



Universidad
Autónoma de
Tlaxcala

Centro de Investigación en Genética y Ambiente
Posgrado en Ciencias en Sistemas del Ambiente

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GENÉTICA Y AMBIENTE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE



**CARACTERIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE LA
SEMILLA DE *Pinus montezumae* LAMB. EN LA MALINCHE,
TLAXCALA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE

PRESENTA

ITZEL ROCIO CAHUANTZI TLACOTZI

BAJO LA DIRECCION DE

DR. JAVIER LÓPEZ UPTON

DR. OSCAR G. VÁZQUEZ CUECUECHA

TUTORES

DRA. ELIZABETH GARCÍA GALLEGOS

DR. VIDAL GUERRA DE LA CRUZ



IXTACUIXTLA, TLAX., JUNIO 2023



C. ITZEL ROCIO CAHUANTZI TLACOTZI

P R E S E N T E

En cumplimiento al artículo 52 fracción "d" del Reglamento General de Evaluación Académica, el comité de evaluación de examen de grado ha revisado el trabajo de investigación titulado: "CARACTERIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE LA SEMILLA DE *Pinus montezumae* LAMB. EN LA MALINCHE, TLAXCALA", realizado bajo la dirección del Dr. Oscar G. Vázquez Cuecuecha. No habiendo encontrado objeción alguna, se autoriza su impresión:

Dr. José Luis Martínez y Pérez

Dr. Javier López Upton

Dr. Héctor Santos Luna Zendejas

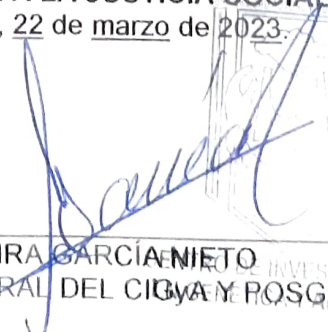
Dr. Oscar G. Vázquez Cuecuecha

Dr. Vidal Guerra de la Cruz

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

"POR LA CULTURA A LA JUSTICIA SOCIAL"

Ixtacuixtla, Tlax., 22 de marzo de 2023.


DRA. EDELMIRA GARCÍA NIETO
COORDINADORA GENERAL DEL CIG y POSGRADO

c c p. Expediente



AGRADECIMIENTO

A Dios:

Por amarme tanto y darme la oportunidad de estar en este mundo.

Por la bendición de nacer en una familia llena de amor, donde he recibido el apoyo moral y económico para poder lograr mis metas y sueños.

A mi familia:

Por ayudarme a florecer en este proyecto llamado “vida” y por tener durante todo este tiempo una linda compañía, tan dulce como la miel.

A la Dra. Elizabeth y el Dr. Oscar

Les agradezco el apoyo, las enseñanzas y consejos sensatos, el tiempo que han dedicado en mi formación profesional, por la confianza que me han tenido para llevar a cabo el trabajo de tesis.

De manera textual les extiendo mi más sincero agradecimiento y mi respeto. Le pido a Dios para que les valla bien y les siga brindando el don de la enseñanza y la felicidad.

ÍNDICE GENERAL

Página

ÍNDICE DE TABLAS.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS	IV
RESUMENV	VI
ABSTRACT.....	VIII
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Marco teórico.....	3
1.1.1 Distribución geográfica en México de <i>Pinus montezumae</i> A.B. Lamb.	3
1.1.2 Descripción botánica de <i>Pinus montezumae</i> Lamb.	5
1.1.3 Importancia de <i>Pinus montezumae</i> Lamb.....	6
1.1.4 Desarrollo y morfología de conos y semillas de las coníferas	7
1.1.5 Desarrollo de semillas.....	9
1.1.6 Germinación de la semilla.....	10
1.1.7 El suelo forestal	11
1.2 Antecedentes.....	15
1.3 pregunta de investigación.....	19
1.4 Justificación	20
1.5 Objetivos.....	22
1.5.1 Objetivo general.....	22
1.5.2 Objetivos específicos	22
II. METODOLOGÍA	23
2.1 Recolecta de estructuras reproductivas	25
2.2 Análisis de estróbilo femenino	26
2.2.1 Indicadores reproductivos.....	27
2.3 Pruebas de germinación	27
2.4 Análisis del crecimiento inicial de las plántulas	30
2.5 Determinación de propiedades físicas y químicas del suelo	32
2.6 Análisis estadístico.....	34

2.6.1 Análisis de cono.....	34
2.6.2 Pruebas de germinación	34
2.6.3. Análisis del crecimiento inicial	35
2.6.4 Análisis de correlación de Pearson.....	35
III. RESULTADOS.....	36
3.1 Características del estróbilo femenino	36
3.2 Indicadores reproductivos	37
3.3 Análisis de la calidad de la semilla.....	42
3.4 Análisis de la calidad de la planta	45
3.5 Análisis de correlación	47
IV. DISCUSIÓN.....	49
4.1 Morfología e indicadores reproductivos del estróbilo femenino	49
4.1.1 Potencial de producción de semilla.....	50
4.1.2. Semillas desarrolladas.....	50
4.1.3 Eficiencia en la producción de semillas llenas	51
4.1.4 Semillas vanas.....	52
4.1.5 Semillas dañadas.....	52
4.1.6 Óvulos abortados.....	53
4.1.7 Índice de endogamia.....	54
4.1.8 Características de la semilla	55
4.2 Calidad de la semilla.....	56
4.3 Calidad de planta	59
V. CONCLUSIONES.....	62
VI. LITERATURA CITADA.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Clasificación taxonómica de <i>Pinus montezumae</i> Lamb.	5
Tabla 2. Información geográfica y climatológica de los cuatro rodales muestreados de <i>Pinus montezumae</i> Lamb. dentro del Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala.	23
Tabla 3. Propiedades físicas y químicas de los suelos bajo la influencia de <i>Pinus montezumae</i> Lamb. en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala.	33
Tabla 4. Medias $\pm$ error estándar de las características morfológicas de estróbilos e indicadores reproductivos de semilla de cuatro rodales de <i>Pinus montezumae</i> Lamb. en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala.	41
Tabla 5. Medias $\pm$ error estándar de la calidad de las semillas de las poblaciones de <i>Pinus montezumae</i> Lamb. en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala.	44
Tabla 6. Media $\pm$ error estándar del análisis de plántula y planta de <i>Pinus montezumae</i> Lamb. en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala.	45
Tabla 7. Correlación de variables climáticas y edáficas con variables morfológicas de cono e indicadores reproductivos de <i>Pinus montezumae</i> Lamb.	48

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Distribución geográfica de <i>Pinus montezumae</i> Lamb. en a) la República Mexicana (Perry, 1991); b) estado de Tlaxcala (Tzompantzi, 1994).....	4
Figura 2. a) esporofito maduro de <i>Pinus montezumae</i> Lamb. b) estróbilo femenino seco maduro, c) semilla alada, d) semilla.	6
Figura 3. Ciclo reproductivo de <i>Pinus halepensis</i> Mill., incluye la maduración de cono y semilla (Khouja, 1997).	9
Figura 4. Curso temporal de los principales eventos asociados con la germinación y el crecimiento postgerminativo (Bewley, 1997).	10
Figura 5. Tipos de germinación en coníferas (Vázquez y Salas, 2007).	11
Figura 6. Áreas de recolecta de estructuras reproductivas dentro del Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala (CONANP, 2013).....	24
Figura 7. Fotografía de las condiciones de los rodales en la cosecha de invierno de 2020.	25
Figura 8. A) Método de flotación de semillas; b) disección del estróbilo femenino, clasificación de escamas, de semillas y de óvulos abortados de <i>Pinus montezumae</i> Lamb.	26
Figura 9. Distribución de las semillas de <i>Pinus montezumae</i> Lamb. para las pruebas de germinación.	28
Figura 10. Semillas germinadas de <i>Pinus montezumae</i> Lamb.	29
Figura 11. Selección de muestras de <i>Pinus montezumae</i> Lamb. para determinar la calidad de la planta	31
Figura 12. Componentes de la semilla de <i>Pinus montezumae</i> Lamb. a) semilla madura; b) testa; c) endospermo y embrión viable (tinción con tetrazolio); d) embrión viable (tinción con tetrazolio).....	37
Figura 13. Conos de <i>Pinus montezumae</i> Lamb. plagados por barrenadores en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala.	38
Figura 14. Embrión con anomalía (izquierda); embrión sano (derecha).....	39

Figura 15. Capacidad germinativa de semillas de <i>Pinus montezumae</i> Lamb. en el Parque Nacional La Malinche.....	42
Figura 16. Graficas de curva de germinación de <i>Pinus montezumae</i> Lamb.	43
Figura 17. Plántulas de <i>Pinus montezumae</i> Lamb. a los 10 meses posteriores a la germinación que provienen del Parque Nacional La Malinche de los rodales de Ixtenco (31); Altamira (21); San Bartolomé (11); San Pedro (1).....	46

RESUMEN

Pinus montezumae Lamb. es la especie con mayor distribución natural en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala, sus poblaciones están sujetas a varios factores de disturbio que producen cambios negativos en su estructura, composición y funciones biológicas de los ecosistemas, provocando una disminución en su distribución y repercute en el establecimiento de la regeneración. La repoblación de sus poblaciones depende de la producción de abundante semilla que germine adecuadamente. La semilla se recolectó de árboles en cuatro rodales de *Pinus montezumae* Lamb. dentro del Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala, ubicadas en las comunidades de Ixtenco, Altamira, San Bartolomé y San Pedro, se realizó un análisis de cono y se calculó el potencial de producción de semilla (PPS), semillas desarrolladas (SD), porcentaje de semillas llenas (%SLL), vanas (%SV), dañadas (%Sd), óvulos abortados (%OA), índice de endogamia (IE) y eficiencia reproductiva (ER). Las pruebas de germinación se realizaron en contenedores de plástico bajo condiciones de temperatura controlada (20°C), durante 25 días; se evaluó la capacidad germinativa (CG), valor pico de germinación (VP), germinación media diaria (GMD), el tiempo (días) en alcanzar el 50% de las semillas germinadas (GER50) y el valor de germinación (VG). A los 10 meses se evaluó en planta la altura total (cm), diámetro del cuello de la raíz (mm), biomasa aérea y radical para calcular el índice de esbeltez y el índice de calidad de Dickson.

Los conos más largos fueron recolectados en Altamira (128.4 mm) y los de mayor peso se presentaron en Ixtenco (56.3 g) por lo tanto, las características de los estróbilos están relacionados con las condiciones ambientales de cada rodal; El PPS en Ixtenco fue de 204 semillas por estróbilo del cual solo el 41.5 % fueron semillas llenas. Mientras que San Bartolomé tuvo 43.9 % OA y un IE de 0.40., estos valores están asociados con la densidad del arbolado y la forma del estróbilo.

De acuerdo con la calidad de la semilla a pesar de que fueron recolectadas en el mismo ciclo de producción, la capacidad germinativa fluctuó entre 80.25 a 92.50 %, la semilla de San Pedro presentó mayor velocidad y uniformidad en la germinación de la semilla, lo que puede estar asociado con estrategias reproductivas y características genéticas de los individuos con respecto a la procedencia y las condiciones microambientales del sitio; este rodal también tuvo un mejor crecimiento inicial en la planta, en contraste con los valores observados en los rodales de Ixtenco, Altamira y San Bartolomé; esto puede asociarse con problemas de latencia o de endogamia.

ABSTRACT

Pinus montezumae Lamb. is the species with the greatest natural distribution in La Malinche National Park, Tlaxcala, its populations are subject to several disturbance factors that produce negative changes in its structure, composition and biological functions of ecosystems, causing a decrease in their distribution and affects the establishment of regeneration. The repopulation of their populations depends on the production of abundant seed that germinates properly. The seed was collected from trees in four stands of *Pinus montezumae* Lamb. within La Malinche National Park, Tlaxcala, located in the communities of Ixtenco, Altamira, San Bartolomé and San Pedro, a cone analysis was performed and the seed production potential (PPS), developed seeds (SD), percentage of filled seeds (%SLL), vanas (%SV), damaged (%Sd), aborted eggs (%OA), inbreeding index (IE) and reproductive efficiency (ER) were calculated. Germination tests were performed in plastic containers under temperature-controlled conditions (20°C), for 25 days; germination capacity (CG), peak germination value (VP), mean daily germination (GMD), time (days) to reach 50% of germinated seeds (GER50) and germination value (VG) were evaluated. At 10 months, the total height (cm), diameter of the root neck (mm), aerial and radical biomass were evaluated in the plant to calculate the slenderness index and the Dickson quality index.

The longest cones were collected in Altamira (128.4 mm) and the heaviest were presented in Ixtenco (56.3 g) therefore, the characteristics of the strobili are related to the environmental conditions of each stand; The PPS in Ixtenco was 204 seeds per strobilus of which only 41.5% were filled seeds. While San Bartolomé had 43.9% OA and an IE of 0.40., these values are associated with tree density and the shape of the strobilus.

According to the quality of the seed although they were collected in the same production cycle, the germinative capacity fluctuated between 80.25 to 92.50%, the

seed of San Pedro presented greater speed and uniformity in the germination of the seed, which may be associated with reproductive strategies and genetic characteristics of the individuals with respect to the origin and microenvironmental conditions of the site; this stand also had a better initial growth in the plant, in contrast to the values observed in the other stands of Ixtenco, Altamira and San Bartolomé; This can be associated with latency or inbreeding issues.

I. INTRODUCCIÓN

En México la mayor cobertura forestal es representada por bosques templados, estos crecen en climas templados a fríos y destaca la presencia de coníferas; por lo tanto, estos bosques están presentes en una amplia diversidad de bosques (Rzedowski, 2006; Gernandt y Pérez-de la Rosa, 2014). De las 111 especies de pinos que se han descrito en el mundo, 46 de ellas se encuentran en México y de ellas el 55% son endémicas; por lo que es reconocido a nivel mundial como el segundo centro de diversidad de los pinos (Sánchez, 2008; Márquez-Ramírez *et al.*, 2010).

