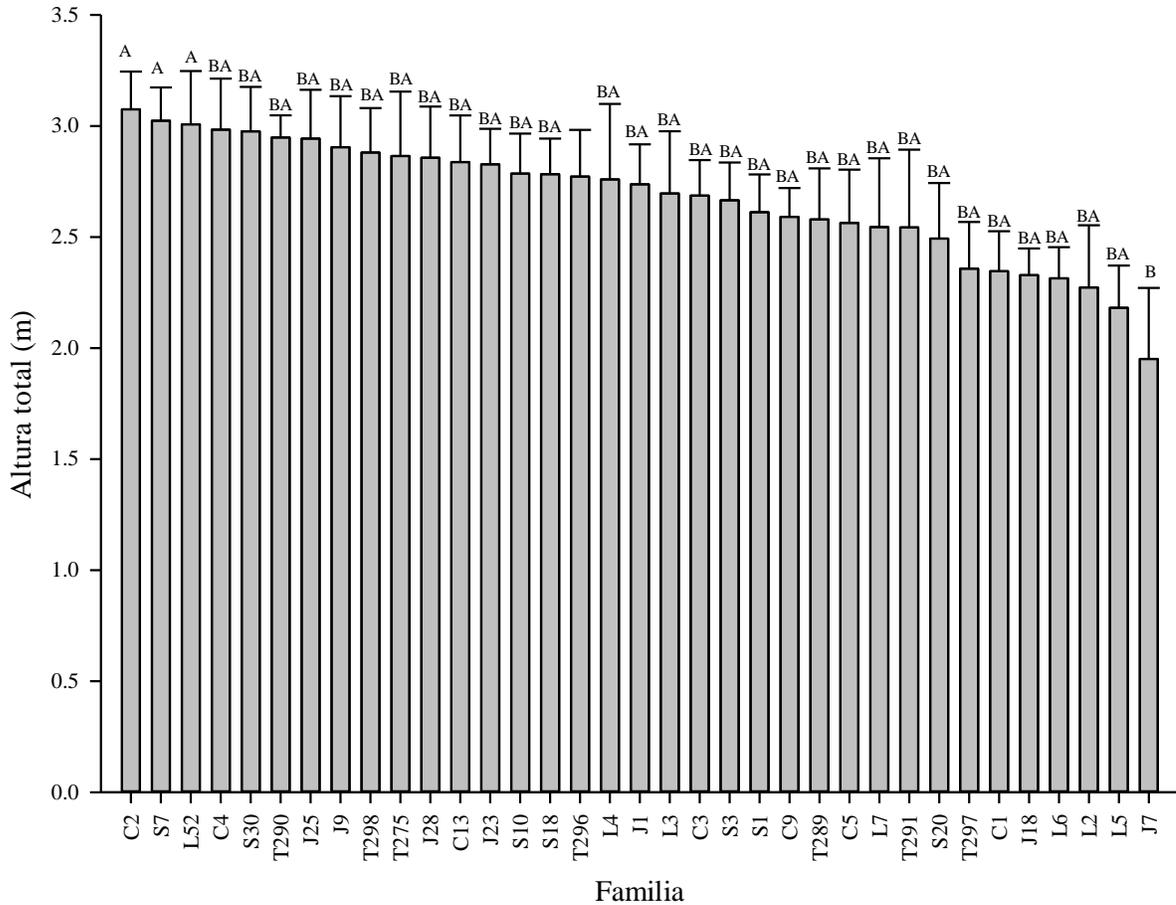
4.2. Altura total

En el 2015, a los 10 años de establecido el ensayo, la altura total promedio fue de 2.7 ± 0.04 m, con un rango promedio por familia que va de 2.0 a 3.1 m (Figura 3); la altura total, a los 16 años de establecida la prueba en 2021, aumentó a 5.9 ± 0.05 m con un rango promedio por familia que va de 4.8 a 6.6 m (Figura 4). Cabe señalar que ese mayor valor de altura total registrado en la evaluación de 2021 se debe seguramente al incremento de la competencia entre los árboles, por espacio y luz, dado que no se ha modificado la densidad original bajo ninguna prescripción silvícola. Por lo que los espacios liberados son resultado de la mortalidad por sequía y por cortas de saneamiento; esto último derivado del ataque de *Fusarium verticillioides* (De León, 2020).

El análisis de varianza hecho para la altura total en 2015 y 2021 arrojó que hubo diferencias estadísticas, altamente significativas, entre familias ($p = 0.0016$; $p = 0.0009$, respectivamente) (Figura 3 y 4) (Anexo 2). Serrato (2000) también encontró diferencias estadísticas, altamente significativas, para la variable altura ($p = 0.0001$) en una primera medición al año de establecida la plantación, sin embargo, en una segunda medición, a los 5 años de establecida la plantación, no encontró diferencias estadísticas. Por otro lado, Vela (2002) reporta no haber encontrado diferencias estadísticas entre familias a los 9.7 años.

En la evaluación de 2015, las familias C2, S7 y L52 registraron los mayores valores de altura total y fueron estadísticamente diferentes a la familia J7 que tuvo el valor más bajo de altura total a los 10 años de establecido el ensayo (Figura 3); mientras que en la evaluación a los 16 años de establecida la prueba en 2021, las familias C4, J25, T275, S30 y T296 fueron las que registraron los mayores valores de altura total y fueron estadísticamente diferentes a

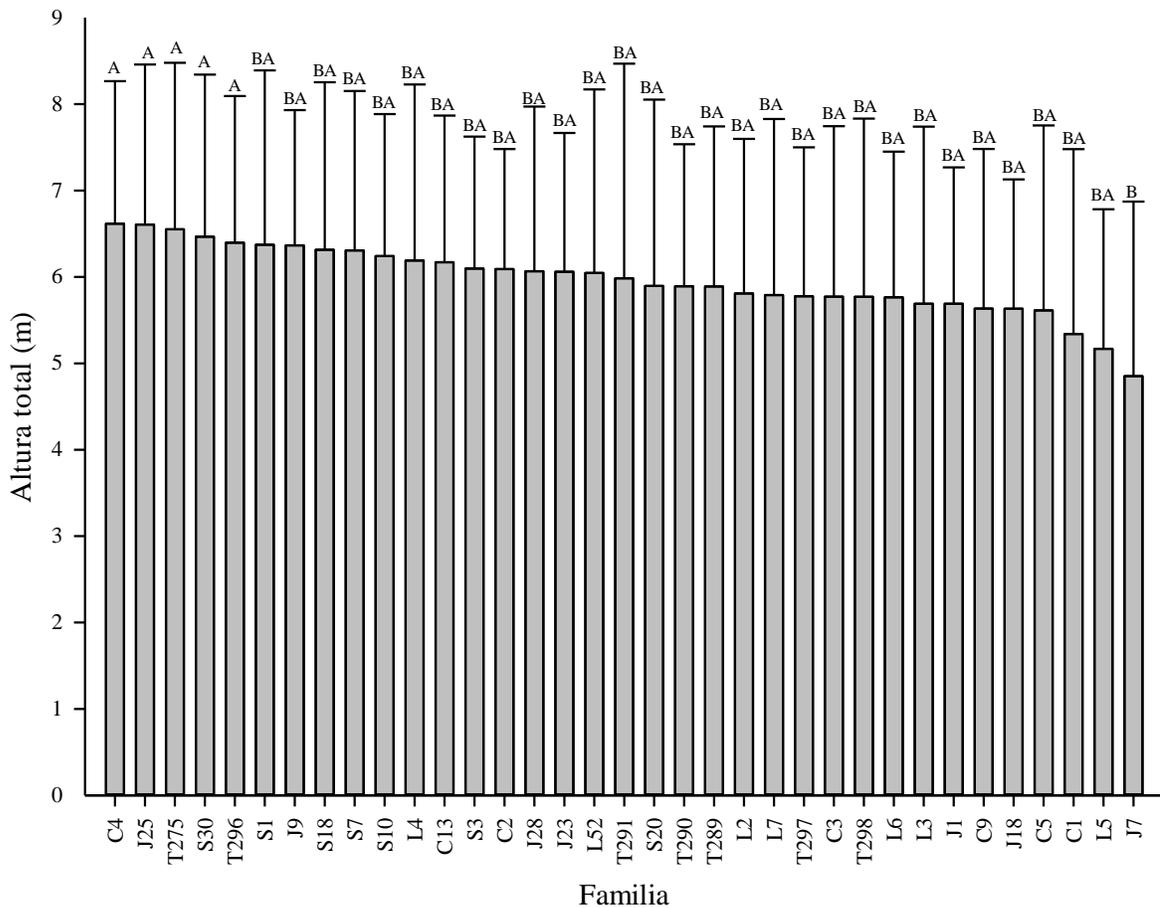
la familia J7 que tuvo el valor más bajo de altura total a los 16 años de establecido el ensayo (Figura 4).



Barras con la misma letra son estadísticamente iguales de acuerdo con la prueba Tukey, $\alpha=0.05$.

Figura 3. Altura total promedio por familia en 2015, a los 10 años de establecido el ensayo de progenies de *Pinus greggii* Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

En contraste, Serrato (2000) registró al primer año una altura total promedio de 0.48 metros, para ambos ensayos establecidos en Tarihuanes, Arteaga, Coah. La familia 19 tuvo el mayor valor de altura registrada (0.67 m) y la familia 21 tuvo el menor valor de altura (0.31 m) en el primer ensayo. En el segundo ensayo, el autor reportó que la familia 19, también, registró la mayor altura total (0.69 m) y la familia 44 tuvo el menor valor (0.25 m). Serrato (2000) en una segunda evaluación reportó una altura total promedio de 1.33 m (Cuadro 2).



Barras con la misma letra son estadísticamente iguales de acuerdo con la prueba Tukey, $\alpha=0.05$.

Figura 4. Altura total promedio por familia en 2021, a los 16 años de establecido el ensayo de progenies de *Pinus greggii* Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

En el presente trabajo se registraron mayores alturas promedio con respecto a lo reportado por Serrato (2000). En 2015, se registró una altura total promedio de 2.7 m, donde la familia C2 registró el valor más alto (3.1 m) y la familia J7 tuvo el menor valor de altura total (2.0 m) (Figura 3). En el 2021 el presente estudio, los árboles obtuvieron una altura total promedio de 5.9 m. Las familias C4, J25, T275 registraron el mayor valor de la altura total (6.6 m). Nuevamente, la familia J7 tuvo el menor valor de altura total (4.9 m) (Figura 4).

Los valores reportados en este estudio difieren a los encontrados por Serrato (2000) en gran medida, por la diferencia de edades a las que fueron evaluados los ensayos. Además, esa diferencia se debe, seguramente, a las distintas condiciones edafológicas y topográficas que

influyen en la calidad de estación o del sitio (Cuadro 2). Esta calidad de estación está íntimamente relacionada con las condiciones del suelo, principalmente, la profundidad del suelo, ya que, a mayor profundidad de suelo se presenta mayor altura (Franco *et al.*, 2003). En este caso los factores que influyen son la pendiente, la exposición y la profundidad del suelo.

El CAESA y el predio Los Tarihuanes presentan un tipo de suelo similar, feozem calcárico y rendzina (CETENAL, 1977), pero diferente profundidad, exposición y pendiente. El predio Los Tarihuanes presenta una condición de ladera con exposición sur, con una pendiente de hasta 16 % (Serrato, 2000); mientras que en el CAESA presenta una pendiente máxima del 4%, con exposición cenital y suelos más profundos. Las condiciones anteriores podrían permitir que el ensayo establecido en el CAESA tenga mejor calidad de estación en comparación con el predio Los Tarihuanes (Cuadro 2).

Por otro lado, Vela (2002) reporta una altura total promedio de 4.17 m, a los 9 años 8 meses de establecida la plantación. El promedio de altura total registrado en 2015 (2.7 m) del presente estudio, es menor en un 35 % al reportado por el citado autor. Cabe señalar que Vela (2002) evaluó a la misma edad que la evaluación de 2015 (Osorio, 2016), a los 10 años aproximadamente. Por otro lado, la altura total promedio registrada en 2021 (5.9 m) del presente estudio es mayor a la reportada por Vela (2002); esto se debe, en gran medida a que la evaluación en 2021 de este trabajo tiene una diferencia de 6 años edad con respecto a la edad en que evaluó Vela (2002) (Cuadro 2).

Godínez (2005) reporta una altura total promedio de 1.2 m a cuatro años cinco meses de plantado el ensayo. El valor promedio de altura total reportado por el citado autor es menor al registrado en 2015 (2.7 m) por Osorio (2016) y en 2021 (5.9 m) del presente estudio. Lo anterior se debe, principalmente, a la diferencia de edades a las que fueron evaluados los ensayos; además, también se le puede atribuir a las condiciones edafológicas donde se establecieron los ensayos, ya que en el CAESA ocurre un suelo profundo con pendiente del 4%, en contraste en el Ejido 18 de Marzo ocurre un suelo poco profundo con erosión moderada y pendiente del 19 % (Godínez, 2005) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Altura total (m) reportada por otros autores y su comparación con la del ensayo de progenies de *Pinus greggii* Engelm. establecido en Los Lirios, Arteaga, Coah., a los 10 y 16 años de su evaluación (2015 y 2021, respectivamente).

Autor (Año)	EE (años)	Altura total (m)	Ubicación (coordenadas LN-LW)	Altitud (msnm)	P (%) (E)	Suelo	Esp. (m)
Evaluación 2015	10	2.7	CAESA, Arteaga, Coah. (25° 24' y 100° 36')	2,280	4 (C)	Rocas de origen sedimentario. Feozem calcárico y rendzina.	2.5 x
Evaluación 2021	16	5.9		2.5			
Vela (2002)	9.8	4.2	Tarihuanes, Arteaga, Coah. (25° 22' y 100° 36')	2,260	Ladera 8 a 16 (S)	Rocas de origen sedimentario. Feozem calcárico y rendzina asociada con litosol. Poco profundo.	3 x 3
Serrato (2000)	5	1.3		2,380			
Godínez (2005)	4.5	1.2	Ejido 18 de Marzo, Galeana, N.L. (24° 53' y 100° 11')	2,209	19 (NE)	Rocas de origen sedimentario. Suelo es de tipo crómico y en menor cantidad rendzina. Erosión moderada.	2 x 2
Ortíz (2015)	17	7.8	Mixteca Alta de Oaxaca (Tlacotepec Plumas: 17° 52' y 97° 26' Magdalena Zahuatlán: 19° 24' y 97° 12')	2,140		Cambisol cálcico en Tlacotepec Plumas y Luvisol crómico en Magdalena Zahuatlán. Suelos muy someros y erosionados.	3 x 3
Rodríguez <i>et al.</i> (2013)	10.9	Mayor 6.8 m. Menor 5.8 m.	Cerro el Potosí, Ejido 18 de Marzo, Galeana, N.L. (24° 53' y 100° 12')	2,209	19 (NE)	Debido al uso agrícola anterior, el suelo presenta un nivel de erosión moderado.	2 x 2

EE = edad de evaluación; LN = latitud norte; LW = longitud oeste; P = pendiente; E = exposición; Esp. = espaciamiento.

Rodríguez *et al.* (2013) registraron 6.8 m como la mayor altura total promedio, en la procedencia de Agua Fría y 5.8 m como la menor altura total promedio, en la procedencia de La Tapona. Los valores obtenidos de altura total promedio en 2015 (2.7 m) y en 2021 (5.9 m) del presente estudio son menores al reportado por los autores citados. Cabe señalar que Rodríguez *et al.* (2013) realizaron su evaluación a la misma edad de plantación que la evaluación en 2015 (Osorio, 2016), a los 10 años aproximadamente; en 2021 del presente trabajo, la evaluación se hizo con 6 años más de edad que la evaluación de los mencionados autores (Cuadro 2).

Por otro lado, Ortíz (2015) reportó una altura total promedio para la variedad *greggii* de 9.1 m en Tlacotepec Plumas y de 6.4 m en Magdalena Zahuatlán, con un promedio general para esa variedad de ambos ensayos de 7.8 metros de altura total a los 17 años de establecidos los ensayos (Cuadro 2). La altura total promedio reportada en 2015 (2.7 m) es menor a la reportada por el citado autor para la variedad *greggii*. Lo anterior se debe en gran medida a que hay una diferencia de siete años en la edad a la que fue evaluado el ensayo por el citado autor. La altura total promedio en 2021 de este estudio (5.9 m), es similar a la reportada por Ortíz (2015) (7.7 m) para la variedad *greggii*; dicha altura, fue evaluada en los ensayos a una edad similar después de haberse establecido la plantación (Cuadro 2).

Los valores reportados por Ortíz (2015) difieren con los reportados en el presente estudio, principalmente, por la diferencia en la calidad de sitio en la que fueron establecidos los ensayos. La calidad de sitio está influenciada por una serie de factores ambientales como la profundidad del suelo, su textura, las características de sus perfiles, lo pronunciado de la pendiente, la exposición, el microclima, las especies que habitan en él y otros más (Daniel *et al.*, 1982). De acuerdo con lo anterior, el principal factor que diferencia los resultados obtenidos en la variable altura total es la profundidad del suelo, ya que con base en Valencia *et al.* (2006) y Ortíz (2015) en los ensayos establecidos en La Mixteca Alta de Oaxaca existen suelos muy someros y erosionados, a diferencia de los suelos profundos presente en el CAESA (Cuadro 2).

Los valores promedio en altura total obtenidos en el presente estudio difieren con los valores reportados por los distintos autores, en gran medida, por la diferencia de edades a las que fueron evaluados los ensayos, principalmente, con respecto a la evaluación en 2021 del

presente trabajo (Serrato, 2000; Vela, 2002; Godínez, 2005; Rodríguez *et al.*, 2013); sin embargo, en otros casos se debe seguramente, en gran parte, a las condiciones climáticas y edafológicas del lugar o la densidad de plantación y el manejo de la plantación (Vela, 2002; Godínez, 2005; Rodríguez *et al.*, 2013; Ortíz, 2015) (Cuadro 2). La densidad y el manejo de la plantación, influye directamente en la variable altura, ya que a mayor densidad de plantación y al tratarse de una especie intolerante (López y Escobar, 2021), existe una mayor competencia por luz, en consecuencia, los individuos tienden a desarrollar mayor altura (Rozas, 2004).

4.3. Diámetro a la base

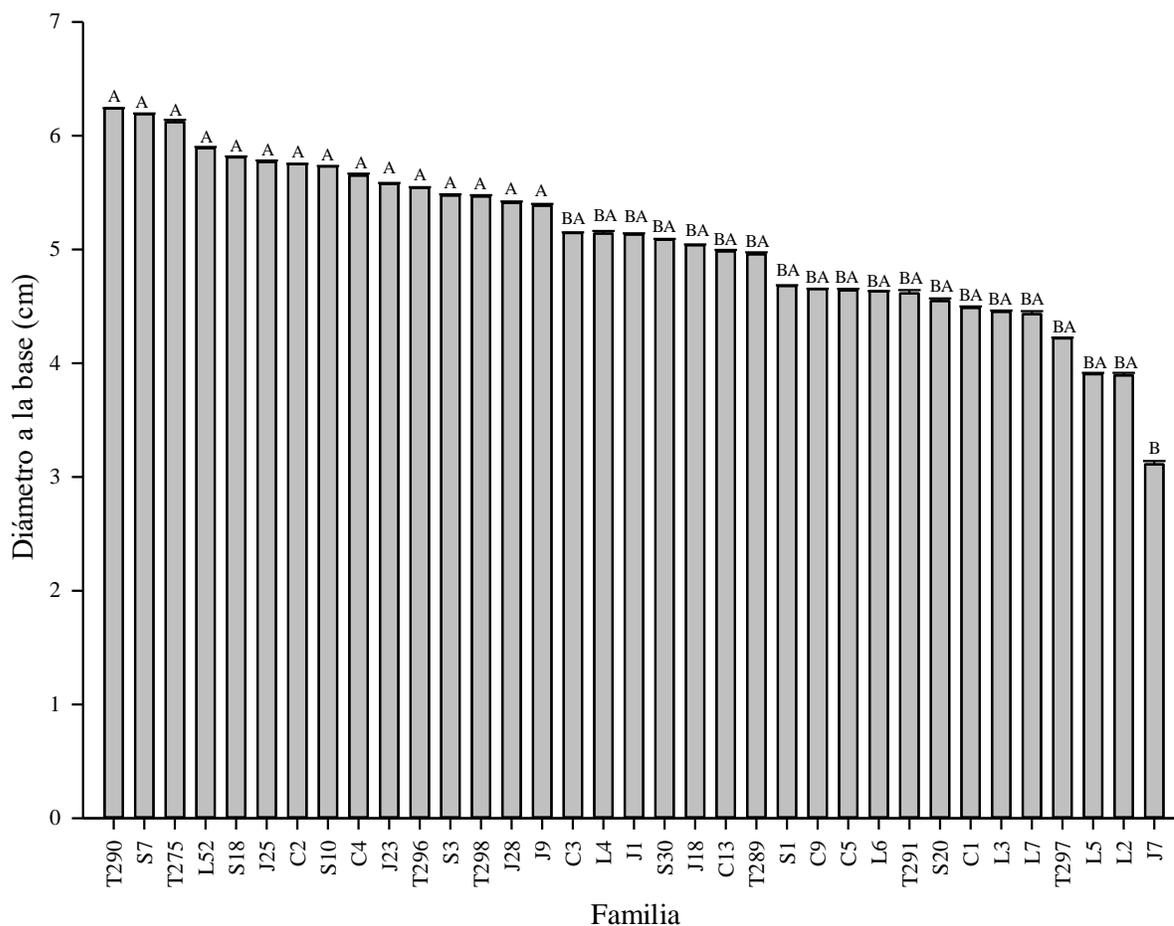
En el 2015, a los 10 años de establecido el ensayo, el diámetro a la base promedio fue de 5.3 ± 0.08 cm, con un rango promedio por familia que va de 3.3 a 6.3 cm (Figura 5); el diámetro a la base, a los 16 años de establecida la prueba en 2021, aumentó a 14.2 ± 0.16 cm con un rango promedio por familia que va de 9.7 a 18.1 cm (Figura 6).

El aumento del diámetro a la base en la evaluación de 2021 se debe, seguramente, al crecimiento natural del árbol, dado que el árbol crece porque sus dimensiones aumentan, en consecuencia, el diámetro se incrementa por el crecimiento de los meristemos laterales; el cual se le conoce como crecimiento secundario (Klepac, 1983). Sin embargo, lo anterior está relacionado con factores de manejo y ambientales que aumenten o limitan el crecimiento en diámetro del árbol, como lo son: densidad de la plantación, fotoperiodo, temperatura y disponibilidad de agua. Además, el diámetro depende, principalmente, del control del desarrollo de la copa y del espaciamiento entre árboles (Daniel *et al.*, 1982).