Los bosques son un recurso natural renovable, albergan especies animales y vegetales, regulan el clima, forman parte del ciclo hidrológico, reducen la erosión del suelo, además de ser uno de los principales sumideros de carbono en el mundo, los seres humanos obtienen productos, algunos de ellos con un valor económico considerable como el uso de la madera, sustancias químicas y alimentos (Cordero-Rivera, 2011).

A pesar de que las áreas boscosas brindan bienes y servicios, estas se han ido reduciendo con el paso del tiempo; algunos factores y condiciones que inciden en la reducción de ellas son: el crecimiento poblacional, la pobreza persistente (Cayuela, 2006), el aumento de las áreas destinadas a la agricultura y la ganadería, incendios forestales por causas naturales o antrópicas, el ataque de plagas y enfermedades, la tala clandestina (Torres-Rojas, 2004) y la extracción de madera como generadora de riqueza, en 2014 esta actividad representó el 0.3% del PIB (38 065 millones de pesos); por lo tanto, se promueven las plantaciones forestales en México, sin embargo esta actividad impacta en la reducción de la biodiversidad y la extinción local de especies (Galicia *et al.*, 2018).

La pérdida de los bosques es un problema ambiental, donde la composición y funciones biológicas quedan comprometidas al reducir las redes de interacciones,

porque se favorece el crecimiento de ciertas especies principalmente aquellas con valor comercial, esto podría afectar los ciclos biogeoquímicos e inducir la reducción de la resiliencia a cambios ambientales de largo plazo y la reducción de la biodiversidad y la transformación en el ecosistema forestal (Galicia *et al.*, 2018), esto podría acarrear consecuencias económicas y sociales (Cagnolo y Valladares, 2011).

Dentro de un rodal natural la semilla es fundamental porque es la principal forma de reproducción sexual de las coníferas y tiene la finalidad de preservar y favorecer los procesos evolutivos y de adaptación de la especie (Doria, 2010), es por esto que la regeneración natural es un proceso importante dentro de los bosques, pero si la cantidad de semillas no es suficiente, el medio de germinación no es el adecuado y las características fisiológicas y morfológicas de las plantas en campo son inapropiadas, el proceso de regeneración natural será ineficaz (Serrada-Herrera, 2003).

En el Parque Nacional La Malinche crece y se desarrolla *Pinus montezumae* Lamb. la cual es una especie forestal importante por la calidad de la madera que se utiliza en la elaboración de duelas, triplay, durmientes, muebles, entre otros artículos (Zamora-Campos *et al.*, 2007; López-Domínguez y Acosta, 2005). Por consiguiente, las poblaciones de *Pinus montezumae* Lamb. han sido fuertemente impactadas a causa de la deforestación (tala clandestina), que generan un impacto ecológico negativo, dando paso a procesos de fragmentación y degradación de los ecosistemas (Villavicencio-García *et al.*, 2012). Cuando un rodal tiene baja densidad del arbolado o presenta algún grado de fragmentación o se encuentran aislados, el flujo de genes está limitado en las poblaciones, lo que implica el fracaso en los procesos de polinización y fecundación; por consiguiente, una desfavorable producción de semilla viable puede ocasionar procesos de depresión endogámica y contribuye en la reducción de la diversidad genética de las poblaciones (Mosseler *et al.*, 2000).

Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es caracterizar la producción y calidad de la semilla de *Pinus montezumae* Lamb. para conocer el estado reproductivo

actual de esta especie en cuatro rodales dentro del Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala.

1.1 Marco teórico

1.1.1 Distribución geográfica en México de *Pinus montezumae* A.B. Lamb.

Se conoce comúnmente como pino de Moctezuma u ocote macho, tiene una amplia distribución latitudinal en la República Mexicana (Figura 1-A) desde las montañas de los estados de Tamaulipas, Nuevo León, Coahuila, Jalisco, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Michoacán y La Faja Volcánica Transmexicana (FVT); esta última se considera como el segundo centro de diversificación de los pinos en México, en esta zona se desarrollan principalmente tres especies: *Pinus devoniana* Lindley, *Pinus montezumae* Lamb. y *Pinus pseudostrobus* Lindl. (Perry, 1991; Tzompantzi, 1994).

La FVT abarca el Estado de México, Morelos, Hidalgo, Puebla y Tlaxcala (Tzompantzi, 1994; Sánchez, 2016).

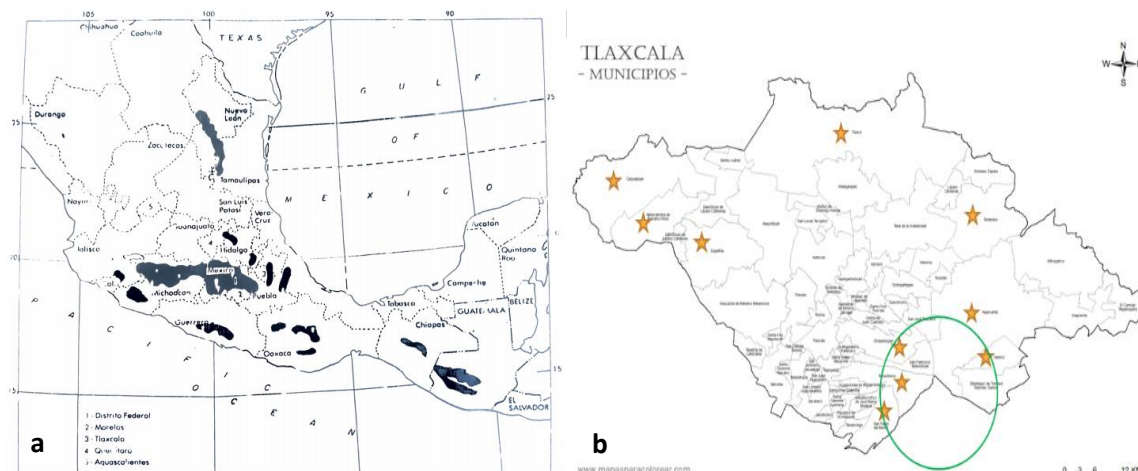


Figura 1. Distribución geográfica de *Pinus montezumae* Lamb. en a) la República Mexicana (Perry, 1991); b) estado de Tlaxcala (Tzompantzi, 1994).

En Tlaxcala crece *P. montezumae* una especie forestal de importancia económica y ecológica al ocupar el tercer lugar en abundancia dentro del estado y se localiza en los municipios de Calpulalpan, Españita, Nanacamilpa de Mariano Arista, Terrenate, Tlaxco y los municipios de Zitlaltepec de Trinidad Sánchez Santos, San Juan Ixtenco, Huamantla, Santa Ana Chiautempan, San Luis Teolocholco y San Pablo del Monte (Figura 1-B) (Tzompantzi, 1994).

En el Parque Nacional “La Malinche” (Área Natural Protegida) *Pinus montezumae* A.B. Lamb. tiene la mayor extensión; crece y se desarrolla en un intervalo de distribución altitudinal de 2 800 hasta 3 550 m s.n.m. (Rojas-García y Villers-Ruiz, 2008), mientras que la SEMARNAT considera su distribución desde los 2 500 y 3 100 m s.n.m, generalmente los bosques de *P. montezumae* son rodales puros al ser la especie más abundante y ocupar más del 80 % de la superficie (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT, 2013).

De acuerdo con la clasificación de Perry (1991) *P. montezumae* se encuentra dentro del grupo Diploxylon (pinos duros), en la sección Montezumae que está constituida de cuatro especies y una variedad; a continuación, se muestra la clasificación taxonómica (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación taxonómica de *Pinus montezumae* Lamb.

Clasificación taxonómica	
División	<i>Spermatophyta</i>
Subdivisión	<i>Gymnospermae</i>
Clase	<i>Coníferas</i>
Orden	<i>Coniferales</i>
Familia	<i>Pinaceae</i>
Género	<i>Pinus</i>
Especie	<i>Pinus montezumae</i> Lamb.

Las poblaciones de *P. montezumae* se encuentran en asociación con *P. pseudostrobus*, *P. teocote*, también en composición con otros géneros de árboles forestales como encinos (*Quercus laurina* y *Q. crassipes*), madroños (*Arbutus xalapensis*), oyamel (*Abies religiosa*), ailite (*Alnus jorullensis*) y arbustos (Tzompantzi, 1994; SEMARNAT, 2013).

1.1.2 Descripción botánica de *Pinus montezumae* Lamb.

Es un árbol que mide de 30 a 35 m de altura; 50 a 80 cm de diámetro; la madera es blanca amarillenta de consistencia dura, pesada y resinosa; la corteza es gruesa, de color marrón grisáceo con fisuras profundas, forma placas ásperas y escamosas (Figura 2-A); las hojas se encuentran mayormente en fascículos de cinco aunque pueden tener entre cuatro a seis fascículos, son delgadas y ligeramente caídas, miden entre 15-25 cm de largo con casos particulares en donde llegan a medir 30 cm, con 2-6 canales de resina y las vainas con fascículos marrones de 15 mm de largo (Perry, 1991).



Figura 2. a) esporofito maduro de *Pinus montezumae* Lamb. b) estróbilo femenino seco maduro, c) semilla alada, d) semilla.

Los pinos desarrollan dos tipos de estructuras reproductivas; por una parte, se desarrollan estróbilos femeninos o conos ovulados compuestos, dispuestos en grupos de 2 o 3 estróbilos (Figura 2-B) y los estróbilos masculinos o conos polínicos simples, son de tamaño pequeño que miden aproximadamente 2 cm de largo (Gernandt y Pérez-de la Rosa, 2014).

La semilla es alada (Figura 2-C) lo que facilita la dispersión por acción del viento, es de color marrón y mide entre 6 y 7 mm de largo (Figura 2-D) (Perry, 1991).

1.1.3 Importancia de *Pinus montezumae* Lamb.

Esta especie ocupa el lugar número 21 de la lista de especies que se utilizan con fines de reforestación, conservación, restauración de suelos y protección de

cuenas hidrográficas en México en base a la norma mexicana NMX-AA-170-SCFI-2016 (Diario Oficial de la Federación, DOF 2016; Manzanilla *et al.*, 2019).

Estudios en el Parque Nacional La Malinche han demostrado que la madera de *P. montezumae* (densidad de 0.34 - 0.59 g/cm³) se puede utilizar en la elaboración de artículos como juguetes, cunas, pupitres, pulpa de papel, ataúdes, la madera pesada se puede utilizar como combustible, madera de aserrío y postes (Zamora-Campos *et al.*, 2007). También brinda servicios ecológicos que podrían mitigar el cambio climático como la captura de CO₂; además de la captura de agua de niebla que contribuye en la recarga del caudal de la cuenca, sin embargo, por cada hectárea pérdida de *P. montezumae* se reducen 422 mm por hora de captación de agua de niebla y 130 Megagramos de carbono (Díaz-Castillo, 2019).

El contenido de carbono que puede capturar *P. montezumae* se determina a través del modelo $C=0.0065DN^{3.0484}$, donde DN es el diámetro normal en cm a la altura del pecho (1.3 m) (Carrillo *et al.*, 2014). La cantidad de agua de niebla que captura un individuo de *P. montezumae* en la ladera del Parque Nacional Cofre de Perote fue de 57.9 litros por hora a partir de la niebla (individuo de 15 m de altura y 10 m de diámetro, edad de ~25 años) lo que es suficientemente grande para intervenir en el ciclo hidrológico y en la adquisición de agua (Barradas, 1983).

1.1.4 Desarrollo y morfología de conos y semillas de las coníferas

La conservación de los ecosistemas forestales y el éxito reproductivo de las pináceas está relacionada con la capacidad que tiene el grano de polen en fecundar al óvulo y se genere una semilla viable; es decir, la reproducción está asociada con la producción de semillas de los esporófitos maduros (Márquez-Ramírez *et al.*, 2010). Por lo tanto, es importante conocer las etapas del ciclo reproductivo de las coníferas (Figura 3).

Los pinos producen estróbilos femeninos (productores de óvulos) que están formados por un sistema complejo de brácteas-macroesporófilas, la forma del cono

es ovoide y ligeramente curvado, en la base del estróbilo se desarrollan dos protuberancias (arquegonios) que originan los óvulos. Los estróbilos masculinos (productores de polen) están constituidos de microesporófilas (Bramlett *et al.*, 1977; Gernandt y Pérez-de la Rosa, 2014).

El proceso de polinización inicia con la liberación del grano de polen por parte de los conos masculinos, seguido del transporte por el viento y la deposición de este sobre la estructura femenina; posteriormente el grano de polen ingresa al micrópilo en la cámara micropilar, enseguida se desarrolla el tubo polínico, éste crece desde la cámara polínica hacia el núcleo, finalmente termina por penetrar las estructuras especializadas denominadas arquegonios y se liberan dos gametos masculinos, uno de ellos se degrada (gameto de menor tamaño) mientras que el otro entrará en la célula huevo (gameto de mayor tamaño) y se llevará a cabo la fecundación e iniciará la embriogénesis cigótica a fin de formar el embrión de condición diploide (2n) (Bramlett *et al.*, 1977).

El embrión estará constituido por cotiledones, hipocótilo y una radícula inmadura, con el paso del tiempo aumentará en tamaño al igual que la semilla, una vez madura será liberada del cono y dispersada por el viento (Gernandt y Pérez-de la Rosa, 2014; Bramlett *et al.*, 1977).