El análisis de varianza hecho para el diámetro a la base en 2015 y 2021 arrojó que hubo diferencias estadísticas altamente significativas entre familias ($p = 0.0001$) (Figura 5 y 6) (Anexo 2).

En la evaluación de 2015, las familias T290, S7, T275, L52, S18, J25, C2, S10, C4, J23, T296, S3, T298, J28 y J9 fueron estadísticamente diferentes a la familia J7 que tuvo el valor más bajo de diámetro a la base, a los 10 años de establecido el ensayo; donde destaca la familia T290 con el mayor valor promedio de diámetro a la base (6.2 cm) (Figura 5). En la evaluación a los 16 años de establecida la prueba en 2021, las familias T275, J25, J28, S1,

C4, J1, S18, J9, T290, S7, L4, J23, S10, S3, T296, C2 y T289 fueron estadísticamente diferentes a la familia J7 que tuvo el valor más bajo de diámetro a la base, a los 16 años de establecido el ensayo; donde destaca la familia T275 con el mayor valor promedio de diámetro a la base (18.1 cm) (Figura 6).

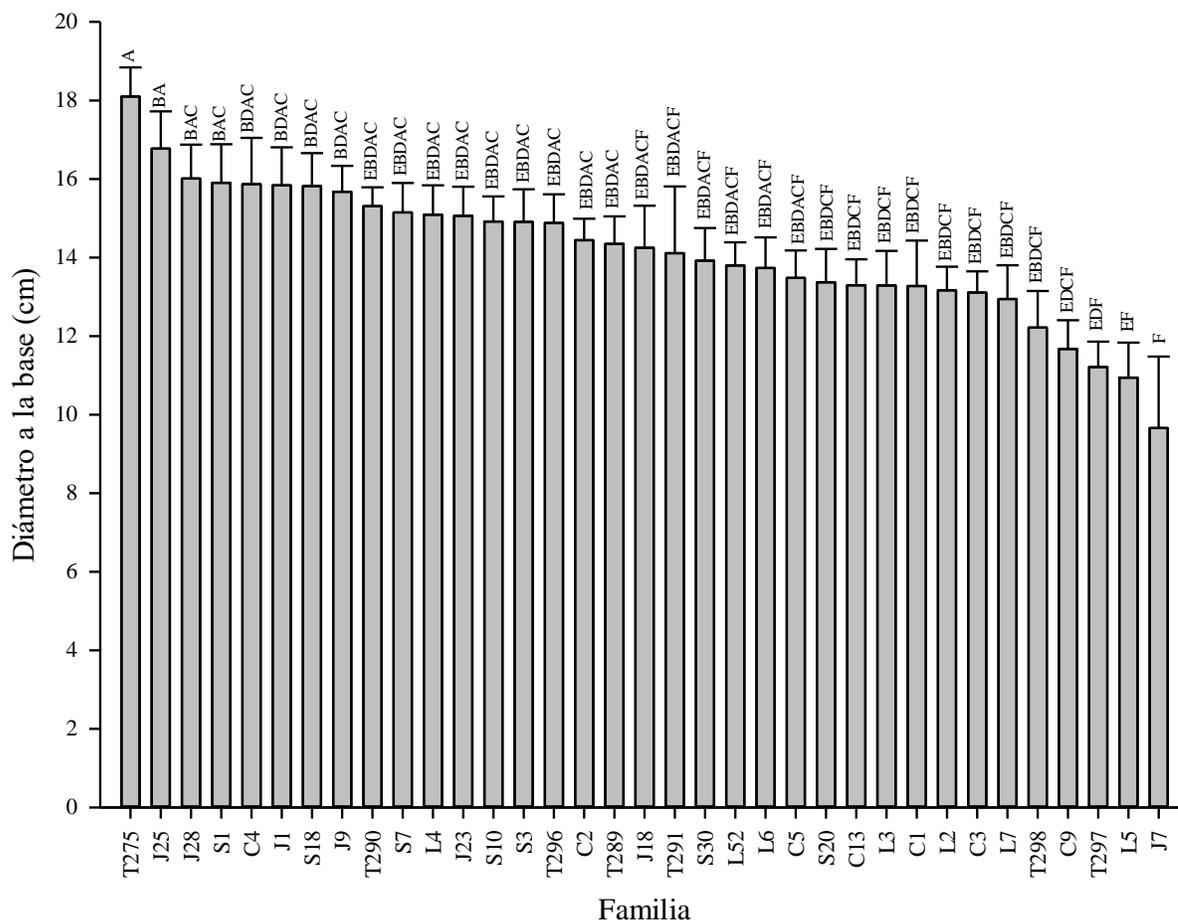


Barras con la misma letra son estadísticamente iguales de acuerdo con la prueba Tukey, $\alpha=0.05$

Figura 5. Diámetro a la base promedio por familia en 2015, a los 10 años de establecido el ensayo de progenies de *Pinus greggii* Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

Serrato (2000) registró al primer año un diámetro a la base promedio de 0.66 centímetros, para ambos ensayos. La familia 19 tuvo el mayor valor de diámetro a la base (0.79 cm) y la familia 21 tuvo el menor valor (0.40 cm) en el primer ensayo. En el segundo ensayo, el autor reportó que la familia 18 registró el mayor diámetro a la base (0.89 cm) y la familia 44 tuvo

el menor valor (0.52 cm). Serrato (2000) en una segunda evaluación a los cinco años de establecidos los ensayos, reportó un diámetro a la base promedio de 3.29 cm para el primer ensayo y un 3.35 cm para el segundo ensayo (Cuadro 3).



Barras con la misma letra son estadísticamente iguales de acuerdo con la prueba Tukey, $\alpha=0.05$.

Figura 6. Diámetro a la base promedio por familia en 2021, a los 16 años de establecido el ensayo de progenies de *Pinus greggii* Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

En el presente trabajo se registraron mayores promedios de diámetro a la base con respecto a lo reportado por Serrato (2000). En 2015, se registró un diámetro a la base promedio de 5.3 cm (Cuadro 3), donde la familia T290 registró el valor más alto (6.2 cm) y la familia J7 tuvo el menor valor de diámetro a la base (3.1 cm) (Figura 5). En 2021 en el presente estudio los árboles obtuvieron un diámetro a la base promedio de 14.2 cm. La familia T275 registró el

mayor valor de diámetro a la base (18.1 cm). Nuevamente, la familia J7 tuvo el menor valor de diámetro a la base (9.7 cm) (Figura 6).

Los valores reportados por Serrato (2000) son menores de los encontrados en 2015 y en 2021 en el presente trabajo, pese a que el espaciamiento entre árboles es mayor en el ensayo evaluado por el citado autor (3 m x 3 m) que el ensayo evaluado en este trabajo (2.5 m x 2.5 m); por lo que, seguramente, la diferencia se debe a las diferentes edades a las que fueron evaluados los ensayos (Cuadro 3). Otra posible causa de esa discrepancia, es la presencia de malezas que compiten con los árboles, ya que, por lo general, en plantaciones con mayor densidad el dosel se cierra más pronto, lo que provoca que desaparezcan las malezas o por lo menos no representan más competencia para los árboles (Prado, 1989; Guerra *et al.*, 2014).

En contraste, Godínez (2005) reporta un diámetro basal promedio de 3.46 cm a cuatro años cinco meses de plantado el ensayo. El valor promedio de diámetro a la base reportado por el citado autor es menor al registrado en 2015 (5.3 cm) por Osorio (2016) y en 2021 (14.2 cm) del presente estudio. Lo anterior se debe, seguramente, por la diferencia de edades a las que fueron evaluados los ensayos y las condiciones específicas del espaciamiento que hay entre árboles (Cuadro 3).

Los árboles que crecen bajo condiciones de alta densidad, no pueden desarrollar de una manera satisfactoria, tanto su sistema radicular como su copa, por lo que su incremento en diámetro disminuye cuando se cierran o dejan de crecer las copas (Klepac, 1983). De acuerdo con lo anterior, los árboles plantados a 2.5 m x 2.5 m en este estudio, seguramente, desarrollaron una mayor área de copa comparados con los plantados a 2 m x 2 m que reportó Godínez (2005), en consecuencia, los primeros tuvieron mejores condiciones para el crecimiento en diámetro que éstos últimos (Cuadro 3).

En contraste, Ortíz (2015) reportó un diámetro a la base promedio para la variedad *greggii* de 13.9 cm en Tlacotepec Plumas y de 12.6 cm en Magdalena Zahuatlán, con un promedio general para esa variedad de ambos ensayos de 14.1 cm de diámetro a la base a los 17 años de establecidos los ensayos. El diámetro a la base promedio reportado en 2015 (5.3 cm) (Osorio, 2016) es menor al reportado por el citado autor para la variedad *greggii*. Lo anterior se debe, principalmente, a la diferencia de 7 años en la edad a la que fue evaluado el ensayo por Ortíz (2015) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Diámetro a la base (cm) por otros autores y su comparación con la del ensayo de progenies de *Pinus greggii* Engelm. establecido en Los Lirios, Arteaga, Coah., a los 10 y 16 años de su evaluación (2015 y 2021, respectivamente).

Autor (Año)	EE (años)	Diámetro a la base (cm)	Ubicación (coordenadas LN-LW)	Altitud (msnm)	P (%) (E)	Suelo	Esp. (m)
Evaluación 2015	10	5.3	CAESA, Arteaga, Coah.	2,280	4 (C)	Rocas de origen sedimentario. Feozem calcárico y rendzina.	2.5 x 2.5
Evaluación 2021	16	14.2	(25° 24' y 100° 36')				
Serrato (2000)	5	3.3	Tarihuanes, Arteaga, Coah.	2,380	Ladera 8 a 16 (S)	Rocas de origen sedimentario. Feozem calcárico y rendzina asociada con litosol. Poco profundo.	3 x 3
Godínez (2005)	4.5	3.5	Ejido 18 de Marzo, Galeana, N.L.	2,209	19 (NE)	Rocas de origen sedimentario. Suelo es de tipo crómico y en menor cantidad rendzina. Erosión moderada.	2 x 2
Ortíz (2015)	17	13.3	Mixteca Alta de Oaxaca (Tlacotepec Plumas: 17° 52' y 97° 26' Magdalena Zahuatlán: 19° 24' y 97° 12')	2,140		Cambisol cálcico en Tlacotepec Plumas y Luvisol crómico en Magdalena Zahuatlán. Suelos muy someros y erosionados.	3 x 3

EE = edad de evaluación; LN = latitud norte; LW = longitud oeste; P = pendiente; E = exposición; Esp. = espaciamiento.

El diámetro a la base promedio en 2021, de este estudio (14.2 cm), es semejante al reportado por Ortíz (2015) (14.2 cm) para la variedad *greggii*; dicho diámetro a la base fue evaluado en los ensayos a una edad similar después de haberse establecido la plantación, ya que solo hay de diferencia un año entre evaluaciones. El espaciamiento entre árboles al que fue establecido el ensayo evaluado por Ortíz (2015) fue de 3 x 3 m, mientras que en el presente trabajo el espaciamiento entre árboles fue de 2.5 x 2.5 m (Cuadro 3).