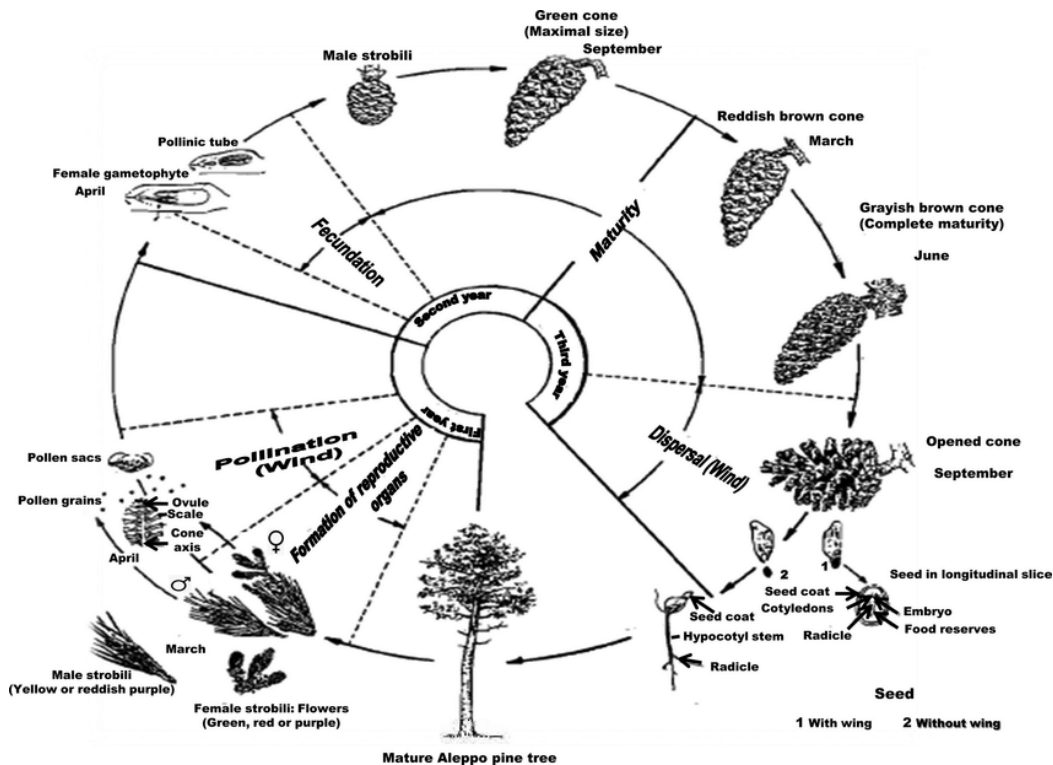


Figura 3. Ciclo reproductivo de *Pinus halepensis* Mill., incluye la maduración de cono y semilla (Khouja, 1997).

1.1.5 Desarrollo de semillas

En la propagación de las especies forestales la semilla es un recurso estratégico y fundamental para la dispersión de las especies ya que es considerada la unidad básica de la reproducción sexual de las plantas, a través de ésta se alcanza la perduración de los ecosistemas (Doria, 2010; Miniño-Mejía *et al.*, 2014).

Con la semilla se comienza la independencia de la próxima generación de plantas, el producto de la fecundación del óvulo vegetal es la formación de la semilla, que contiene al embrión y en un futuro se transformará en una nueva planta. La semilla está estructural y fisiológicamente equipada para su función como unidad de dispersión y está bien provista de reservas alimenticias para sostener la plántula en crecimiento hasta que se establezca como un organismo autótrofo (Bewley, 1997; Doria, 2010).

1.1.6 Germinación de la semilla

Bewley (1997) hizo referencia a la germinación como una serie de eventos que inician con la absorción de agua (imbibición) a través de la testa de la semilla seca y concluye con el alargamiento del eje embrionario.

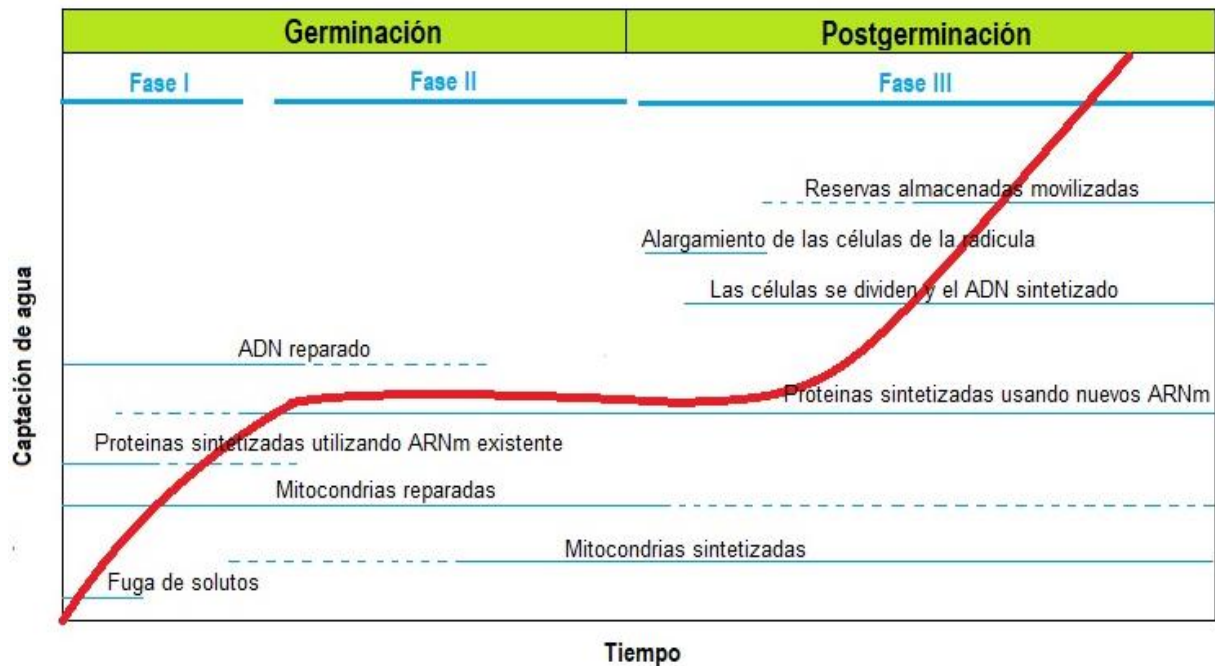


Figura 4. Curso temporal de los principales eventos asociados con la germinación y el crecimiento postgerminativo (Bewley, 1997).

Una vez que se libera la semilla se encuentra en un estado de desecación y reposo; la semilla necesita ser rehidratada (absorción de agua) para iniciar con el proceso de germinación, durante este proceso las membranas sufren daño a causa de la entrada del agua. Sin embargo, las membranas tienen la capacidad de repararse, reanudando sus actividades metabólicas (Bewley 1997), la producción de moléculas de ATP a través de la ruta de la glucólisis y el ciclo de Krebs o ciclo del ácido cítrico o ciclo de los ácidos tricarboxílicos que desencadenan en el crecimiento y división celular; posteriormente se produce el rompimiento de la testa y finaliza con la

emergencia de la radícula que es el cambio morfológico (Doria, 2010). El tiempo para que se completen los eventos varían de horas a semanas, dependiendo de la especie de la planta y las condiciones de germinación (Figura 4) (Bewley 1997).

La germinación más común en la mayoría de las especies de coníferas y latifoliadas es la epígea, donde los cotiledones emergen por encima del suelo y son expuestos al aire por el alargamiento del hipocótilo (Figura 5) (Zevallos y Flores, 2016).

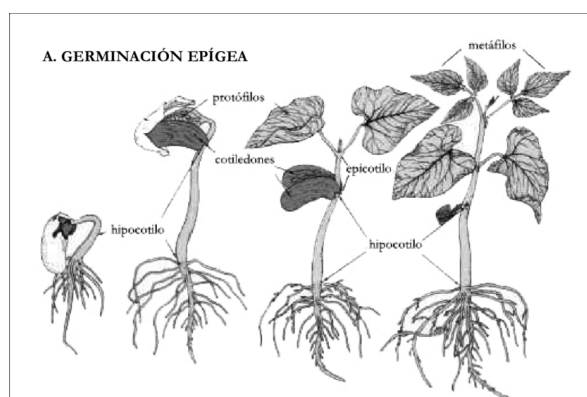


Figura 5. Tipos de germinación en coníferas (Vázquez y Salas, 2007).

1.1.7 El suelo forestal

Los bosques y los suelos forestales cumplen un complejo e interactivo papel en el ambiente. Existe un vínculo mutualista entre el suelo al proporcionar agua, nutrientes y es el soporte para los árboles y la vegetación, tan pronto caen los residuos como las hojas, la hojarasca, trozos de ramas o madera muerta, la intervención de microorganismos detritívoros y descomponedores degradan el material (residuos) lo que proporciona materia orgánica al suelo, por lo tanto, contribuye en la formación del suelo (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, 2015).

López-Díaz y Medina (2015) mencionaron que las propiedades físicas del suelo son aquellas que pueden observarse y/o medirse sin alterar químicamente la composición del suelo y están relacionadas con el movimiento del aire, agua, raíces y nutrimentos.

1.1.7.1 Propiedades físicas del suelo

La densidad real es la relación entre la masa y el volumen de las partículas sólidas del suelo, sin considerar los espacios porosos, el valor obtenido es propio del material que se analiza (Villegas *et al.*, 2017); la densidad aparente (D_a) incluye el espacio poroso existente entre las partículas (Pire y Pereira, 2003).

La textura se refiere al porcentaje de partículas de arena, limo y arcilla presentes en el suelo (Ortiz y Ortiz, 1990). El tamaño de la partícula se clasifica en arena cuando es grande (>0.05 mm) y de diámetro pequeño cuando es limo y arcilla (>0.002 mm) de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2002). La proporción y el tamaño influye en la retención de agua, aire y nutrimentos. La arena retiene pequeñas cantidades de agua debido a que sus poros son grandes por lo que el agua drena libremente, contrario de las arcillas que adsorben una mayor cantidad de agua; sin embargo, estas últimas retienen con mayor fuerza las moléculas de agua por lo que una cantidad no está disponible (Ortiz y Ortiz, 1990).

1.1.7.2 Propiedades químicas del suelo

Dentro de estas propiedades el pH es una medida de acidez o basicidad en el suelo y es importante por la capacidad de adsorción de cationes en el complejo de cambio, afecta la solubilidad de los nutrimentos, la tasa de descomposición de la materia orgánica y el desarrollo de los microorganismos (Schoonover y Crim, 2015).

Las comunidades microbianas poseen un papel fundamental en la dinámica de los nutrimentos ya que los hacen disponibles para ellos mismos y otras formas de vida; además, responden de manera positiva a los contenidos de materia orgánica (Cerón y Aristizábal, 2012), la cual se acumula en la superficie de los suelos y disminuye marcadamente con la profundidad (Sadzawka *et al.*, 1995).

La materia orgánica es considerada una de las propiedades más importantes a evaluar, debido a los efectos que tiene sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Julca-Otoniano *et al.*, 2006).

Los suelos forestales poseen un mayor contenido de materia orgánica; por lo tanto, para que se lleve a cabo su degradación se requiere de la biota presente en el suelo (Schoonover y Crim, 2015).

En la fase de humificación la materia orgánica se transforma en humus joven a través de una intensa actividad microbiana, en esta condición la materia orgánica no está ligado a las partículas del suelo solo está mezclada; por otro lado, el humus estable sí está ligada al suelo y su composición es compleja (ácidos húmicos y fúlvicos), la suma de humus joven y estable forman la materia orgánica total del suelo (Julca-Otoniano *et al.*, 2006).

La fase de mineralización inicia con la destrucción progresiva del humus estable, de modo que se liberen los nutrimentos tanto de forma inorgánica como orgánica que están disponibles para las plantas; en el caso de la molécula de nitrógeno pasa por nueve estados de oxidación (N-orgánico, amonio, hidracina, hidroxilamina, dinitrógeno, óxido nitroso, óxido nítrico, nitrito, dióxido de nitrógeno, nitrato); la fase de *amonificación* consiste en la oxidación de la molécula del nitrógeno orgánico a amonio, posteriormente se da la nitrificación en donde la molécula de amonio pierde electrones y pasa a ser nitrato, sólo el ion nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) está disponible para la absorción de las plantas (Julca-Otoniano *et al.*, 2006; Schoonover y Crim, 2015).

El fósforo (P) se encuentra en el suelo en forma orgánica e inorgánica. El componente inorgánico se encuentra en una fracción muy pequeña adsorbido a los coloides del suelo, precipitado con calcio, hierro o aluminio y en los minerales primarios (Rubio *et al.*, 2008). La microbiota del suelo juega un papel importante, ya que actúa en la mineralización de la materia orgánica, liberando P a la solución del suelo (Oberson y Frossard, 2015).

La mayoría del fósforo de los ecosistemas terrestres se encuentra localizado en el suelo, generalmente su contenido varía entre 100 a 3000 mg de P/kg; entre un 15 y 80 % de dicho contenido está en formas orgánicas, que la constituyen residuos de plantas, animales y microorganismos, que liberan compuestos como ácidos nucleicos, fosfolípidos y ésteres, lo que representa entre un 30 y 60 % del P total. La mineralización de éstos retorna a HPO_4^{2-} y H_2PO_4^- , lo que permite el reciclaje de este elemento a la biota. Los fosfatos son utilizados por autótrofos y heterótrofos incluidos los descomponedores en la cadena trófica, para ser devueltos por estos últimos; sin embargo, la disponibilidad de estos iones está fuertemente influenciada por el pH del suelo (Barančíková *et al.*, 2007). En el caso de los suelos forestales el grado de movilización es mayor, por la acidez lo que favorece una mayor actividad microbiana específicamente fúngica, la cual es responsable de la solubilización del fósforo inorgánico presente en el material parental y orgánico (Zalba y Peinemann, 1987).

1.2 Antecedentes

Zalba y Peinemann (1987) analizaron el efecto de especies forestales (*Pinus halepensis* y *P. radiata*) sobre el pH, fósforo disponible, nitrógeno total y carbono orgánico, reportaron que el suelo habitado por *P. halepensis* presentó un pH de 4.8, una concentración mayor de fósforo disponible 94 mg/kg, N total 0.34 % y carbono orgánico de 5.6 %, lo que depende en gran medida del aporte orgánico al suelo por especie de conífera.

Delgado-Valerio (1994) realizó un estudio sobre la capacidad de producción de semilla de *Pinus montezumae* Lamb., *Pinus pseudostrobus* Lind., y *Pinus leiophylla* Schltdl. & Cham. en la comunidad de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. Evaluó el número de escamas fértiles; la cantidad de semillas desarrolladas, la proporción de semillas llenas, vacías, dañadas por insectos y la cantidad de óvulos abortados del primer y segundo año. La especie con mejores características de su estructura reproductiva fue *P. montezumae*, con producción de 219 semillas, de las cuales el 86.8 % presentan un embrión viable, lo que favorece que presente un porcentaje de germinación de 99.5. En el caso de *P. pseudostrobus*, solo presentó el 16 % de semillas llenas pero una capacidad germinativa de 95.3 %, los bajos valores se asociaron a un incendio que alteró la sincronía en la liberación de polen y *P. leiophylla* tuvo 17 % de semillas llenas, de las cuales el 93 % germinaron; por lo tanto, las últimas dos especies se consideraron como especies poco eficientes en producir semillas llenas, aunque de buena germinación.

Flores-López *et al.* (2005) realizaron análisis de conos para determinar los índices reproductivos de *Picea mexicana* Martínez, esta especie se encuentra en la categoría de especies en peligro de extinción. Se realizaron dos recolectas (1999 y 2001) en tres poblaciones, El Coahuilon, El Mohinora y La Marta. La Marta tuvo una mayor densidad de árboles 143 árboles ha⁻¹, respecto a El Coahuilón y El Mohinora 84 y 117 árboles ha⁻¹ respectivamente; en general, los estados reproductivos de las

tres poblaciones presentaron valores críticos, el principal problema de estas poblaciones es la poca disponibilidad de polen, dando paso a procesos de consanguinidad entre los individuos de los rodales evaluados.

Vela-Correa *et al.*, (2007) seleccionaron cinco sitios con regeneración natural de *Pinus montezumae* Lamb., considerados representativos de las zonas donde existía una mayor cobertura vegetal dentro del Parque Nacional La Malinche. Los sitios fueron: a) carretera al albergue 1; b) Altamira 1; c) Altamira 2; d) carretera al albergue 2; e) antiguo campamento La Malinche, en donde se cuantificó la población natural de renuevos y se determinaron las propiedades físicas y químicas de los suelos. En los primeros 10 cm de profundidad se reportó en promedio una densidad aparente de 0.92 g cm^{-3} , una porosidad del 57%, lo que permitió el intercambio adecuado de aire y absorción de nutrimentos, una textura areno-migajosa, un pH de 5.38, materia orgánica de 7.86 % y carbono orgánico del 4.55 %. Los resultados indicaron que la condición edáfica no es un factor determinante en el número de renuevos, no así la altitud y temperatura.

Gómez-Jiménez *et al.* (2010) determinaron la variación en características reproductivas y la evaluación de la germinación en un huerto semillero de *P. leiophylla* constituido por 96 árboles; el peso promedio de los estróbilos fue de 15.2 g, el potencial de producción fue de 108 semillas, 17.7 % de semillas llenas, el porcentaje de semillas vanas fue de 18.6 % producto de la autopolinización y consecuentemente el índice de endogamia fue de 0.50, el cual es considerado como un valor alto; el número de semillas en 1 kg en promedio es de 86 200 semillas.

Morales-Velázquez *et al.* (2010) determinaron el estado reproductivo de *P. leiophylla* a través de un análisis de conos. El promedio del potencial de producción fue de 61 semillas por cono, la eficiencia de la semilla fue de 1.97 % y 89.2 % de semillas vanas. Los valores bajos de los parámetros reproductivos los asociaron a la baja disponibilidad de polen, como respuesta a la baja densidad de individuos dentro de las poblaciones, concluyendo que esto se debió a un alto grado de endogamia.

Romero-Barrios *et al.* (2015) determinaron el contenido de materia orgánica y densidad aparente de suelos forestales del Parque Nacional La Malinche en el intervalo altitudinal de 3,242 a 2,890 m s.n.m. dentro de los municipios de San Luis Teolocholco y San Francisco Tetlanohcan. Los suelos presentaron un pH moderadamente ácido y un contenido de materia orgánica de bajo a muy bajo, predomina la fracción arena y la densidad aparente fue de 1.5 g cm^{-3} . Se concluyó que los suelos presentan cierto grado de degradación y se puede inferir que el tipo de vegetación, así como las actividades antrópicas influyen en el contenido de materia orgánica.

Quiroz-Vázquez *et al.* (2017) determinaron el estado reproductivo de *Pinus pinceana* Gordon en dos sitios, El Arenalito con 117 árboles ha^{-1} y San Cristóbal con 107 árboles ha^{-1} . Evaluaron el índice de endogamia en ambos sitios durante tres años (2001, 2002 y 2003); los valores para El Arenalito fueron de 0.15, 0.43 y 0.59; mientras que, en San Cristóbal 0.13, 0.24, 0.33 por cada año de evaluación respectivamente. Con estos valores se determinaron que las poblaciones no sufren de depresión por endogamia; por lo tanto, los valores se asociaron a la producción irregular de semilla (ciclo reproductivo de las coníferas).

Aragón-Peralta *et al.* (2020) evaluaron cinco poblaciones de *P. pseudostrobus* en Oaxaca, se seleccionaron 42 árboles para evaluar características reproductivas, la variación morfológica de conos y semillas, asimismo relacionaron estas variaciones con variables ambientales. La longitud de los conos en promedio fue de 101.3 mm; el peso seco de 97.9 g, encontrando 107 semillas por cono y el índice de endogamia varió entre 0.39 a 0.64. Los valores obtenidos se asociaron con la baja cantidad y calidad de polen a causa de procesos de autofecundación. Las variables temperatura y precipitación mostraron una correlación negativa ($r = -0.43$), es decir, a menor temperatura y mayor precipitación se favorecerá la producción de semillas por cono.

Pérez-Reyes *et al.* (2020) evaluaron indicadores reproductivos de *Pinus caribaea* Morelet en la cosecha de 2016 y 2017 en una unidad productora de semillas. En el año 2016 el potencial de producción fue de 225 semillas / cono y el índice de endogamia de 0.33, sin embargo, para el año 2017 el potencial de producción aumentó a 243 semillas / cono y el índice de endogamia fue de 0.30. A pesar de que el índice de endogamia disminuyó en 2017, los valores reportados en ambas cosechas se mantuvieron por encima de los intervalos recomendados para áreas destinadas a la producción de semilla mejorada.

Capilla-Dinorin *et al.* (2021) caracterizaron parámetros reproductivos y evaluaron la calidad de la semilla de siete poblaciones de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen procedentes de Puebla y Veracruz. El promedio del potencial de producción fue de 89 semillas por cono; 17.5 % de semillas llenas y 59 % de óvulos abortados. Se reportaron bajos valores de semillas llenas, pero se encontró que estos valores se relacionaron con la baja densidad de árboles. En el sitio Atoluca (44 árboles ha⁻¹) tuvo la densidad más baja y se observó el menor porcentaje de semilla llena (6.7 %) en contraste con Aire Libre (143 árboles ha⁻¹) en donde se reportó el porcentaje más alto (24 % semillas llenas); la capacidad germinativa fue de 75.7 %, el cual, es un valor aceptable. También se reportó la existencia de una correlación positiva entre la altitud con el largo y ancho de cono.

1.3 Preguntas de investigación

- ¿El potencial de producción de semillas en estróbilos de *Pinus montezumae* Lamb. varía entre cuatro rodales del Parque Nacional La Malinche?
- ¿La calidad de la semilla de *Pinus montezumae* Lamb. difiere en cuatro rodales del Parque Nacional La Malinche?
- ¿Las condiciones químicas del suelo afectan la producción de semillas de *Pinus montezumae* Lamb. en cuatro rodales del Parque Nacional La Malinche?

1.4 Justificación

Uno de los principales disturbios es el cambio climático, pues éste modifica los patrones de distribución de las masas forestales, por ende, representa una preocupación debido a la capacidad de respuesta que pueden tener los árboles frente a las condiciones cambiantes del clima y los efectos que puede tener sobre la dispersión del polen y semilla, además del establecimiento y supervivencia de la planta en condiciones de campo.

Pinus montezumae es una especie de importancia ecológica en el volcán “La Malinche”, es el hábitat de especies animales como el tecolote rítmico y en particular del conejo de monte el cual es una especie endémica de México, además de brindar servicios ambientales a los seres humanos. Sin embargo, las poblaciones de *Pinus montezumae* están sujetas a varios factores de disturbio que representan un problema ambiental por el efecto que pueden causar en el deterioro de la estructura natural, composición de especies y funciones biológicas dentro de los rodales naturales.

Los factores que ejercen presión sobre los rodales de *P. montezumae* ya sea de origen humano o natural, alteran los ciclos de su regeneración en el ecosistema; además, los cambios dan paso a procesos de fragmentación y contribuyen a una baja variabilidad de las poblaciones, por lo tanto, el flujo génico se reduce. Al reducir el número de individuos de una población se reduce la cantidad de polen disponible, se eleva la posibilidad de procesos de autofecundación o polinización entre parientes cercanos, se incrementa la consanguinidad en los rodales y como consecuencia aparecen procesos de depresión endogámica que impactan en la producción de semillas viables (cantidad y calidad del germoplasma), además de que contribuye en la pérdida de la diversidad genética.

La regeneración natural es importante en el establecimiento de las masas forestales; por lo tanto, es fundamental que se lleven adecuadamente las etapas de este proceso, que incluyen a) suficiente suministro de semillas que procede de

árboles maduros dentro del rodal, b) la dispersión del germoplasma, c) la germinación de la semilla y d) supervivencia de la planta en condiciones de campo.

Por lo tanto, es de suma importancia realizar trabajos encaminados a analizar en varios rodales de *P. montezumae* la capacidad de regeneración natural a través de la estimación de la producción, calidad de la semilla y crecimiento inicial de plántulas, las operaciones consisten en la recolecta de la semilla, almacenamiento y producción de planta en vivero.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Analizar los indicadores reproductivos de *Pinus montezumae* Lamb. a través de la caracterización de la producción y calidad de semilla en cuatro rodales dentro del Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala, México.

1.5.2 Objetivos específicos

- I. Determinar los indicadores reproductivos de *Pinus montezumae* Lamb. en cuatro rodales.
- II. Evaluar la germinación y crecimiento inicial en plántula de *Pinus montezumae* Lamb. en cuatro rodales dentro del Parque Nacional La Malinche.
- III. Determinar la relación entre las propiedades físicas-químicas del suelo con la producción de conos y semillas de *Pinus montezumae* Lamb.

II. METODOLOGÍA

En la tabla 2 se muestra la información geográfica y climatológica de cada uno de los rodales que se seleccionaron para la recolecta del material, tomando como principal criterio de selección que estos rodales tuvieran una producción adecuada para la recolecta de las muestras.

Tabla 2. Información geográfica y climatológica de los cuatro rodales muestreados de *Pinus montezumae* Lamb. dentro del Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala.

Rodal	Latitud	Longitud	Altitud	Temperatura media anual (°C)	Precipitación media anual (mm)	Edad promedio de los árboles	Densidad (árboles /ha)
Ixtenco	19°14'14''	97°58'13''	2950	11.7	797	58	104
Altamira	19°16'42''	97°59'27''	3000	11.4	809	70	171
San Bartolomé	19°16'13''	98°05'32''	2850	12.2	853	54	121
San Pedro	19°15'34''	98°05'34''	2900	11.9	852	54	186

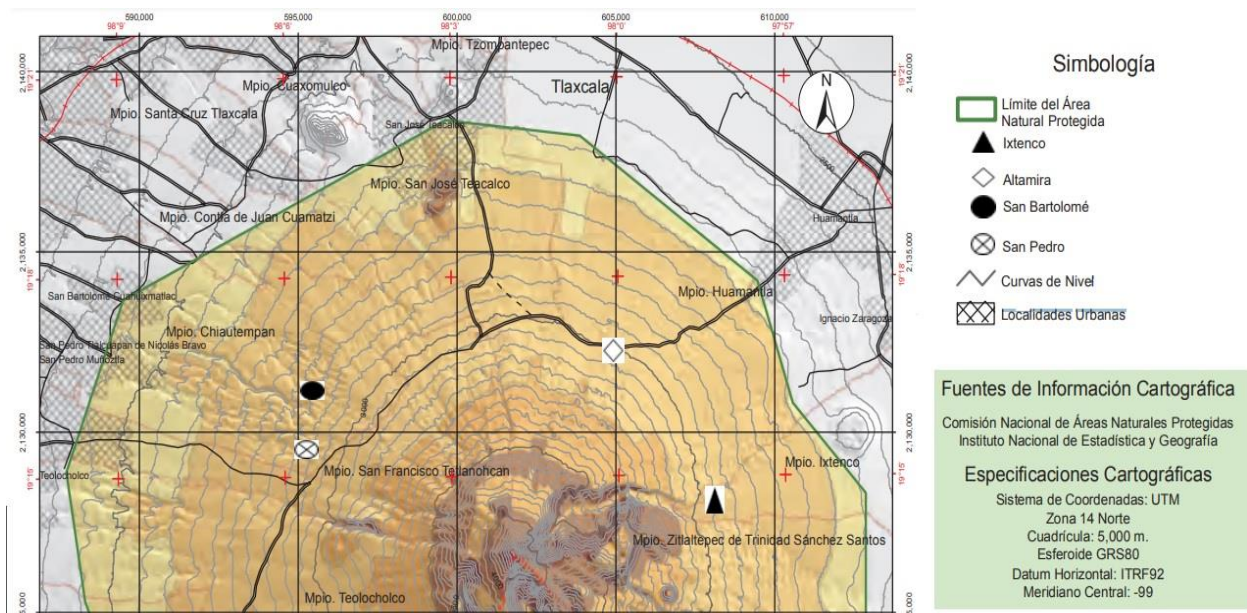


Figura 6. Áreas de recolecta de estructuras reproductivas dentro del Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala (CONANP, 2013).

La recolecta de conos se realizó en cuatro rodales naturales de *P. montezumae* dentro del Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala (Figuras 6 y 7), el clima que predomina en la parte noroeste del volcán es el más húmedo de los subhúmedos (Santa Ana Chiautempan); los suelos son clasificados en Fluvisoles localizados en Ixtenco y Regosol en Huamantla y Chiautempan (López-Domínguez y Acosta, 2005); La Malinche es una fuente de abastecimiento de agua para Tlaxcala y Puebla sin embargo a medida que aumente la deforestación se disminuye la infiltración y la recarga de mantos freáticos (SEMARNAT, 2013).



Rodal I: Ixtenco



Rodal II: Altamira



Rodal III: San
Bartolomé



Rodal IV: San Pedro

Figura 7. Fotografía de las condiciones de los rodales en la cosecha de invierno de 2020.