De acuerdo con Prado (1989) el adecuado espaciamiento en las plantaciones es importante porque influye en el grado de competencia entre árboles y de éstos con las malezas; dado que puede afectar la tasa de crecimiento por el cierre del dosel o bien puede influir en el desarrollo y longevidad de las ramas. De acuerdo con anterior los árboles evaluados, en 2021 en este estudio, tienen mayor diámetro a la base promedio que el evaluado por Ortíz (2015) por tener, posiblemente, menor competencia con malezas, dado que, al tener densidades menores se retrasa el cierre del dosel, pero se prolonga la competencia con las malezas, que afectan el crecimiento en los árboles (Prado, 1989).

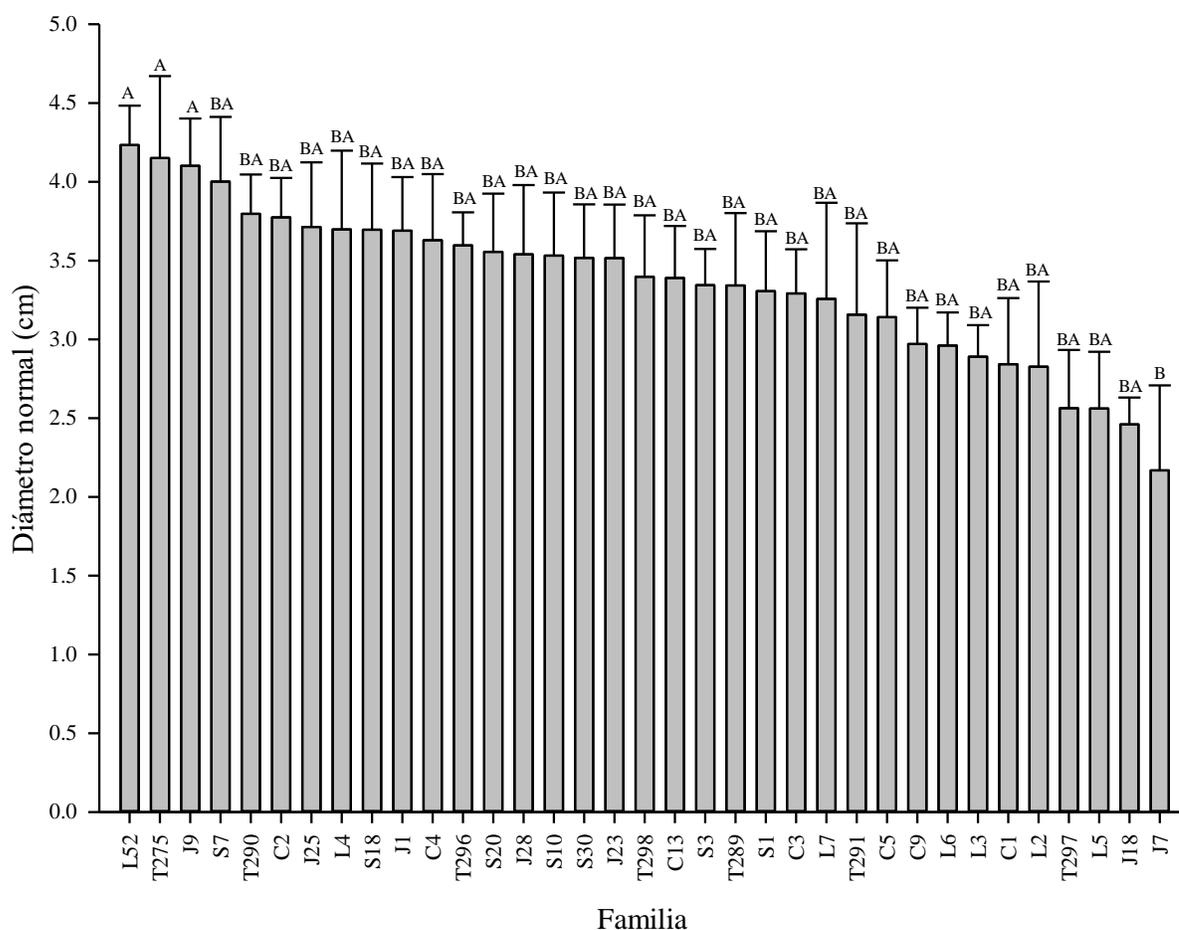
Los valores promedio en diámetro basal registrado en este estudio difieren con los valores reportados por los distintos autores, en gran parte, por la diferencia de edades a las que fueron evaluados los ensayos y al espaciamiento al que fueron establecidos los árboles en dichos ensayos, así como a su manejo de éstos (Serrato, 2000; Godínez, 2005; Ortíz, 2015) (Cuadro 3).

4.4. Diámetro normal

En 2015, a los 10 años de establecido el ensayo, el diámetro normal promedio fue de 3.4 ± 0.07 cm, con un rango promedio por familia que va de 2.2 a 4.2 cm (Figura 7); el diámetro normal, a los 16 años de establecida la prueba en 2021, aumentó a 9.3 ± 0.12 cm con un rango promedio por familia que va de 6.5 a 11.8 cm (Figura 8). El aumento en la evaluación de 2021 se debe al crecimiento natural de los árboles resultado de la interacción de procesos fisiológicos, como lo son la fotosíntesis y asimilación de nutrientes (Mendoza, 2015).

El análisis de varianza hecho para el diámetro normal en 2015 y 2021 arrojó que hubo diferencias estadísticas altamente significativas entre familias ($p = 0.0007$; $p = 0.0001$, respectivamente) (Figura 7 y 8) (Anexo 2).

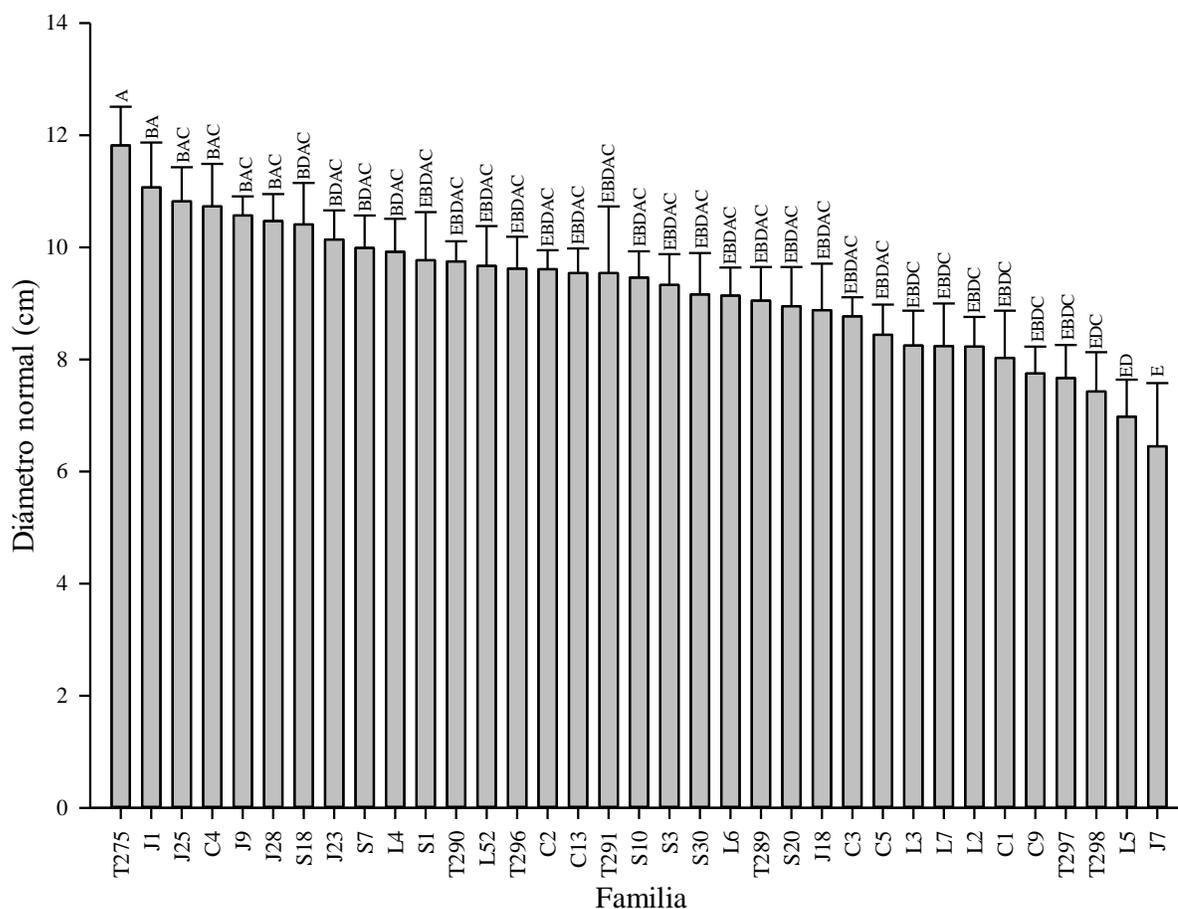
En la evaluación de 2015, las familias L52, T275 y J9 fueron estadísticamente diferentes a la familia J7 que tuvo el valor más bajo de diámetro normal a los 10 años de establecida la prueba; donde destaca la familia L52 con el mayor valor promedio de diámetro normal (4.2 cm) (Figura 7). En la evaluación a los 16 años de establecido el ensayo en 2021, las familias T275, J1, J25, C4, J9, J28, S18, J23, S7 y L4 fueron estadísticamente diferentes a la familia J7 que tuvo el valor más bajo de diámetro normal a los 16 años de establecida la prueba; donde destaca la familia T275 con el mayor valor promedio de diámetro normal (11.8 cm) (Figura 8).



Barras con la misma letra son estadísticamente iguales de acuerdo con la prueba Tukey, $\alpha=0.05$.

Figura 7. Diámetro normal promedio por familia en 2015, a los 10 años de establecido el ensayo de progenies de *Pinus greggii* Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

Vela (2002) reporta un diámetro normal promedio de 8.5 cm. El valor promedio de diámetro normal reportado por el autor citado es mayor al registrado en la evaluación en 2015 (3.4 cm) (Osorio, 2016), pese a que los ensayos se evaluaron a edades similares después de haberse establecido, el espaciamiento que hay entre árboles es igual (2.5 m) y las condiciones ambientales y edafológicas son las mismas. En 2021 del presente estudio se registró un mayor diámetro normal promedio (9.3 cm) que el reportado por Vela (2002) (8.5 cm); seguramente, esa diferencia se deba a la diferencia de edades a las que fueron evaluados los ensayos. Una forma de controlar el crecimiento en diámetro es mediante los aclareos, ya que esta actividad puede estimular el crecimiento en diámetro (Musálem, 2006) (Cuadro 4).



Barras con la misma letra son estadísticamente iguales de acuerdo con la prueba Tukey, $\alpha=0.05$.

Figura 8. Diámetro normal promedio por familia en 2021, a los 16 años de establecido el ensayo de progenies de *Pinus greggii* Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coahuila.

Por otro lado, Rodríguez *et al.* (2013) registraron un diámetro normal promedio de 8.5 cm, el cual es mayor al registrado en 2015 (3.4 cm) por Osorio (2016). Cabe señalar que los citados autores realizaron su evaluación a la misma edad de plantación que la evaluación en 2015 (Osorio, 2016), a los 10 años aproximadamente (Cuadro 4). Lo anterior se debe, seguramente, al mayor espaciamiento que hay entre árboles por la extracción de árboles de toda la plantación evaluada, de acuerdo con lo mencionado por Rodríguez *et al.* (2013), por lo tanto, esto ocasionó que los árboles de dicho ensayo tuvieran menor competencia por el área para desarrollar el crecimiento de tal manera que les permitió desarrollar mayores diámetros, dado que la competencia por el espacio influye directamente en el crecimiento del diámetro (Guadalupe *et al.*, 2018).