2.1 Recolecta de estructuras reproductivas

En cada rodal se seleccionaron 10 árboles, libres de plagas y enfermedades con una distancia mínima entre ellos de ~50 m, se tomaron datos dasométricos de cada árbol (altura, diámetro del fuste a la altura del pecho 1.30 m aproximadamente), la edad se determinó con una viruta de madera extraída con un taladro Pressler. En cada árbol seleccionado se contabilizó el número de individuos de *Pinus montezumae* Lamb. en un radio de 20 m, con el propósito de calcular la densidad del arbolado dentro de cada rodal (Bramlett *et al.*, 1977).

De cada árbol se tomó una muestra al azar de 10 conos maduros (Capilla-Dinorin *et al.*, 2021), de forma individual fueron rotulados y trasladados al laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigación en Genética y Ambiente (CIGyA), donde se dejaron en un lugar con sombra y buena ventilación durante un mes para promover la pérdida de humedad.

2.2 Análisis de estróbilo femenino

El análisis de los 400 estróbilos femeninos recolectados en campo se realizó con la metodología mencionada por Bramlett *et al.* (1977). En cada estróbilo se midió la longitud y ancho con un vernier digital (TRUPER), los conos se disectaron con una cuña y se colocaron en una estufa a 70°C durante 48 h para obtener el peso seco (Quiroz-Vazquez *et al.*, 2017).

Las escamas se clasificaron en fértiles e infértiles con el propósito de calcular el potencial de producción de semillas (PPS) (Capilla-Dinorin *et al.*, 2021). Posteriormente se retiró el ala de la semilla (Figura 8-B), y desechar todo aquello que no fueran semillas llenas (Capilla-Dinorin *et al.*, 2021).

Se realizó la clasificación de las semillas llenas y vanas a través del método de flotación con alcohol etílico al 10% (Morales-Velázquez *et al.*, 2010). El método tiene el fundamento del principio de Arquímedes, las semillas llenas se hundieron en el fondo del recipiente porque éstas fueron más densas que el fluido en donde se encontraron estáticas; en comparación con las semillas vanas donde la semilla fue menos densa que el fluido, por lo tanto, éstas flotaron en la superficie (Figura 8-A) (Valcarce, 2007); también se contabilizaron las semillas que presentaron algún tipo de daño causadas por barrenador y debido a la extracción mecánica de esta; finalmente, se determinó la cantidad de óvulos abortados.



Figura 8. A) Método de flotación de semillas; b) disección del estróbilo femenino, clasificación de escamas, de semillas y de óvulos abortados de *Pinus montezumae* Lamb.

2.2.1 Indicadores reproductivos

Partiendo de los resultados que se obtuvieron en el análisis del estróbilo, se calcularon los indicadores reproductivos de acuerdo con lo establecido por Bramlett *et al.* (1977):

El potencial de producción de semilla (PPS): número de escamas fértiles * 2

Semillas desarrolladas: $\Sigma(\text{semillas llenas} + \text{semillas vanas} + \text{semillas dañadas})$

Porcentaje de semillas llenas: $\left(\frac{\text{número de semillas llenas}}{\text{PPS}} \right) * 100$

Porcentaje de semillas vanas: $\left(\frac{\text{número de semillas vanas}}{\text{PPS}} \right) * 100$

Porcentaje de semillas dañadas: $\left(\frac{\text{número de semillas dañadas}}{\text{PPS}} \right) * 100$

Porcentaje de óvulos abortados: $\left(\frac{\text{número de óvulos abortados}}{\text{PPS}} \right) * 100$

Índice de endogamia: $\frac{\text{semillas vanas}}{\text{semillas desarrolladas}}$

Eficiencia reproductiva: $\frac{\text{peso de la semilla}}{\text{peso seco del cono}}$

Se estimó el peso unitario de tres semillas (mg) con una balanza analítica (Adam Equipment ®) y a partir de este dato se estimó el número de semillas por kilogramo.

2.3 Pruebas de germinación

Estas pruebas se realizaron en un recipiente de plástico (20 x 26 cm) lavado y desinfectado con Cloralex ® al 5%, se le agregó sustrato utilizando solo agrolita, que se esterilizó en una autoclave a 18 libras por 18 min. Se desinfectaron las semillas que se utilizaron en la prueba con una solución de hipoclorito de sodio al

5% durante 5 minutos, después se lavaron con abundante agua destilada y se distribuyeron en cada recipiente las semillas que se obtuvieron de cada rodal (Figura 9), finalmente cada caja quedo sellada con una tapa hermética (Capilla-Dinorin *et al.*, 2021).

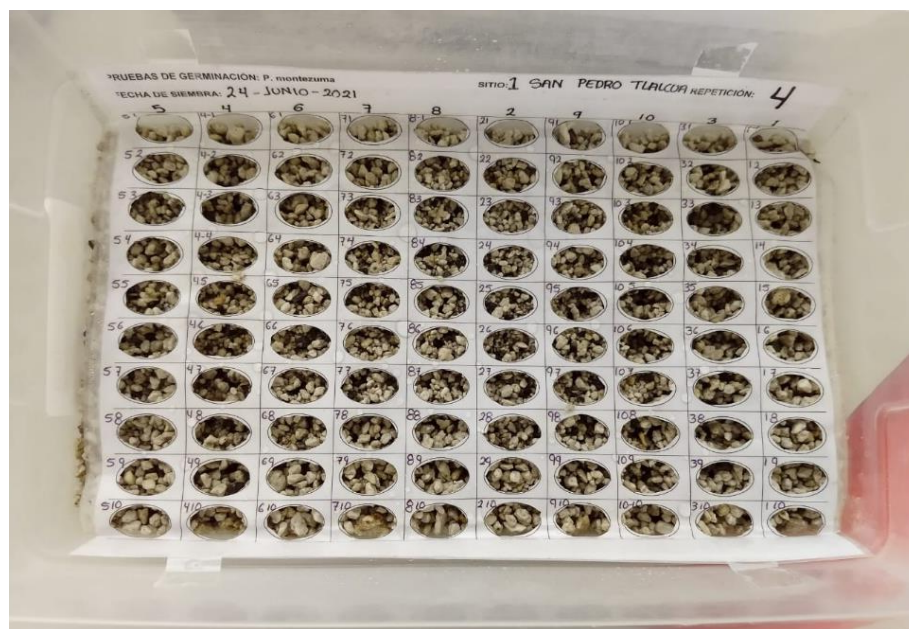


Figura 9. Distribución de las semillas de *Pinus montezumae* Lamb. para las pruebas de germinación.

La prueba de germinación se basó en cuatro repeticiones cada una de 100 semillas por rodal, las cajas estuvieron bajo condiciones de temperatura controlada (25°C) el análisis duró 25 días y las semillas se revisaron diariamente (ISTA, 2016), con el propósito de observar la emergencia de la radícula la cual sobresalió de la testa aproximadamente 3 mm de longitud (Figura 10) (Velasco-García *et al.*, 2022), el cual es el cambio morfológico visible para considerar a una semilla como germinada (Kolotelo *et al.*, 2001).

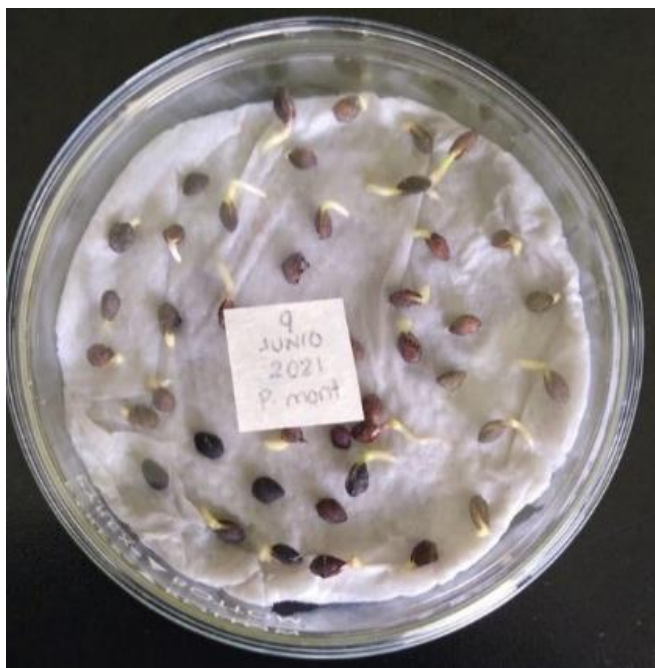


Figura 10. Semillas germinadas de *Pinus montezumae* Lamb.

Con la prueba de germinación se evaluaron las variables que se describen a continuación:

- 1) Capacidad germinativa (CG); es el porcentaje de germinación al final de la prueba (Velasco-García *et al.*, 2022)

$$CG = \left(\frac{\text{\# de semillas germinadas}}{\text{\# total de semillas utilizadas en la prueba}} \right) * 100$$

- 2) Valor pico de germinación (VP); es el porcentaje de acumulación en el punto de inflexión de la curva de germinación (Velasco-García *et al.*, 2022)

$$VP = \frac{\text{Valor máximo de germinación acumulada}}{\text{días acumulados}}$$

- 3) Germinación media diaria (GMD) (Kolotelo *et al.*, 2001; Velasco-García *et al.*, 2022).

$$GMD = \frac{\text{\% final de semillas germinadas}}{\text{número de días de la prueba}}$$

- 4) Germinación al 50% (GER50); es el tiempo necesario para alcanzar el cincuenta por ciento de la germinación final (Velasco-García *et al.*, 2022)

- 5) El valor de germinación (VG); se utilizó la fórmula de Czabator (1962), este valor es el resultado de la velocidad y la integridad de la germinación (Meza-Cota *et al.*, 2022).

$$VG = GMD * VP$$

2.4 Análisis del crecimiento inicial de las plántulas

Se realizaron pruebas de crecimiento inicial con las plántulas provenientes de la prueba de germinación, estas se trasplantaron a tubetes individuales de 320 mL cuyo contenido era una mezcla de sustrato, 50 % de corteza composteada, 25 % de turba, 15 % de agrolita y 10 % de vermiculita (Aguilera-Rodríguez *et al.*, 2016), al sustrato se añadió fertilizante de liberación controlada Multicote ® y Natucontrol Trichoderma®, aplicando un riego diariamente.

A los 20 días después del trasplante se tomó una muestra completamente al azar de 10 plántulas de cada población para contabilizar el número de hojas cotiledonares (NHC), longitud promedio de las hojas cotiledonares (LHC) y la longitud del hipocótilo (LH).

A los 10 meses después del trasplante se evaluó en una muestra de plantas tomadas al azar en cada población y se evaluó la altura total (cm), diámetro del cuello de la raíz (mm), biomasa aérea y radical para calcular el índice de esbeltez y el índice de calidad de Dickson en una muestra de plantas de *P. montezumae* Lamb. (Figura 11) (Rodríguez-Trejo, 2008; León-Sánchez *et al.*, 2019; Meza-Cota *et al.*, 2022).



Figura 11. Selección de muestras de *Pinus montezumae* Lamb. para determinar la calidad de la planta

Con el índice de esbeltez se evaluó la proporción entre el crecimiento en altura y el diámetro del tallo (Sáenz *et al.*, 2014).

$$E = \left(\frac{h}{d} \right) * 100$$

Donde:

h: altura de la plántula y

d: diámetro a la base

El índice de calidad de Dickson es ampliamente utilizado y permitió evaluar plantas forestales a través de características morfológicas (Sáenz *et al.*, 2014). A continuación, se muestra el modelo que se utilizó basado en cinco variables morfológicas (Rodríguez-Trejo, 2008):

$$QI = p/(h/d) + (pa/ps)$$

Donde:

QI: índice de calidad

p: peso anhidrido total de la planta (g)

h: la altura (cm)

d: diámetro (mm)

pa: peso anhidrido de la parte aérea (g)

ps: peso anhidrido de la parte subterránea (g)

2.5 Determinación de propiedades físicas y químicas del suelo

En época de estiaje se recolectó una muestra simple de suelo litosférico de cada árbol de *P. montezumae* Lamb. a una profundidad de 0-10 cm, el número total de muestras fue de 40.

Cada muestra se etiquetó para su posterior identificación en el laboratorio. Se pusieron a secar a la sombra y a temperatura ambiente. Posteriormente se tamizaron con una malla de 2 mm de abertura para eliminar residuos y homogeneizar el tamaño de la partícula de acuerdo con lo que indica la NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002).

Dentro de las propiedades que se determinaron fueron la textura por el método del hidrómetro de Bouyoucos (NOM-021-SEMARNAT-2000) (DOF, 2002), densidad aparente por el método de la probeta (NMX-FF-109-SCFI-2008) (DOF, 2002), porosidad por fórmula de Porta (Porta *et al.*, 2008), el pH a través de la relación suelo:agua 1:2 p/v, materia orgánica por el método de oxidación en húmedo con dicromato de potasio, carbono orgánico por fórmula de Jackson (Jackson, 1976) y el P extractable (Bray y Kurtz) (NOM-021-SEMARNAT-2000) (DOF, 2002).

Para determinar la concentración de los iones amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-) las muestras se enviaron al Laboratorio Nacional de investigación y Servicio Agroalimentario y Forestal (LANISAF) de la Universidad Autónoma Chapingo. En la tabla 3 se muestran las condiciones edáficas del suelo bajo la influencia de *P. montezumae*.

Tabla 3. Propiedades físicas y químicas de los suelos bajo la influencia de *Pinus montezumae* Lamb. en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala.

Propiedades	Ixtenco	Altamira	San Bartolomé	San Pedro	NOM-021-SEMARNAT-2000
Densidad aparente (g cm^3)	1.19	1.08	1.24	1.14	<1 [†]
Porosidad (%)	55.2	59.1	53.4	57.2	50 [§]
Clase de textura			Arenosa		
pH	3.6	3.5	4.4	4.4	< 5.0 [†]
Materia orgánica (%)	3.6	6.7	3.3	4.8	<4.0, 4.1-6.0, 6.1-10.9 [†]
Carbono orgánico (%)	2.0	3.9	1.9	2.8	1.2-2.9, 2.9-4.6 [*]
P extractable (mg kg^{-1})	54.8	57.1	55.1	52.6	> 30 [†]
NH_4^+ (mg kg^{-1})	3.0	6.8	4.4	4.6	-----
NO_3^- (mg kg^{-1})	1.4	1.7	2.3	1.5	4 [¶]

[†]NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002); [§]Jaramillo (2002); [¶]Vázquez (1997).