Cuadro 4. Diámetro normal (cm) por otros autores y su comparación con la del ensayo de progenies de *Pinus greggii* Engelm. establecido en Los Lirios, Arteaga, Coah., a los 10 y 16 años de su evaluación (2015 y 2021, respectivamente).

Autor (Año)	EE (años)	dn (m)	Ubicación (coordenadas LN-LW)	Altitud (msnm)	P (%) (E)	Suelo	Esp. (m)
Evaluación 2015	10	3.4	CAESA, Arteaga, Coah. (25° 24' y 100° 36')	2,280	4 (C)	Rocas de origen sedimentario. Feozem calcárico y rendzina.	2.5 x 2.5
Evaluación 2021 Vela (2002)	16	9.3					
Ortíz (2015)	9.8	8.5	Mixteca Alta de Oaxaca (Tlacotepec Plumas: 17° 52' y 97° 26' Magdalena Zahuatlán: 19° 24' y 97° 12')	2,260		Cambisol cálcico en Tlacotepec Plumas y Luvisol crómico en Magdalena Zahuatlán. Suelos muy someros y erosionados.	3 x 3
Rodríguez <i>et al.</i> (2013)	17	10.1	Cerro el Potosí, Ejido 18 de Marzo, Galeana, N.L. (24° 53' y 100° 12')	2,140	19 (NE)	Debido al uso agrícola anterior, el suelo presenta un nivel de erosión moderado.	2 x 2

EE = edad de evaluación; db = diámetro normal; LN = latitud norte; LW = longitud oeste; P = pendiente; E = exposición; Esp. = espaciamiento.

En 2021 del presente estudio se encontró un diámetro normal promedio de 9.3 cm, el cual es mayor al reportado por Rodríguez *et al.* (2013) (8.5 cm), aunque, seguramente, eso es consecuencia de la diferencia de edades a las que fueron evaluados los ensayos, ya que la evaluación en 2021 se hizo con 6 años más de edad de haberse establecido la plantación que la evaluación de los mencionados autores (Cuadro 4).

En contraste, Ortíz (2015) registró un diámetro normal promedio para la variedad *greggii* de 10.7 cm en Tlacotepec Plumas y de 9.5 cm en Magdalena Zahuatlán, con un promedio general para esa variedad de ambas pruebas de 10.9 cm de diámetro normal a los 17 años de establecidos los ensayos. El diámetro normal promedio reportado en 2015 (3.4 cm) (Osorio, 2016) es menor a la reportada por el citado autor para la variedad *greggii*, dado a la diferencia de 7 años en la edad a la que fue evaluado el ensayo por el citado autor (Cuadro 4).

El espaciamiento entre árboles al que fue establecido el ensayo evaluado por Ortíz (2015) fue de 3 m x 3 m, mientras que en el presente trabajo el esparcimiento entre árboles fue de 2.5 m x 2.5 m (Cuadro 4). Dicho espaciamiento, es quizá en gran parte el motivo por el cual hay diferencia en el valor de diámetro normal entre lo reportado por Ortíz (2015) y Osorio (2016). Dado que existe una relación directa entre el espaciamiento y el crecimiento en diámetro, por lo tanto, a menor densidad mayor es el diámetro (Prado, 1989); la relación anterior también depende en gran parte de la edad del árbol, la especie de que se trate y la calidad de sitio (Klepac, 1983).

El diámetro normal promedio en 2021 de este estudio (9.3 cm) es semejante al reportado por Ortíz (2015) (10.9 cm) para la variedad *greggii*; dicho diámetro normal, fue evaluado en los ensayos a una edad similar después de haberse establecido la plantación.

4.5. Heredabilidad

En el 2015, a los 10 años de establecido el ensayo, el valor de la heredabilidad en sentido estricto individual (h^2_i) estimada para la variable altura total, diámetro a la base y diámetro normal fueron de 0.37, 0.55, 0.35 respectivamente; dicha heredabilidad, a los 16 años de establecida la prueba en 2021, fue de 0.26 para altura total, 0.61 para diámetro a la base y 0.49 para el diámetro normal (Cuadro 5). A pesar de que no se evaluaron los mismos bloques y que se trata del mismo ensayo, en la variable altura total se observa una disminución en los

valores de heredabilidad a nivel individual conforme aumentó la edad de las plantas, sin embargo, para el caso de la variable diámetro a la base y diámetro normal hubo un aumento en los valores de heredabilidad individual, lo cual concuerda con lo reportado por López *et al.* (2000); aunque los valores más altos corresponde a las familias.

La heredabilidad a nivel de familias (h^2f) en 2015, a los 10 años de establecido el ensayo, para las variables altura total, diámetro a la base y diámetro normal fue de 0.60, 0.71 y 0.59, respectivamente; mientras que en 2021 a los 16 años de establecida la prueba fue de 0.51, 0.74 y 0.68, en ese mismo orden (Cuadro 5). Dichos valores de heredabilidad a nivel familia son superiores a los valores de heredabilidad individual, lo que concuerda con lo mencionado por Zobel y Talbert (1988) quienes mencionan que la heredabilidad individual suele ser menor a la heredabilidad a nivel familia, puesto que esta última está basada en promedios estimados con una muestra de muchas progenies, por lo que los efectos de los factores ambientales dentro de la prueba son promedios fuera de la media de la familia.

Cuadro 5. Componentes de varianza en porcentaje para las características de crecimiento en un ensayo de progenies de *Pinus greggii* Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coah., a los 10 y 16 años de establecido (2015 y 2021).

Variable	AE	σ^2p	σ^2f	σ^2A	σ^2pf	h^2i	h^2f
Altura total	2015	0.6165	0.0752	0.2255	0.1244	0.37	0.60
	2021	138.2129	11.9961	35.9883	23.4703	0.26	0.51
Diámetro a la base	2015	0.1707	0.0312	0.0936	0.0439	0.55	0.71
	2021	12.2956	2.4911	7.4732	3.3824	0.61	0.74
Diámetro Normal	2015	1.8784	0.2196	0.6589	0.3704	0.35	0.59
	2021	6.4930	1.0567	3.1702	1.5510	0.49	0.68

AE = año de evaluación; σ^2p = varianza fenotípica; σ^2f = varianza entre familias; σ^2A = varianza aditiva; σ^2pf = varianza fenotípica por varianza de las familias; h^2i = heredabilidad individual; h^2f = heredabilidad de las familia; ht^2 = altura total al cuadrado; \sqrt{db} = raíz cuadrada del diámetro a la base.

El diámetro a la base mostró tener un mayor control genético individual que la altura total y el diámetro normal en ambas evaluaciones; dicho diámetro a la base, también para la heredabilidad a nivel familia presentó los mayores valores de heredabilidad (Cuadro 5).

Azamar *et al.* (2000) en una evaluación de un ensayo de procedencias/progenies de *Pinus greggii*, con 54 familias, establecido en los terrenos del Conjunto CODAGEM en Metepec, México, reportaron valores de heredabilidad en sentido estricto a nivel individual (h^2_i) de 0.25 para la variable altura total y de 0.28 para el diámetro normal, a los 8 años de establecida la prueba; en la heredabilidad a nivel familia (h^2_f) los citados autores reportaron valores para la variable altura total y el diámetro normal de 0.40 y 0.44, respectivamente.

La heredabilidad individual y a nivel familia en la evaluación en 2015 (Osorio, 2016) y en 2021, en el presente estudio, es mayor al reportado por Azamar *et al.* (2000) para la variable altura total y diámetro normal. Los autores recomiendan tener un mayor número de árboles por familia y repeticiones para aumentar la heredabilidad a nivel familia (h^2_f), dado que el valor de dicha heredabilidad es bajo debido al bajo número de árboles por parcela.

En una plantación de *Pinus greggii* establecida en Patoltecoya, Pue., con 5 familias, López *et al.* (1999) reportaron valores de heredabilidad en sentido estricto a nivel individual (h^2_i) de 0.44 para la variable altura total y de 0.35 para el diámetro a la base, a los 33 meses de establecida la prueba; en la heredabilidad a nivel familia (h^2_f) los citados autores reportaron valores para la variable altura total y el diámetro normal de 0.63 y 0.60, respectivamente. En dicha plantación se incluyeron procedencias y familias de las plantadas en el presente estudio (Puerto Conejo, Los Lirios, Jamé y Santa Anita).

La heredabilidad individual en la evaluación en 2015 (Osorio, 2016) y en 2021, en el presente estudio, para la variable diámetro a la base es mayor al reportado por López *et al.* (1999), pero similar al valor de heredabilidad en la variable altura total (Cuadro 5).

Por otro lado, en un experimento donde se evaluó plántulas de *Pinus greggii* en un invernadero del Colegio de Postgraduados en Montecillo, Edo. de México, López *et al.* (2000) registraron una heredabilidad individual (h^2_i) de 0.65 y 0.78 de heredabilidad a nivel familia (h^2_f) para la variable altura, a los 16 meses de establecido el experimento. Los valores reportados por los autores citados son mayores a los reportados en este trabajo en 2015 y

2021 (h^2_i : 0.37 y 0.26, respectivamente) para la variable altura total. Lo anterior se debe, principalmente, a que las estimaciones de heredabilidad obtenidas en el invernadero son por lo general mayores porque la variación ambiental se reduce en comparación con la variación ambiental en campo, aun cuando se trate de la misma especie, de la misma población y de las mismas variables (Zobel y Talbert, 1988).

En una evaluación dos ensayos de progenies de *Pinus greggii*, uno de primera generación y el otro en una segunda generación, en Morelia, Mich., López (2010) reporta para la primera generación valores muy bajos de heredabilidad, con el valor más bajo para el diámetro normal, tanto a nivel individual ($h^2_i = 0.16$) como de medias de familias ($h^2_f = 0.33$) y el más alto que reporta es para la variable altura total ($h^2_i = 0.17$; $h^2_f = 0.35$), a los seis años de establecidos los ensayos; sin embargo, a los 17 años de establecida la prueba encontró que los valores para ambas fueron prácticamente cero.

Para la segunda generación a los 4 años de establecida el ensayo, López (2010) reporta valores bajos de heredabilidad, con el valor más bajo para el diámetro normal, tanto a nivel individual ($h^2_i = 0.15$) como de medias de familias ($h^2_f = 0.29$) y el más alto que reporta es para la variable altura total ($h^2_i = 0.17$; $h^2_f = 0.31$). Los valores de mayor control genético reportados por López (2010) para ambos ensayos para la variable altura total son más bajos que los reportados en este estudio.

Los valores bajos de control genético reportados por López *et al.* (1999) y López (2010) probablemente se deban a la varianza del ambiente, dado que éste es un factor que puede ser limitante para el crecimiento de los árboles, ya que el fenotipo es igual a la sumatoria del genotipo con el ambiente más la interacción genotipo-ambiente (Zobel y Talbert, 1988), de tal manera que, cuando el efecto ambiental es muy fuerte, el efecto genético se ve limitado en su expresión.

5. CONCLUSIONES

Se encontraron diferencias significativas a nivel de familias en ambas evaluaciones (2015 y 2021) para las variables sobrevivencia, altura total, diámetro a la base y diámetro normal, excepto para la sobrevivencia en 2015 a los 10 años de establecido el ensayo.