2.6 Análisis estadístico

2.6.1 Análisis de cono

A los datos de los conos se les realizó la prueba de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianza, posteriormente se analizaron a través de un ANOVA en el programa estadístico InfoStat para determinar las diferencias entre poblaciones y árboles dentro de poblaciones bajo el siguiente modelo lineal de efectos mixtos.

$$Y_{ijk} = \mu + P_i + A_{j(i)} + e_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} es la observación de k-ésimo cono del j-ésimo árbol de la i-ésima población; μ es la media poblacional; P_i es el efecto de la i-ésima población; $A_{j(i)}$ es el efecto del j-ésimo árbol dentro de la i-ésima población; e_{ijk} es el error experimental del muestro por el análisis de cono.

2.6.2 Pruebas de germinación

Para el análisis de las pruebas de germinación se realizó la prueba de normalidad y homogeneidad de varianza. La variable capacidad germinativa se transformó con la función arcoseno de la raíz cuadrada de p ($\theta = \arcseno \sqrt{p}$), donde θ fue el dato transformado y p es la capacidad germinativa sin transformar; a continuación, se realizó un ANOVA bajo el siguiente modelo lineal:

$$Y_{ij} = \mu + R_i + P_j + e_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} es el valor de la característica de la j-ésima población en el i-ésimo bloque; μ es la media poblacional; R_i es el efecto aleatorio de la i-ésima repetición; P_j es el efecto de la j-ésima población; e_{ij} es el error experimental.

2.6.3. Análisis del crecimiento inicial

Se llevó a cabo un ANOVA y una prueba de comparación de medias Tukey bajo el siguiente modelo estadístico:

$$Y_i = \mu + P_i + e_i$$

Donde:

Y_i es el valor de la característica de la i -ésima población; μ es el efecto de la media general; P_i es el efecto de la i -ésima población y e_i es el error experimental.

2.6.4 Análisis de correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson se utilizó para analizar y determinar si existe un patrón de asociación entre las variables morfológicas de conos y semillas con las variables ambientales. Mientras que los datos de temperatura y precipitación media anual se obtuvieron a través de interpolaciones con ANUSPLIN, software para modelar datos climáticos considerando la latitud (Ortiz-Bibian *et al.*, 2017).

III. RESULTADOS

Las características morfológicas de los estróbilos femeninos (largo y ancho de cono, peso seco) que se recolectaron en el invierno de 2020 (noviembre 2020 - enero 2021) dentro del Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala y los indicadores reproductivos de *Pinus montezumae* Lamb. determinados en este estudio mostraron diferencias significativas entre árboles dentro de cada rodal y entre rodales, excepto en el número total de escamas (Tabla 4).

3.1 Características del estróbilo femenino de *Pinus montezumae* Lamb.

Se observó diferencia significativa entre los valores promedios del peso seco del cono dentro y entre rodales. San Bartolomé tuvo los conos más ligeros (47.4 g), seguido de los de San Pedro, Altamira y finalmente Ixtenco, en este último sitio los conos seleccionados fueron los de mayor peso (56.3 g) (Tabla 4).

El peso del cono está asociado con el largo y ancho del estróbilo, San Bartolomé tiene los valores más bajos del largo (104.6 mm) y ancho (38.9 mm), por lo tanto, son los más ligeros en peso con respecto a los otros tres rodales que se estudiaron. Sin embargo, los conos del rodal de San Pedro presentaron medidas similares a los de San Bartolomé. Mientras que los del rodal de Ixtenco presentaron los conos más largos (126.8 mm), más anchos (43.1 mm), por lo tanto, los estróbilos de mayor peso (Tabla 4).

El número de escamas por conos de *P. montezumae* en el Parque Nacional La Malinche no mostraron diferencia significativa entre los rodales ($p = 0.9280$); sin embargo, entre individuos dentro de cada rodal si existe diferencia significativa ($p = 0.0001$).

Ixtenco tuvo mayor número de escamas fértiles con el 62.4 % y San Pedro con menor número 57 % y una mayor cantidad de escamas infértiles (43 %) respecto a los demás rodales (Tabla 4).

3.2 Indicadores reproductivos de *Pinus montezumae* Lamb.

El potencial de producción de semillas (PPS) representa la capacidad máxima biológica que tiene un estróbilo femenino para producir semillas y está en función al número de escamas fértiles; por lo tanto, el promedio del potencial de producción de semillas para *P. montezumae* en los cuatro rodales de “La Malinche” que fueron analizados son de 191 semillas / cono, sin embargo, Ixtenco fue el sitio con mayor PPS (204 semillas/cono) en la recolecta de invierno 2020.

Respecto a las semillas desarrolladas (semillas con testa, Figura 12-A y 12-B) Ixtenco tuvo un mayor porcentaje (79 %); seguido de Altamira (74 %). Finalmente, los sitios con el menor número de semillas desarrolladas fueron en San Pedro (61 %) y San Bartolomé (56 %), ambos rodales no mostraron diferencia significativa (Tabla 4).

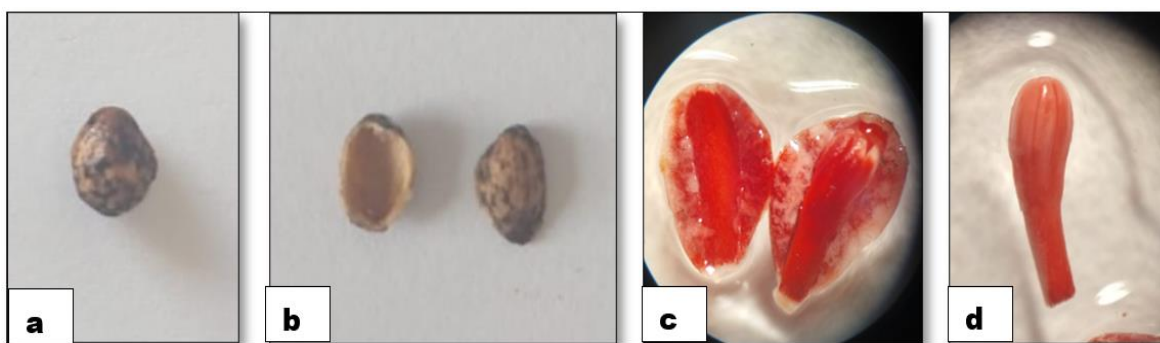


Figura 12. Componentes de la semilla de *Pinus montezumae* Lamb. a) semilla madura; b) testa; c) endospermo y embrión viable (tinción con tetrazolio); d) embrión viable (tinción con tetrazolio).

El promedio global en el análisis de la proporción de semillas llenas (Figura 12-C y 12-D) o también nombrada “eficiencia en la producción de semillas” fue de 36 % respecto del número potencial de producción de semillas. Sin embargo, los estróbilos recolectados en el rodal de San Bartolomé fue el menos eficiente (58 semillas llenas/cono); en seguida se encuentran San Pedro (65 semillas llenas/cono) y Altamira (70 semillas llenas/cono) ambos sitios no mostraron diferencia significativa entre ellos. Cabe resaltar que Ixtenco fue el rodal más eficiente, se contabilizaron en promedio 85 semillas llenas por estróbilo maduro (Tabla 4).

Los resultados indican que el porcentaje promedio de semillas vanas (semillas sin embrión) en “La Malinche” fue de 24 %. En la Tabla 4 se muestra el rodal de Ixtenco como es el más eficiente en la producción de semillas llenas, pero también es el que produjo una mayor cantidad de semillas vanas (26.2 %). De forma contraria a San Bartolomé (43 semillas vanas/cono) y San Pedro (38 semillas vanas/cono).

El ataque de insectos disminuyó la producción de semilla en las poblaciones entre 3.2% (San Bartolomé) hasta el 10.76 % (Ixtenco), causando una reducción en la producción dentro de los rodales del Parque Nacional La Malinche (Figura 13).

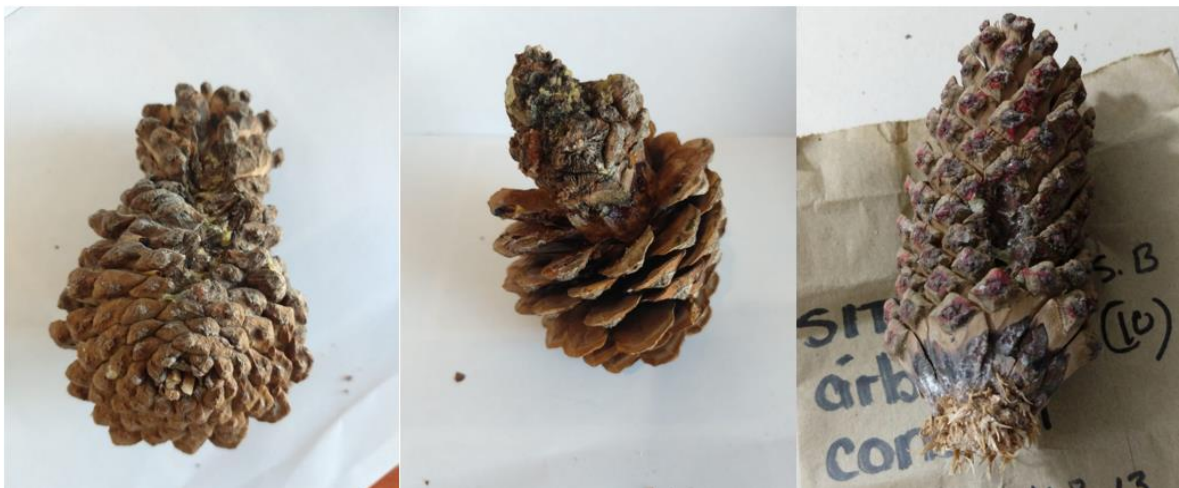


Figura 13. Conos de *Pinus montezumae* Lamb. plagados por barrenadores en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala.

Ixtenco y Altamira fueron los rodales con menor número de óvulos abortados/estróbilo (44 y 49, respectivamente), en comparación con San Pedro (71 óvulos abortados y San Bartolomé (82 óvulos abortados) en el cual se observaron los valores altos. El promedio de los cuatro sitios fue de 32 % de óvulos abortados/estróbilo femenino en los rodales de “La Malinche” en la cosecha de invierno 2020.

El índice de endogamia representa el grado de depresión por consanguinidad dentro de las poblaciones (Figura 14). San Bartolomé fue el sitio con el valor más alto de depresión endogámica (0.40), seguido de Altamira, San Pedro y al final Ixtenco (0.33).



Figura 14. Embrión con anormalidad (izquierda); embrión sano (derecha).

En el Parque Nacional La Malinche la especie que se analizó invierte en promedio 0.03 mg g^{-1} de energía para producir una semilla; pero también se muestra como Ixtenco fue el rodal menos eficiente, ya que necesita invertir una mayor cantidad de energía para la formación de semillas (0.04 mg g^{-1}) pero no generó semillas más grandes (23 mg/semilla unitaria), Altamira fue el sitio más eficiente al invertir 0.03 mg g^{-1} de energía para formar semillas grandes (24 mg/semilla individual) en los sitios de “La Malinche”.

En relación con el número de semillas totales por kilogramo, en Altamira hay menor cantidad de semilla en comparación con San Pedro el cual tuvo el mayor número de semillas y se asocia con las características geométricas y peso de la semilla, (Tabla 4).

Tabla 4. Medias $\pm$ error estándar de las características morfológicas de estróbilos e indicadores reproductivos de semilla de cuatro rodales de *Pinus montezumae* Lamb. en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala.

Características	Significancia (valor de P)		Valores medios			
	Sitios	Sitios (árboles)	Ixtenco	Altamira	San Bartolomé	San Pedro
PSC (g)	0.0001	0.0001	56.3 $\pm$ 1.3 a	56.0 $\pm$ 1.9 ab	47.4 $\pm$ 1.3 c	53.6 $\pm$ 2.3 bc
LC (mm)	0.0023	0.0001	126.8 $\pm$ 1.4 a	128.4 $\pm$ 1.7 a	104.6 $\pm$ 1.7 b	111.2 $\pm$ 2.12 b
DC (mm)	0.0001	0.0001	43.1 $\pm$ 0.6 a	39.3 $\pm$ 0.4 b	38.9 $\pm$ 0.4 b	40.3 $\pm$ 0.4 b
ET	0.9280	0.0001	164.0 $\pm$ 1.7 a	162.9 $\pm$ 1.8 a	159.8 $\pm$ 2.3 a	160.5 $\pm$ 2.9 a
No. EF	0.0012	0.0001	102.3 $\pm$ 2.0 a	94.4 $\pm$ 2.0 b	94.4 $\pm$ 2.0 b	91.4 $\pm$ 2.0 b
No. EI	0.0061	0.0001	61.7 $\pm$ 1.2 b	68.6 $\pm$ 1.7 a	65.4 $\pm$ 1.7 ab	69.0 $\pm$ 1.8 a
PPS	0.0012	0.0001	204.7 $\pm$ 4.0 a	188.8 $\pm$ 4.0 b	188.7 $\pm$ 4.0 b	182.9 $\pm$ 4.1 b
TDS	0.0091	0.0001	163.5 $\pm$ 5.4 a	142.7 $\pm$ 4.8 b	106.3 $\pm$ 4.0 c	108.9 $\pm$ 3.4 c
SLL (%)	0.0001	0.0001	41.5 $\pm$ 1.6 a	37.1 $\pm$ 1.6 b	30.5 $\pm$ 1.6 c	35.1 $\pm$ 1.6 b
SV (%)	0.0001	0.0001	26.2 $\pm$ 1.1 a	27.3 $\pm$ 1.1 a	22.4 $\pm$ 1.1 b	20.2 $\pm$ 1.2 b
Sd (%)	0.0001	0.0001	10.8 $\pm$ 0.6 a	9.6 $\pm$ 0.6 a	3.2 $\pm$ 0.6 c	5.2 $\pm$ 0.7 b
OA (%)	0.0001	0.0001	21.5 $\pm$ 0.9 c	26.1 $\pm$ 0.9 c	43.9 $\pm$ 0.9 a	39.5 $\pm$ 0.9 b
IE	0.0279	0.0001	0.33 $\pm$ 0.02 c	0.38 $\pm$ 0.02 ab	0.40 $\pm$ 0.02 a	0.35 $\pm$ 0.02 bc
PUS (mg)	0.0001	0.0016	23 $\pm$ 0.06 ab	24 $\pm$ 0.04 a	23 $\pm$ 0.06 ab	22 $\pm$ 0.06 b
Semillas por kilogramo	0.0001	0.0001	43746 $\pm$ 1399 ab	42586 $\pm$ 1399 ab	42185 $\pm$ 1406 b	48219 $\pm$ 1428 a
Eficiencia reproductiva. (mg/g)	0.0001	0.0001	0.04 $\pm$ 0.002 a	0.03 $\pm$ 0.002 ab	0.03 $\pm$ 0.001 b	0.03 $\pm$ 00.01 b

PSC: peso seco del cono; LC: longitud de cono; DC: diámetro del cono; ET: escamas totales; No. EF: número de escamas fértiles; No. EI: número de escamas infértiles, PPS: potencial de producción de semillas; TDS: total de semillas desarrolladas; SLL: semillas llenas; SV: semillas vanas; Sd: semillas dañadas; OA: óvulos abortados; IE: índice de endogamia; PUS: peso unitario de la semilla.