El porcentaje de sobrevivencia disminuyó de 84 % en 2015 a 72 % en 2021 como consecuencia de la mortalidad por sequía y por cortas de saneamiento.

Las familias T275, J25 y S7, en general, fueron las que obtuvieron valores altos en todas las variables evaluadas. La familia J7 fue la que registró los menores valores en todas las variables evaluadas en 2015 y 2021. Esta misma familia, también tuvo la menor sobrevivencia (41.5 %) a los 16 años de establecida la prueba.

El valor mayor de heredabilidad individual y a nivel familia lo presentó la variable diámetro a la base, seguido de la variable altura total y el diámetro normal que presentó el menor valor de control genético en ambas evaluaciones.

6. RECOMENDACIONES

Realizar a corto plazo evaluaciones de otras variables de interés económico y ecológico como son: el volumen, la densidad de la madera, la longitud de traqueidas, las propiedades del cono, la rectitud del fuste, resistencia a plagas y enfermedades, entre otros; para identificar los caracteres con mayor tasa de heredabilidad, con la finalidad de seleccionar material para obtener mayores ganancias genéticas con características con valor económico y ecológico.

Realizar trabajos de manejo de la plantación como son: podas, control de maleza, fertilización y aclareos genéticos, además de evaluar los efectos de estos trabajos en el desarrollo y crecimiento de los árboles plantados.

Realizar el aclareo genético para convertir el ensayo en un huerto semillero sexual; dicho aclareo, se deberá fundamentar con información obtenida en los estudios realizados sobre el ensayo, como lo es el presente trabajo.

Establecer más ensayos con un mayor número de procedencias y progenies en diferentes lugares, para identificar diferencias y seleccionar la mejor progenie para cada lugar.

Establecer ensayos de procedencias y progenies cerca de las áreas donde se pretenda realizar plantaciones de cualquier tipo.

Realizar estudios para detectar los efectos de la calidad de sitio y la densidad de plantación sobre el crecimiento y desarrollo de los árboles establecidos en el ensayo o en posteriores pruebas genéticas.

Continuar monitoreando la presencia del cranco resinoso en el ensayo y en su caso establecer los mecanismos de su control.

7. LITERATURA CITADA

- Alba-Landa J., H. Cruz-Jiménez, J. E. Mundo-Zamora y E. Ramírez-García (2009).** Diseño y establecimiento de una prueba de procedencias/progenie de *Pinus greggii* Engelm. *Foresta Veracruzana* 11:39-42.
- Alía R., D. Agúndez, N. Alba, S.C. González-Martínez y A. Soto (2003).** Variabilidad genética y gestión forestal. *Ecosistemas* XII: 1-7.
- Amaral W. y A. Yanchuk (2007).** Métodos integrados para la conservación ex situ y el uso de la diversidad genética forestal. *In: Conservación y Manejo de Recursos Genéticos Forestales. Vol. 3: en Plantaciones y Bancos de Germoplasma (ex situ).* FAO, FLD, Bioversity International (comps.). Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos. Roma, Italia. pp: 1-2.
- Ávila-Akerberg A., E. Aranda-Cardoso y K. Hernández-González (2016).** La gobernanza forestal y los objetivos de biodiversidad, cambio climático y desarrollo sustentable en México. CDB-Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica. México. 82 p.
- Azamar-Oviedo M., J. López-Upton, J. J. Vargas-Hernández y A. Plancarte-Barrera (2000).** Evaluación de un ensayo de procedencias-progenies de *Pinus greggii* y su conversión a huerto semillero. 1er Congreso Nacional de Reforestación. Montecillo, México. 9 p.
- Balcorta-Martínez, H. C. y J. J. Vargas-Hernández (2004).** Variación fenotípica y selección de árboles en una plantación de melina (*Gmelina arborea* Linn., Roxb.) de tres años de edad. *Revista Chapingo, serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 10: 13-19.
- Barbadilla A. (1999).** La selección natural: "Me replico, luego existo". *Boletín Sociedad Entomológica Aragonesa* 26: 605-612.

- Centeno-Solórzano M. (1993).** Inventario nacional de plantaciones forestales en Nicaragua. [Tesis de Ingeniería, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio Institucional – Universidad Nacional Agraria. Managua, Nicaragua. 79 p.
- Cerano-Paredes J., J. Villanueva-Díaz, R. D. Valdez-Cepeda, E. H. Cornejo-Oviedo, I. Sánchez-Cohen y V. Constante-García (2011).** Variabilidad histórica de la precipitación reconstruida con anillos de árboles para el sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3: 32-46.
- CETENAL, Comisión de Estudio del Territorio Nacional (1976).** Carta geológica. San Antonio de las Alazanas G14C35, escala 1:50 000. Formato Digital. Secretaria de Programación y Presupuesto. D.F., México.
- CETENAL, Comisión de Estudio del Territorio Nacional (1977).** Carta edafológica. San Antonio de las Alazanas G14C35, escala 1:50 000. Formato Digital. Secretaria de Programación y Presupuesto. D.F., México.
- Clark J. S. (2010).** Individuals and the variation needed for high species diversity in forest trees. *Science* 327: 1129-1132.
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2001).** Climas. Catálogo de metadatos geográficos. Escala 1:1 000 000. Formato Digital (Tipo Shape file). México.
- Constante-García V., J. Villanueva-Díaz, J. Cerano-Paredes, E. H. Cornejo-Oviedo y S. Valencia-Manzo (2009).** Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 34: 17-39.
- Corea E. A. (1994).** Capítulo 4: Interacción genotipo-ambiente. *In: Manual sobre mejoramiento genético forestal con referencia especial a América Central.* J. P. Cornelius, J. F. Mesén y E. A. Correa (eds.). CATIE. pp: 45-60.
- CORFO, Corporación de Fomento de la Producción (2011).** Análisis de ensayos de progenie de *Eucalyptus cladocalyx* y clonales de *Eucalyptus camaldulensis*. Análisis de la Red Experimental Establecida por INFOR. 27 p.

- Cornelius J. P. (1994).** Capítulo 6: Selección, heredabilidad y ganancia genética. *In: Manual sobre mejoramiento genético forestal con referencia especial a América Central.* J. P. Cornelius, J. F. Mesén y E. A. Correa (eds.). CATIE. pp: 79-89.
- Cubero J. I. (1999).** Introducción a la mejora genética vegetal. Mundi-Presa. España. 365 p.
- Curiel-Ávila M. (2005).** Descripción de 11 poblaciones naturales de *Pinus greggii* Engelm. var. *greggii* en el sureste de Coahuila. [Tesis de Ingeniería, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. Repositorio Institucional – Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 55 p.
- Daniel T. W., J. A. Helms y F. S. Baker (1982).** Principios de silvicultura. 2da. edición. Trad. por R. Elizondo M., McGraw-Hill. México. 492 p.
- Darrow W. K. y H. Coetzee (1983).** Potentially valuable mexican pines for the summer rainfall region of Southern Africa. *South African Forestry Journal* 124: 23-35.
- De León-Torres A. K. (2020).** *Fusarium verticillioides* asociado al cancro resinoso de *Pinus greggii* en Los Lirios, Arteaga, Coahuila. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. Repositorio Institucional – Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 44 p.
- Delgado-Iniesta J. A. (2019).** Capítulo 19: Evolución, variación genética, especiación y filogenia. *In: Psicobiología I: bases genéticas y evolutivas de la conducta.* D. Redolar-Ripoll (ed.). Médica Panamericana, España. pp: 549-577.
- DETENAL, Dirección General de Estudios del Territorio Nacional (1979).** Carta uso de suelo y vegetación. San Antonio de las Alazanas G14C35, escala 1:50 000. Formato Digital. Coordinación General del Sistema Nacional de Información. Secretaria de Programación y Presupuesto. D.F., México.
- Domínguez-Calleros P. A., R. Rodríguez-Laguna, J. Capulín-Grande, R. Razo-Zárate y M. A. Díaz-Vásquez (2017).** Influencia de factores edáficos en el crecimiento de una plantación de *Pinus greggii* Engelm. en Santiago de Anaya, Hidalgo, México. *Madera y Bosques* 23: 145-154.

- Donahue J. K. y J. López-Upton (1999).** A new variety of *Pinus greggii* (Pinaceae) in México. *Sida* 18: 1083-1093.
- Dvorak W. S. (2012).** The strategic importance of applied tree conservation programs to the forest industry in South Africa. *South African Forestry Journal* 74: 1-6.
- Dvorak W. S., J. E. Kietzka y J. K. Donahue (1996).** Three-year survival and growth of provenances of *Pinus greggii* in the tropics and subtropics. *Forest Ecology and Management* 83: 123-131.
- Eriksson G., I. Ekberg y D. Clapham (2020).** Genetics applied to forestry: An introduction. 4ta edición. Department of Plant Biology SLU. Uppsala, Sweden. 228 p.
- Farjon A., J. A. Pérez-De La Rosa y B. T. Styles (1997).** Guía de campo de los pinos de México y América Central. The Board of Trustees of the Royal Botanic Gardens, Kew, Oxford Forestry Institute. 126 p.
- Fielding J. M. (1960).** *Pinus patula* x *greggii*. *Australian Forestry* 24: 99-102.
- Flores-López C., J. López-Upton y S. Valencia-Manzo (2014).** Manual técnico para el establecimiento de ensayos de procedencias y/o progenies. Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Zapopan, México. 152 p.
- Flores-Velázquez R., E. Serrano-Gálvez, V.H. Palacio-Muñoz y G. Chapela (2007).** Análisis de la industria de la madera aserrada en México. *Madera y Bosques* 13: 47-59.
- Fornes L. (2005).** Mejoramiento genético de especies con fines industriales. *IDIA XXI* 8: 123-128.
- Franco-Ávila R. C., E. H. Cornejo-Oviedo, S. Valencia-Manzo y J. A. Villareal-Quintanilla (2003).** Asociación del índice de sitio de *Pinus montezumae* Lamb. con variables ambientales y vegetación en Cd. Hidalgo, Michoacán. *Recursos Forestales – Agrofaz* 3: 289-297.
- Frankham R. (1996).** Relationship of genetic variation to population size in wildlife. *Conservation Biology* 10: 1500-1508.

- Fuentes A. (2016).** La evolución es importante, pero podría no ser lo que pensamos. *Cuicuilco* 23: 271-292.
- García-Amaro E. (2004).** Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Instituto de Geografía-UNAM. 5ta. edición. Serie Libros. México. 90 p.
- García-Velasco J. T. (2017).** Supervivencia y crecimiento en una plantación de *Pinus greggii* Engelm. establecida con retenedores de humedad en Saltillo, Coahuila, México. [Tesis de Ingeniería, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. Repositorio Institucional – Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 40 p.
- Genes P. Y. (2017).** Parámetros genéticos de propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm. [Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Exactas Químicas y Naturales y Facultad de Ciencias Forestales-Universidad Nacional de Misiones]. Repositorio Institucional – Universidad Nacional de Misiones. Posadas, Misiones, Argentina. 104 p.
- Godínez-Rojo J. (2005).** Procedencias y progenies de *Pinus greggii* Engelm., en el Ejido 18 de Marzo, Galeana, N. L. [Tesis de Ingeniería, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. Repositorio Institucional – Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 36 p.
- Guadalupe-Colín J., O. A. Aguirre-Calderón, J. J. Corral-Rivas, E. Viveros-Guerrero, S. Corral-Rivas y F. Crecente-Campo (2018).** Influencia de la competencia en el crecimiento diamétrico de *Pinus durangensis* Martínez en Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9: 94-121.
- Guerra-Bugueño E, F. Célis-Mosqueira y N. Moreno-García (2014).** Efecto de la densidad de plantación en la rentabilidad de plantaciones de *Eucalyptus globulus*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 20: 21-31.
- Gutiérrez-Valencia M., L. C. Mendizábal-Hernández, J. Alba-Landa, J. Márquez-Ramírez y H. Cruz-Jiménez (2012).** Evaluación de una prueba de

procedencias/progenie de *Pinus greggii* Engelm. establecida en Villa Aldama, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana* 14:25-30.