Nota: medias con diferentes letras son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$), ordenadas de menor a mayor elevación

3.3 Análisis de la calidad de la semilla de *Pinus montezumae* Lamb.

La tendencia de la curva de la capacidad germinativa mostró que las semillas del sitio de San Pedro fueron más vigorosas y la velocidad de germinación fue superior al de los demás sitios (Figura 15).

Las semillas procedentes del rodal de Altamira iniciaron el proceso de germinación al sexto día después de la siembra, es decir la semilla mostró ser precoz en comparación con los demás sitios.

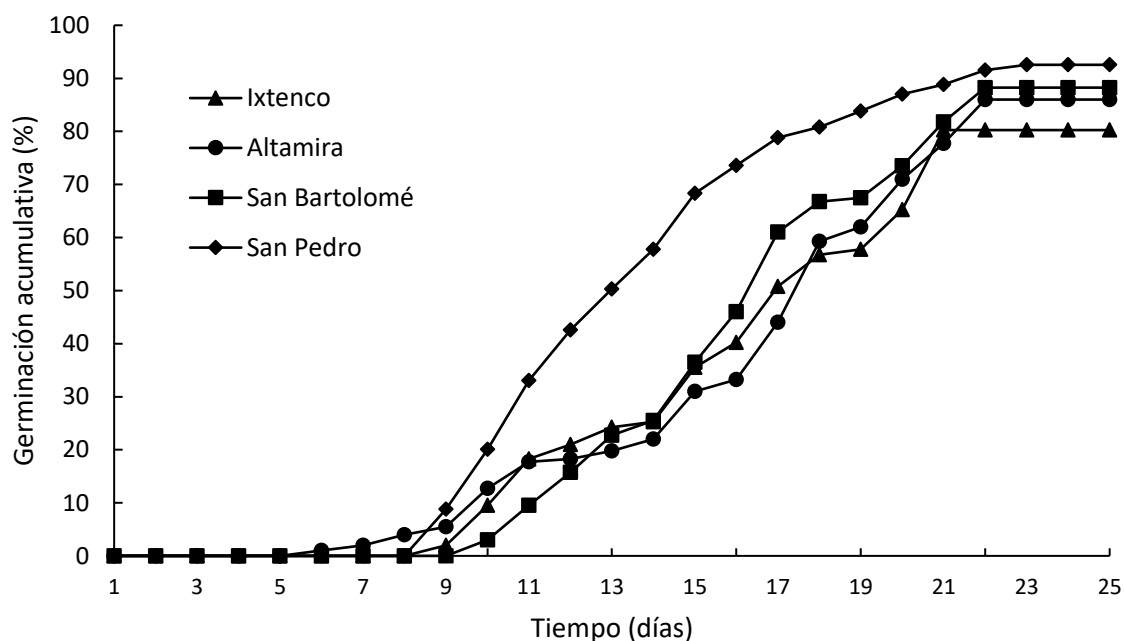


Figura 15. Capacidad germinativa de semillas de *Pinus montezumae* Lamb. en el Parque Nacional La Malinche

En la Figura 16 se muestra de forma individual la curva de germinación de cada rodal y en la Tabla 5 se puede observar el número de días necesarios para alcanzar el 50% de la germinación al final de la prueba.

Los rodales de Ixtenco, Altamira y San Bartolomé presentaron cierta predisposición en la curva al observarse etapas de meseta y de crecimiento de la curva de una forma irregular, por lo que la germinación de las semillas que proceden de estos tres rodales no se dio de forma uniforme.

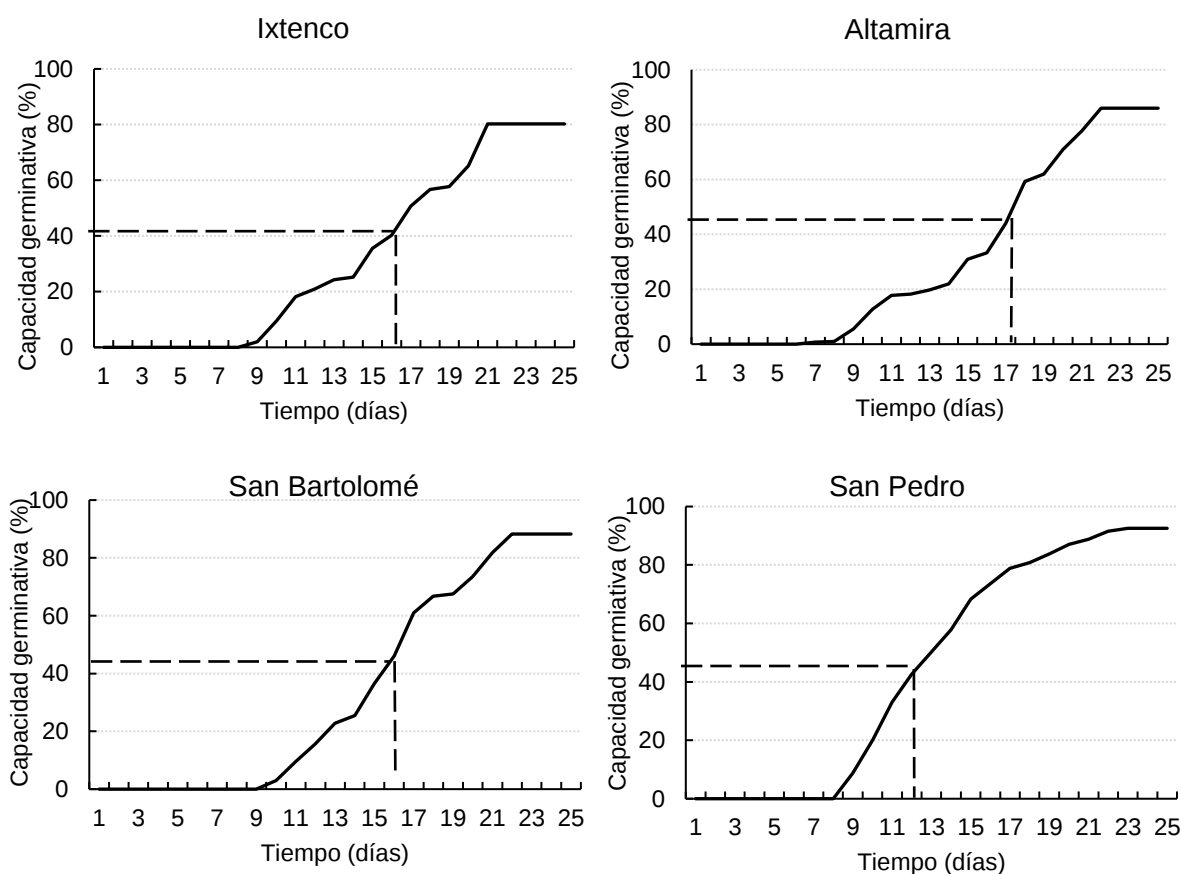


Figura 16. Graficas de curva de germinación de *Pinus montezumae* Lamb.

La germinación oscila entre 80.3% (valor mínimo) en el rodal de Ixtenco, hasta el 92.5% en San Pedro y representó el valor máximo de la capacidad germinativa; sin embargo, el promedio de la capacidad germinativa de los cuatro rodales fue de 84% (Tabla 5).

Las semillas del rodal de Altamira comenzaron a germinar en los primeros días comparado con los demás sitios, sin embargo este sitio necesita más días (17) para alcanzar el 50% de la germinación debido a la irregularidad del proceso de emergencia de la semilla. Sin embargo, este rodal no es estadísticamente diferente a Ixtenco y San Bartolomé que también requieren de más días para alcanzar el porcentaje de germinación final, pero si son diferentes de San Pedro ($p = 0.0002$) el cual al día 12 ya había alcanzado el GER50 de las semillas germinadas (Tabla 5).

El valor germinativo ($p = 0.0037$) fue mayor en San Pedro y con este indicador se puede afirmar que existió una mayor uniformidad y velocidad de germinación, ya que integra los parámetros de valor pico y germinación media diaria (Tabla 5).

Tabla 5. Medias $\pm$ error estándar de la calidad de las semillas de las poblaciones de *Pinus montezumae* Lamb. en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala

	Ixtenco	Altamira	San Bartolomé	San Pedro
CG (%)	80.3 $\pm$ 2.6 b	86.0 $\pm$ 2.5 ab	88.3 $\pm$ 1.9 ab	92.5 $\pm$ 1.3 a
GER50 (días)	15.8 $\pm$ 0.8 a	17.0 $\pm$ 0.4 a	15.8 $\pm$ 0.48 a	12.3 $\pm$ 0.2 b
VP (%)	3.91 $\pm$ 0.1 b	3.94 $\pm$ 0.1 b	4.10 $\pm$ 0.1 b	4.67 $\pm$ 0.1 a
GMD (%)	3.21 $\pm$ 0.1 b	3.44 $\pm$ 0.1 ab	3.53 $\pm$ 0.1 ab	3.70 $\pm$ 0.1 a
VG	12.6 $\pm$ 0.8 b	13.6 $\pm$ 0.7 b	14.5 $\pm$ 0.7 ab	17.3 $\pm$ 0.6 a

CG, Capacidad germinativa; GER50, Germinación al 50%; VP, Valor pico; GMD, Germinación media diaria; GV, Valor Germinativo.

Nota: medias con diferentes letras son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$), ordenadas de menor a mayor elevación

3.4 Análisis de la calidad de planta

De acuerdo con el análisis de las plántulas que se evaluó a los 40 días después de la siembra las plantas del rodal de San Pedro tuvo los valores altos en el desarrollo inicial de la plántula, en lo que se refiere a la longitud del hipocótilo (Tabla 6). El largo de las hojas cotiledones no mostró diferencia significativa ($p= 0.1134$) entre las plántulas de los cuatro rodales que se analizaron en La Malinche (Tabla 6).

Tabla 6. Media $\pm$ error estándar del análisis de plántula y planta de *Pinus montezumae* Lamb. en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala

	Significancia (valor de P)	Ixtenco	Altamira	San Bartolomé	San Pedro
Long. Hipocot	<0.0001	1.10 $\pm$ 0.05 c	1.05 $\pm$ 0.04 c	2.00 $\pm$ 0.08 b	2.48 $\pm$ 0.13 a
Long, Cotil.	0.1134	2.75 $\pm$ 0.10 a	2.64 $\pm$ 0.09 a	2.93 $\pm$ 0.08 a	2.70 $\pm$ 0.08 a
No. Cotil.	0.0394	7 $\pm$ 0.13 ab	6 $\pm$ 0.16 b	7 $\pm$ 0.11 ab	7 $\pm$ 0.12 a
ALT	<0.0001	15.1 $\pm$ 1.7 b	10.6 $\pm$ 0.8 b	23.3 $\pm$ 1.7 a	28.8 $\pm$ 2.4 a
DIAM	<0.0001	7.80 $\pm$ 0.33 a	7.88 $\pm$ 0.49 a	5.54 $\pm$ 0.38 b	5.24 $\pm$ 0.33 b
ESB	<0.0001	1.93 $\pm$ 0.18 b	1.42 $\pm$ 0.17 b	4.47 $\pm$ 0.52 a	5.70 $\pm$ 0.51 a
DICK	<0.0001	1.43 $\pm$ 0.08 a	1.20 $\pm$ 0.10 a	0.82 $\pm$ 0.11 b	0.62 $\pm$ 0.07 b

Long. Hipocot= Longitud hipocótilo; Long. Cotil. = Longitud cotiledonar; No.Cotil.= Número de cotiledones; ALT= Altura; DIAM= Diámetro; ESB= Esbeltez; DICK= Dickson

Nota: medias con diferentes letras son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$) , ordenadas de menor a mayor elevación

En la evaluación que se realizó 10 meses después del trasplante, se observó que las plantas con el hipocótilo más pequeño (Altamira) fueron las de menor altura (cm) al final de la evaluación, contrario a las de San Pedro que tuvieron el hipocótilo más alto (2.4 cm) presentaron las plantas más altas (28.8 cm). En general las plantas tuvieron un diámetro en el cuello de la raíz superior a 5 mm, pero se observó que las plantas más altas no fueron precisamente las más gruesas en tallo (Tabla 6).

La relación entre la altura y diámetro (índice de esbeltez) varió desde 5.7 hasta 1.4, esta información arroja la existencia entre un balance en el crecimiento y el

desarrollo del tallo (≤ 6); por lo tanto, en Ixtenco y Altamira crecen árboles más bajos y gruesos comparados con San Bartolomé y San Pedro.

Los valores del índice de calidad de Dickson fueron superiores a 0.5, por lo tanto, las plantas de los cuatro rodales del Parque Nacional La Malinche presentan un equilibrio entre la robustez y la distribución de las masas aéreas y subterráneas (Figura 17).