Herrera-Paz E.F. (2013). La genética de poblaciones y el origen de la diversidad humana. *Revista Médica Hondureña* 81: 40-45.

Hodge G. R. y W. S. Dvorak (2012). Growth potential and genetic parameters of four Mesoamerican pines planted in the Southern Hemisphere. *Southern Forests: a Journal of Forest Science* 74: 27-49.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2000). Carta topográfica. San Antonio de las Alazanas G14C35, escala 1:50 000, serie II. Formato Digital. Aguascalientes, México.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2001). Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional, Sistema topofomas, escala 1:1 000 000, serie I. Formato Digital (Tipo Shapefile). Aguascalientes, México.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010). Red hidrográfica. Subcuenca hidrográfica (RH24Be) R. San Miguel. Cuenca R. Bravo - San Juan. RH Bravo Conchos. Escala 1:50 000. Edición 2.0. Formato Digital (Tipo Shapefile). Aguascalientes, México.

Ipinza-Carmona R. (1998). Ciclo de mejoramiento genético. *In: Curso mejora genética forestal operativa.* R. Ipinza-Carmona, B. Gutiérrez-Caro y V. Emhart-Schmidt (eds.). INFOR-Instituto Forestal. Valdivia, Chile. pp: 49-67

Kanashiro M., I. S. Thompson, J. A. G. Yared, M. D. Loveless, P. Coventry, R.C.V. Martins-da-Silva, B. Degen y W. Amaral (2002). Valores de la conservación y gestión forestal: el Proyecto Dendrogene en la Amazonia brasileña. *In: Diversidad biológica forestal.* Unasyuva 209. FAO (comp.). *Revista internacional de silvicultura e industrias forestales* 53. pp: 25-33.

Klepac D. (1983). Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. 2da. edición. Universidad Autónoma Chapingo. México. 279 p.

- Lambeth C. C. (1994).** Capítulo 9: Ensayos de descendencias. *In: Manual sobre mejoramiento genético forestal con referencia especial a América Central.* J. P. Cornelius, J. F. Mesén y E. A. Correa (eds.). CATIE. pp: 129-146.
- Lessa E. (2004).** Guía de estudio de genética de poblaciones. Laboratorio de Evolución, Facultad de Ciencias, Montevideo, Uruguay. 75 p.
- Lewontin R. C. (1970).** The units of selection. *Annual Review of Ecology and Systematics* 1: 1-18.
- Lewontin R. C. (1974).** The genetics basis of evolutionary change. Columbia University Press. United States of America. 337 p.
- Loo-Dinkins J. (1992).** Chapter 4: Field test design. In: Handbook of quantitative forest genetics. *Kluwer Academic Publishers* 39: 96- 139.
- López-Ayala J. L., J. J. Vargas-Hernández, C. Ramírez-Herrera y J. López-Upton (1999).** Variación intraespecífica en el patrón de crecimiento del brote terminal en *Pinus greggii* Engelm. *Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 5: 133-140.
- López-Nava J. (2010).** Evaluación y análisis retrospectivo de dos ensayos de progenies de *Pinus greggii* Engelm. de primera y segunda generación en Morelia, Michoacán. [Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera- Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. Repositorio Institucional – Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. 48 p.
- López-Upton J. y A. Muñoz-Orozco (1991).** Selección familiar por tolerancia a sequía en *Pinus greggii* Engelm. I. Evaluación en plántula. *Agrociencia serie Fitociencia* 2: 111-123.
- López-Upton J. y J. K. Donahue (1995).** Seed production of *Pinus greggii* Engelm. in natural stands in Mexico. *Tree Planters' Notes* 46: 86-92.
- López-Upton J. y S. Escobar-Alonso (2021).** *Pinus greggii* Engelmann ex Parlatore (Pinaceae). *In: Semillas de especies forestales.* D. A. Rodríguez-Trejo (coord.).

División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de México. pp: 250-255.

López-Upton J., A. J. Mendoza-Herrera, J. Jasso-Mata, J. J. Vargas-Hernández y A. Gómez-Guerrero (2000). Variación morfológica de plántulas e influencia del pH del agua de riego en doce poblaciones de *Pinus greggii* Engelm. *Madera y Bosques* 6: 81-94.

López-Upton J., C. Ramírez-Herrera, J. Jasso-Mata, M. Jiménez-Casas, M. Aguilera-Rodríguez, J.R. Sánchez-Velázquez y D.A. Rodríguez-Trejo (2011). Situación de los Recursos Genéticos Forestales en México. Informe Final del proyecto TCP/MEX/3301/MEX (4). FAO-Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, CONAFOR-Comisión Nacional forestal. México. 75 p.

Marone L., F. Milesi, R. González, E. T. Mezquida, J. López y V. Cueto (2002). La teoría de evolución por selección natural como premisa de la investigación ecológica. *Interciencia* 27: 137-142.

Martínez-Cantera G. (1999). Estado del conocimiento de *Pinus greggii* Engelm. [Investigación Bibliográfica, Universidad Autónoma Chapingo]. Repositorio Institucional – Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Edo. de Méx., México. 523 p.

Martínez-Sifuentes A. R., J. Villanueva-Díaz, U. Manzanilla-Quñones, J. L. Becerra-López, J. A. Hernández-Herrera, J. Estrada-Ávalos y A. H. Velázquez-Pérez (2020). Spatial modeling of the ecological niche of *Pinus greggii* Engelm. (Pinaceae): a species conservation proposal in Mexico under climatic change scenarios. *iForest* 13: 426-434.

Mendoza-Hernández M. (2015). Incremento diamétrico de cinco especies arbóreas con potencial maderable del bosque mesófilo de montaña en el centro de Veracruz. [Tesis de Maestría, Instituto de Investigaciones Forestales-Universidad Veracruzana]. Repositorio Institucional – Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz, México. 73 p.

- Mery F. (2013).** Natural variation in learning and memory. *Current Opinion in Neurobiology* 23: 52-56.
- Mesén J. F. (1994a).** La variación natural como base para el mejoramiento genético forestal. *In: Curso nacional sobre selección, clasificación y manejo de fuentes semilleras.* J. F. Mesén, M. L. Jiménez y A. L. Guevara (coords.). CATIE/DANIDA. San Carlos, Costa Rica. pp: 1-9.
- Mesén J. F. (1994b).** Introducción al mejoramiento genético forestal. *In: Curso nacional sobre selección, clasificación y manejo de fuentes semilleras.* J. F. Mesén, M. L. Jiménez y A. L. Guevara (coords.). CATIE /DANIDA. San Carlos, Costa Rica. pp: 10-25.
- Mesén J. F. (1994c).** Capítulo 3: Ensayos de procedencias en especies forestales: establecimiento, manejo, evaluación y análisis. *In: Manual sobre mejoramiento genético forestal con referencia especial a América Central.* J. P. Cornelius, J. F. Mesén y E. A. Correa (eds.). CATIE. pp: 25-43.
- Morales-González E., J. López-Upton, J. J. Vargas-Hernández, C. Ramírez-Herrera y A. Gil-Muñoz (2013).** Parámetros genéticos de *Pinus patula* en un ensayo de progenies establecido en dos altitudes. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36: 155-162.
- Muñoz-Flores H. J., O. Hernández-Zaragoza, P. Hernández-Zaragoza, J. J. García-Magaña y R. Barrera-Ramírez (2015).** Comparación del crecimiento de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, *Pinus greggii* Engelm. y *Pinus patula* Schl. et Cham. en plantaciones comerciales establecidas en Hueyapan, Puebla. *Foresta Veracruzana* 17:1-8.
- Muñoz-Flores H.J., V.M. Coria-Avalos, J.J. García-Sánchez, E. Velasco-Bautista y G. Martínez-Molina (2012).** Evaluación de una plantación de *Pinus greggii* Engelm. con dos espaciamientos. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3: 57-70.
- Murillo-Gamboa O. (1994).** Capítulo 12: Estrategias de mejoramiento genético forestal. *In: Manual sobre mejoramiento genético forestal con referencia especial a América Central.* J. P. Cornelius, J. F. Mesén y E. A. Correa (eds.). CATIE. pp: 187-199.

- Musálem M. A. (2006).** Silvicultura de plantaciones forestales comerciales. Universidad Autónoma Chapingo. México. 213 p.
- Namkoong G. (1979).** Introduction to quantitative genetics in forestry. Technical Bulletin No. 1588. Forest Service, United States Department of Agriculture. Washington, D. C., EE.UU. 342 p.
- Noguera-Solano R. y V. R. Hernández-Marroquín (2009).** Variación: el universo infinito de las entidades biológicas. *Revista Digital Universitaria* 10: 1067-6079.
- Noss R. F. (1990).** Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach. *Conservation Biology* 4: 355-364.
- Ortíz-Mendoza R. (2015).** Análisis del crecimiento de *Pinus oaxacana* y *Pinus greggii* en ambientes degradados de la mixteca oaxaqueña. [Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Forestales-Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio Institucional – Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, Nuevo León, México. 77 p.
- Osorio-De la Cruz F. (2016).** Crecimiento y estructura de copa en un ensayo de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. en Arteaga, Coahuila. [Tesis de Ingeniería, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. Repositorio Institucional – Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 45 p.
- OTA, Office of Technology Assessment (1987).** Technologies to maintain biological diversity. United States Government Printing Office. Washington, D.C., EE.UU. 334 p.
- Pandey G. C. (1982).** Tropical pines in India-an overview. *Indian Forester* 108: 1-28.
- Petino-Zappala M. A. (2017).** Estudio de la variabilidad genética y fenotípica de caracteres adaptativos en poblaciones naturales de *Drosophila melanogaster*. [Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires]. Repositorio Institucional – Universidad de Buenos Aires. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. 349 p.

- Piñero D., J. Caballero-Mellado, D. Cabrera-Toledo, C. Elena-Canteros, A. Casas, A. Castañeda-Sortibrán, A. Castillo, R. Cerritos, O. Chassin-Noria, P. Colunga-García, P. Delgado, P. Diaz-Jaimes, L. E. Eguiarte, A. E. Escalante, B. Espinoza, A. Fleury, G. Fragoso, J. González-Astorga, V. Islas-Villanueva,... D. Zizumbo-Villareal (2008).** La diversidad genética como instrumento para la conservación y el aprovechamiento de la biodiversidad: estudios en especies mexicanas. *Capital natural de México* I: 437-494.
- Prado-Donoso J. A. (1989).** Manejo de plantaciones. *In: Eucalyptus: principios de silvicultura y manejo.* J. A. Prado-Donoso y S. A. Barros-Asenjo (eds.). INFOR-CORFO. Impresos Nova Ltda. Santiago, Chile. pp: 79-100.
- Ramírez-García E. O., A. M. Carmona-Villanueva, L. del C. Mendizábal-Hernández, J. Alba-Landa y J. Márquez-Ramírez (2018).** Respuesta de *Pinus greggii* Engelm. a cinco años de su establecimiento en Villa Aldama, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana* 20: 1-8.
- 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.
- Rodríguez-Laguna R., J. Meza-Rangel, J. Vargas-Hernández y J. Jiménez-Pérez (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: 47-59.
- Rodríguez-Laguna R., R. Razo-Zárate, S. Valencia-Manzo y J. Meza-Rangel (2013).** Características dasométricas de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. var. *greggii* de nueve procedencias en Galeana, Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4: 116-124.
- Rozas-Ortíz V. (2004).** Estrategias de establecimiento, crecimiento y tolerancia a la sombra en un bosque caducifolio maduro de la Cornisa Cantábrica. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 20: 105-109.

- Rusch V. y F. Natalia (2021).** Indicadores de Biodiversidad: Informe preparado por el proyecto INTA PI 038 evaluación, monitoreo y manejo de la biodiversidad en sistemas agropecuarios y forestales. Ministerio de Agricultura, Ganadería y pesca, Buenos Aires, Argentina. 47 p.
- Rzedowski, J. (2006).** Vegetación de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 504 p.
- Sánchez-González A. (2008).** Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y Bosques* 14:107-120.
- Sánchez-Rodríguez S. H. (2005).** Adaptación de las especies a través de cambios genéticos influenciados por el Medio ambiente. *Revista Electrónica de Veterinaria* VI: 1-9.
- Scarr S. y K. McCartney (2014).** How people make their own environments: A theory of genotype →environment effects. *Child Development* 54: 424-435.
- Serrato-Cortez J. A. (2000).** Prueba de progenie de *Pinus greggii* Engelm. en el predio Los Tarihuanes, Cañón de Jamé, Arteaga, Coahuila. [Tesis de Ingeniería, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. Repositorio Institucional – Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 77 p.
- SMN-CONAGUA, Servicio Meteorológico Nacional - Comisión nacional del Agua (2020a).** Estaciones meteorológicas 20166 Tlacotepec Plumas y 20076 Asunción Nochixtlán. Red de estaciones climatológicas.
- SMN-CONAGUA, Servicio Meteorológico Nacional - Comisión nacional del Agua (2020b).** Estación meteorológica 5176 Jamé. Red de estaciones climatológicas.
- SMN-CONAGUA, Servicio Meteorológico Nacional - Comisión nacional del Agua (2020c).** Estación meteorológica 21064 Presa La Soledad. Red de estaciones climatológicas.
- Sorensen F. C. y T. L. White (1988).** Effect of natural inbreeding on variance structure in tests of wind-pollination Douglas-fir progenies. *Forest Science* 34: 102-118.

- Squillace A. E. (1974).** Average genetic correlations among offspring from open-pollinated forest trees. *Silvae Genetica* 23: 149-156.
- Valencia-Manzo S., M. V. Velasco-García, M. Gómez-Cárdenas, M. Ruiz-Muñoz y M. A. Capó-Arteaga (2006).** Ensayo de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. en dos localidades de la Mixteca Alta de Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29: 27-32.
- Van Buijtenen J. P. (1992).** Chapter 2: Fundamental genetic principles. In: Handbook of quantitative forest genetics. L. Fins, S. T. Friedman y J. V. Brotschol (eds.). *Kluwer Academic Publishers* 39: 29- 68.
- Varela-Hernández S. (2010).** Manejo Sustentable de los Recursos Forestales. In: Derecho ambiental y ecología. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), pp: 51-56.
- Vargas-Hernández J. J. (2003).** Estado de la diversidad biológica de los árboles y bosques en el Norte de México. Documentos de Trabajo: Recursos Genéticos Forestales. FGR/60S. Servicio de Desarrollo de Recursos Forestales, Dirección de Recursos Forestales, FAO, Roma.
- Vázquez-Morales R. O. (2016).** Supervivencia y crecimiento en una plantación de *Pinus greggii* Engelm. establecida con compostas de biosólidos y estiércol, en Saltillo, Coahuila. [Tesis de Ingeniería, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. Repositorio Institucional – Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 82 p.
- Vela-Moya R. (2002).** Supervivencia, crecimiento y arquitectura de copa en una prueba de progenie de *Pinus greggii* Engelm. en el C.A.E.S.A., Arteaga, Coahuila. [Tesis de Ingeniería, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. Repositorio Institucional – Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 55 p.
- Velasco-Velasco V. A., J. R. Enríquez-del Valle, G. Rodríguez-Ortíz, G. V. Campos-Ángeles, M. Gómez-Cárdenas y M. L. García-García (2012).** Evaluación de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. en plantaciones de la Mixteca Oaxaqueña. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3: 42-50.

- Vergara-Lagos R. (1998).** La variabilidad poblacional. *In:* Curso mejora genética forestal operativa. R. Ipinza-Carmona, B. Gutiérrez-Caro y V. Emhart-Schmidt (eds.). INFOR-Instituto Forestal. Valdivia, Chile. pp. 39-48.
- Vilela-de Resende M. D., O. Murillo-Gamboa e Y. Badilla-Valverde (2018).** Genética cuantitativa y selección en el mejoramiento forestal. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 302 p.
- Villanueva-Díaz J., J. Cerano-Paredes, V. Constante-García, P. Z. Fulé y E. Cornejo-Oviedo (2009).** Variabilidad hidroclimática histórica de la sierra de Zapalinamé y disponibilidad de recursos hídricos para Saltillo, Coahuila. *Madera y Bosques* 15: 45-64.
- White T. L., W. T. Adams y D. B. Neale (2007).** Forest genetics. CAB International. Library of Congress, Washington, DC. 682 p.
- Yanchuk A. (2007).** Conclusiones. *In:* Conservación y Manejo de Recursos Genéticos Forestales. Vol. 3: en Plantaciones y Bancos de Germoplasma (*ex situ*). FAO, FLD, Bioversity International (comps), Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos. Roma, Italia. pp: 67-68.
- Zobel B. y J. Talbert (1988).** Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Trad. por M. Guzmán O. UTEHA, Noriega Editores, México. 545 p.

8. ANEXOS

Anexo 1: Programas en SAS para el análisis de varianza y cálculo de heredabilidad

Sobrevivencia 2015

```
Options ls=80 ps=60 pageno=1;
DATA sobrevivencia2015;
infile 'C:\Users\xxxxxx\Documents\BASE_DE_DATOS\sobr15.dat';
INPUT bloq proce $ fam $ sobr15;
Sobr15arsin=arsin(sobr15);
proc print;
Run;

*Análisis de Varianza;

Proc sort data=sobrevivencia2015;
by bloq fam proce;
run;

proc means noprint;
by bloq fam;
var sobr15arsin;
output out=medias1 mean= sobr15arsin;
run;
data jose;
set medias1;
```

```

proc anova data=medias1;
class bloq fam;
model sobr15arsin= bloq fam;
means fam / tukey lines;
run;

```

Sobrevivencia 2021

```

Options ls=80 ps=60 pageno=1;
DATA sobrevivencia2021;
infile 'C:\Users\xxxxxx\Documents\BASE_DE_DATOS\sobr21.dat';
INPUT bloq proce $ fam $ sobr21;
Sobr21arsin=arsin(sobr21);
proc print;
Run;

```

**Análisis de Varianza;*

```

Proc sort data=sobrevivencia2021;
by bloq fam proce;
run;
proc means noprint;
by bloq fam;
var sobr21arsin;
output out=medias1 mean= sobr21arsin;
run;
data jose;
set medias1;
proc anova data=medias1;
class bloq fam;
model sobr21arsin= bloq fam;
means fam / tukey lines;
run;

```

Variables 2015

```
Options ls=80 ps=60 pageno=1;
DATA variables15;
infile 'C:\Users\xxxx\Documents\BASE_DE_DATOS\variables15.dat';
INPUT bloq proce $ fam $ np db15 dn15 ht15;
db15sq=sqrt(db15);
proc print;
Run;
proc reg noprint;
model db15sq=dn15;
output out=regredb15sq r=rdb15sq;
run;

*Comprobación de distribución normal;
proc univariate normal plot;
var db15 rdb15sq dn15 ht15;
run;

*Análisis de varianza;
proc sort data=variables15;
by bloq fam proce np;
run;
proc means noprint data=variables15;
by bloq fam proce;
var db15 db15sq dn15 ht15;
output out=medias mean=db15 db15sq dn15 ht15;
run;
data fco;
set medias;
proc glm data=medias;
class bloq proce fam;
```

```
model db15 db15sq dn15 ht15= bloq fam;
means fam / tukey lines;
run;
```

*Cálculo de heredabilidad;

```
proc varcomp method=type1 data=variables15;
class bloq fam;
model db15 db15sq dn15 ht15 = bloq fam;
run;
```

Variables 2021

```
Options ls=80 ps=60 pageno=1;
DATA variables21;
infile 'C:\Users\xxxx\Documents\BASE_DE_DATOS\variables21.dat';
INPUT bloq proce $ fam $ np db21 dn21 ht21;
ht212=(ht21)**2;
proc print;
Run;
```

*Comprobación de distribución normal;

```
proc univariate normal plot;
var db21 dn21 ht21 ht212;
run;
```

*Análisis de varianza;

```
proc sort data=variables21;
by bloq fam proce np;
run;
proc means noprint data=variables21;
by bloq fam proce;
```

```
var db21 dn21 ht21 ht212;  
output out=medias mean=db21 dn21 ht21 ht212;  
run;  
data fco;  
set medias;  
proc glm data=medias;  
class bloq proce fam;  
model db21 dn21 ht21 ht212= bloq fam;  
means fam / tukey lines;  
run;
```

```
*Cálculo de heredabilidad;  
proc varcomp method=type1 data=variables21;  
class bloq fam;  
model db21 dn21 ht21 ht212 = bloq fam;  
run;
```

Anexo 2: Resultados de análisis de varianza para las variables

Cuadro 6. Análisis de varianza para las características de crecimiento en un ensayo de progenies de *Pinus greggii* Engelm. en Los Lirios, Arteaga, Coah., a los 10 y 16 años de establecido (2015 y 2021).

Variable	Año	FV	GL	CM	CV (%)	Pr>F
Sobrevivencia transformada (arcseno)	2015	Bloque	10	1.046		
		Familia	34	0.306	38.82	0.1329
		Error	340	0.237		
		Total	384			
	2021	Bloque	10	1.246		
		Familia	34	0.582	55.09	0.0059
		Error	340	0.327		
		Total	384			
Raíz cuadrada del diámetro a la base (\sqrt{db})	2015	Bloque	10	0.806		
		Familia	34	0.278	14.35	<.0001
		Error	325	0.105		
		Total	369			
Diámetro a la base (db)	2021	Bloque	10	8.529		
		Familia	34	26.083	18.48	<.0001
		Error	294	6.904		
		Total	338			
Diámetro normal (dn)	2015	Bloque	10	9.999		
		Familia	34	2.448	32.15	0.0007
		Error	313	1.180		
		Total	357			
	2021	Bloque	10	7.622		
		Familia	34	12.832	20.99	<.0001
		Error	294	3.794		
		Total	338			
Altura total (ht)	2015	Bloque	10	4.393		

Variable	Año	FV	GL	CM	CV (%)	Pr>F
		Familia	34	0.767	23.32	0.0016
		Error	325	0.391		
		Total	369			
		Bloque	10	940.739		
Altura total al cuadrado (ht ²)	2021	Familia	34	191.638	26.91	0.0009
		Error	294	93.670		
		Total	338			

FV=Fuente de variación; GL=grados de libertad; CM=cuadrados medios; CV (%)=coeficiente de variación en porcentaje; Pr>F=probabilidad.