Figura 17. Plántulas de *Pinus montezumae* Lamb. a los 10 meses posteriores a la germinación que provienen del Parque Nacional La Malinche de los rodales de Ixtenco (31); Altamira (21); San Bartolomé (11); San Pedro (1).

3.5 Análisis de correlación

En la Tabla 7 se muestran los valores del análisis de correlación de Pearson entre características morfológicas del estróbilo e indicadores reproductivos de la semilla con variables climáticas (temperatura y precipitación) y propiedades edáficas (ver Tablas 2, 3 y 4).

Las variables ambientales tuvieron una influencia sobre los indicadores reproductivos (Tabla 7) destacando la correlación de la T °C, precipitación y altitud sobre la longitud del cono (LC) y el total de semillas desarrolladas (TDS). Sin embargo, la cantidad de óvulos abortados tuvo una moderada correlación con la precipitación ($r = 0.66$) y la altitud ($r = -0.56$) (Tabla 7).

En su mayoría, las variables edáficas tuvieron una baja correlación negativa, como fue el grado de acidez del suelo (pH) con valores menores a una $r = 0.26$. De la misma manera el contenido de nitratos (NO_3^-) influyó negativamente con la morfología del estróbilo femenino e indicadores reproductivos a excepción de la proporción de óvulos abortados (OA%) el cual tiene un valor de Pearson de 0.4, lo que significa que a mayor concentración de fósforo existirá un incremento en la proporción de óvulos abortados, aunque también puede tener una baja relación con el diámetro del estróbilo ($r = -0.36$) (Tabla 7).

Tabla 7. Correlación de variables climáticas y edáficas con variables morfológicas de cono e indicadores reproductivos de *Pinus montezumae* Lamb.

	PSC	LC	DC	PPS	TDS	SLL (%)	SV (%)	Sd (%)	OA (%)	IE	PUS	ER	Altitud	T°C	PRE	pH	P
LCono	0.74	1															
DCono	0.71	0.38	1														
PPSem	0.55	0.61	0.35	1													
TDSem	0.35	0.48	0.14	0.69	1												
SLL (%)	0.04	0.06	0.04	0.13	0.55	1											
SVana (%)	-0.0048	0.1	-0.08	0.1	0.37	-0.26	1										
Sd (%)	0.14	0.24	-0.02	0.12	0.32	-0.11	0.08	1									
OA (%)	-0.09	-0.27	0.1	-0.15	-0.73	-0.56	-0.41	-0.36	1								
IEndo	-0.1	-0.05	-0.12	-0.06	-0.15	-0.71	0.78	-0.12	0.13	1							
PUSem	0.63	0.48	0.58	0.22	-0.04	-0.24	-0.04	0.05	0.15	0.05	1						
ERepro	-0.03	0.09	0.0023	0.33	0.61	0.88	-0.22	-0.09	-0.51	-0.62	-0.09	1					
Altitud	0.16	0.38	-0.03	-0.03	0.31	0.19	0.26	0.28	-0.56	-0.0016	0.01	0.12	1				
Temp	-0.18	-0.47	0.08	-0.05	-0.34	-0.17	-0.19	-0.38	0.6	0.05	-0.08	-0.15	-0.88	1			
Precip	-0.16	-0.48	0.15	-0.15	-0.47	-0.21	-0.22	-0.43	0.66	0.07	-0.1	-0.24	-0.64	0.79	1		
pH	-0.16	-0.26	-0.11	0.02	-0.13	-0.1	-0.12	-0.08	0.26	-0.02	-0.03	-0.0021	-0.55	0.47	0.47	1	
P	-0.04	0.23	-0.36	-0.13	-0.0017	-0.14	0.22	0.1	-0.22	0.19	0.12	-0.07	0.45	-0.44	-0.41	-0.13	1
NO ₃	-0.21	-0.33	-0.22	-0.12	-0.32	-0.23	-0.07	-0.28	0.4	0.15	-0.01	-0.16	-0.47	0.56	0.51	0.42	0.31

PSCono: peso seco del cono; LCono: longitud de cono; DCono: diámetro del cono; PPSem: potencial de producción de semillas; TDSem: total de semillas desarrolladas; SLL: semillas llenas; SVana: semillas vanas; Sd: semillas dañadas; OA: óvulos abortados; IEndo: índice de endogamia; PUSem: peso unitario de la semilla, ERepro : Eficiencia reproductiva; Temp: temperatura; Precip: precipitación; P : concentración de fosforo; NO₃:concentración del ion nitrato

IV. DISCUSIÓN

4.1 Morfología e indicadores reproductivos del estróbilo femenino de *Pinus montezumae* Lamb.

De manera general, el largo (118 mm) y ancho (40 mm) de los estróbilos de *P. montezumae* que provienen del Parque Nacional La Malinche tuvieron valores inferiores al compararlos con los datos que registró Rodríguez-Franco (1997) para esta especie en la región centro de México, donde la longitud promedio fue de 143 mm y 49 mm de ancho; mientras que Perry (1991) registró una longitud del estróbilo de 120 a 150 mm.

La variación en las características morfológicas de los estróbilos femeninos está en función a diversos factores genéticos-ambientales que experimentó cada árbol (Rodríguez de Francisco, 2016). Las especies presentan diferentes adaptaciones a las condiciones climáticas y propiedades edáficas para formar diferentes fenotipos como la capacidad de respuesta heterogénea a las condiciones adaptativas (Gianoli y Cabrera, 2004; Rodríguez-Franco, 1997; Sáenz-Romero *et al.*, 2016).

De manera particular la longitud de los conos del rodal de Ixtenco (126.8 mm largo y 43.1 mm ancho) y Altamira (128.4 mm largo y 39.3 mm ancho) tienen valores similares a lo que describe Perry (1991) para la especie. Sin embargo, los de San Pedro (111.2 mm de largo y 40.3 mm de ancho) y San Bartolomé (104.6 mm de largo y 38.9 mm de ancho) tuvieron valores inferiores respecto a la información de Rodríguez-Franco (1997) y Perry (1991). Por lo tanto, existe una gran variabilidad intraespecífica de las características morfológicas de los conos de *P. montezumae* dentro y entre los rodales como resultado de un mecanismo de respuesta de los individuos a los diferentes factores bióticos y abióticos (Galindo *et al.*, 2020).

4.1.1 Potencial de producción de semilla

En general, se determinó que cada estróbilo de *P. montezumae* tiene el potencial de producir 191 semillas/ cono en el Parque Nacional La Malinche; sin embargo, este valor fue inferior al compararlo con lo que reportó Delgado-Valerio (1994) donde se estimó un potencial de 219 semillas /cono en poblaciones naturales de *P. montezumae* en el estado de Michoacán.

Existe cierta relación entre el PPS y la longitud del cono, algunos ejemplos son *P. pseudostrobus* la cual tiene un PPS de 266 semillas/cono (Aragón-Peralta *et al.*, 2020) y una longitud promedio de 80 a 100 mm (Perry, 1991), *P. cooperi* con 65-92 semillas/cono (Martínez-Rivas *et al.*, 2020) y 60-100 mm de largo (Perry, 1991); *P. leiophylla* 53-61 (Morales-Velázquez *et al.*, 2010; Delgado-Valerio, 1994) y 50- 80 mm de largo (Perry, 1991). Por lo tanto, el número de semillas (PPS) está en función a la longitud del cono y número de escamas fértiles del estróbilo (Mosseler *et al.*, 2000) por lo que el largo de los estróbilos en las poblaciones de La Malinche representó una ventaja para la reproducción ($r = 0.61$) (Tabla 7) en conclusión cuando más largos sean los estróbilos tendrá a aumentar el número de semillas; además Aragón-Peralta *et al.*, (2020) reconocen que las variables climáticas principalmente temperatura y precipitación tienen una relación con el PPS.

4.1.2. Semillas desarrolladas

En promedio se formaron 130 semillas con la presencia de una cubierta externa, pero existe una menor producción de semillas desarrolladas en La Malinche al comparar este valor con lo que reportó Delgado-Valerio (1994) 172 semillas desarrolladas/cono e incluso con los datos de Rodríguez-Franco (1997) con un valor de 144 semillas desarrolladas en poblaciones de la misma especie.

Ixtenco fue el sitio con más semillas desarrolladas (163 semillas /cono). Esta variable tiene una relación con el PPS ($r = 0.69$) ya que existe una mayor probabilidad de generar una semilla con una cubierta externa; también algunas variables climáticas: temperatura ($r = - 0.34$); precipitación ($r = - 0.47$) y altitud ($r = 0.31$).

4.1.3 Eficiencia en la producción de semillas llenas

El promedio global de la eficiencia productiva fue de 36 % (70 semillas/cono) respecto al potencial de producción de semilla (Tabla 4), superior a lo reportado por Rodríguez-Franco (1997) donde se mencionan 52 semillas/cono, pero Delgado-Valerio (1994) reportó valores superiores de semillas llenas (68 %).

La presencia de árboles vecinos de otras especies puede actuar como barrera física e impedir la polinización cruzada (Figura 7) (Ramírez-Mandujano *et al.*, 2017), como fue el caso de San Bartolomé donde solo el 60 % de la superficie la ocupa *P. montezumae* y el resto de los individuos fueron del género de *Quercus*, *Arbutus* y otros pinos, por lo tanto solo se produjo 30.5 % de semillas llenas; en San Pedro el 67 % de árboles fueron *P. montezumae* y el resto de *Quercus* sp., *Arbutus* sp., *Abies* sp., y otros pinos, y tan solo se generó 35.1 % de semillas llenas; en el rodal de Altamira el 72 % de los individuos presentes eran de *P. montezumae* y el resto eran *Cupresus* sp., *Abies* sp., y otro tipo de pinos y se generó solo 37.1 % de semillas llenas.

En Ixtenco se estimó la mayor cantidad de semillas llenas (41.5 %) aunque en este rodal hubo una menor densidad de árboles de *P. montezumae* (104 árboles ha⁻¹) la presencia de árboles vecinos de otras especies fue menor (*Quercus* sp y *Arbutus* sp.) por lo que se consideró como el rodal más puro (84 % son árboles de *P. montezumae*) y los árboles vecinos no actuaron como una barrera física entonces el proceso de polinización cruzada se dio con éxito; también se puede asociar la longitud del estróbilo con las semillas llenas (Boutheina *et al.*, 2013).

Una semilla llena es una estructura compleja y los componentes de esta son (Figura 12) la testa (es formada por los tegumentos que representan los tejidos maternos del óvulo), el endospermo (que provee de nutrimentos al embrión) y embrión (que es producto de la fusión entre un óvulo y el núcleo espermático); (Suarez y Melgarejo, 2007) en conjunto tienen la capacidad de transformarse en una plántula, debido a esto fue de suma importancia determinar la eficiencia productiva (semillas llenas) en los rodales naturales de La Malinche.

4.1.4 Semillas vanas

La alta proporción de semillas vanas en el rodal de Ixtenco se puede deber a la baja densidad de árboles (104 árboles, que fue el menor número de individuos dentro del rodal) ya que la producción de semilla está relacionada con el número de individuos maduros de la especie dentro de cada rodal natural y que determina el tamaño de la nube de polen, así como la disponibilidad de este (Andrade-Gómez *et al.*, 2021); por lo tanto en Ixtenco se da una mayor tasa de autofecundación o cruza entre individuos genéticamente emparentados (Gómez-Jiménez *et al.*, 2010). Este fenómeno puede dar paso a procesos de consanguinidad generalmente deletérea dirigiéndose hacia la pérdida de vigor y de la fecundidad, la condición de los cigotos son homocigotos por lo que se aumenta la frecuencia de genes letales que causan la muerte del embrión, también pueden presentarse problemas de desórdenes genéticos; finalmente lo que quedó en la semilla fueron remanentes celulares (Mosseler *et al.*, 2000; Piñeira *et al.*, 2015), por lo tanto, la consanguineidad es la principal causa de la producción de semillas vanas (Mosseler *et al.*, 2000).

Sin embargo, en el rodal de Altamira la producción de semillas vanas indicar la afectación de la semilla por los efectos del fenómeno de la vecería presente durante el año de recolecta (2020), es decir pudo haber sido un año de baja producción de estróbilos, ya que en las coníferas se observan años semilleros (cosechas abundante de conos y semillas) pero se alternan con años de mínima producción, por lo tanto el fenómeno de la vecería puede ser una estrategia de adaptación del árbol materno para no generar conflictos de recursos dentro de la progenie (Quiroz-Vazquez *et al.*, 2017; Mallo *et al.*, 2020).

4.1.5 Semillas dañadas

La presencia de insectos es uno de los principales factores que reduce la producción y disponibilidad del germoplasma, en los rodales de La Malinche el barrenador de la semilla mermó la producción en promedio alrededor del 8 % del potencial de producción. Al comparar los resultados con el trabajo de Rodríguez-Franco en 1997 (17 % de semillas dañadas) el daño causado por el barrenador en los rodales de La

Malinche fue bajo. Sin embargo, al analizar los datos de Delgado-Valerio (1994) quien obtuvo tan solo el 0.001 % de semillas dañadas por insectos por lo que en El Parque Nacional La Malinche la depredación de la semilla representa un problema moderado en la producción.

En este estudio se observó que la baja cantidad de lluvia en la zona de Ixtenco está relacionada con la cantidad de semillas dañadas ($r = - 0.43$) (Tabla 7).

Sin embargo, la depredación de la semilla por el barrenador e incluso de los estróbilos femeninos maduros por mamíferos como las ardillas repercute en la cantidad y la calidad del germoplasma, que se refleja en la baja producción de plántula (Díaz-Fleischer *et al.*, 2010).

4.1.6 Óvulos abortados

La cantidad de óvulos abortados tiene una relación inversa con la cantidad de semillas desarrolladas; por lo tanto, el rodal de San Bartolomé tuvo la proporción de óvulos abortados más alta de los cuatro rodales (43.9 %) esto podría estar dando indicios de la presencia de problemas en la baja producción (disponibilidad) e ineficiencia en la dispersión del grano de polen y a la inadecuada germinación de este (Mosseler *et al.*, 2000), como también a la combinación de factores climáticos (bajas temperaturas y alta humedad) (Owens *et al.*, 1991).

Con base en el análisis de correlación se observó la influencia de factores ambientales como precipitación ($r = 0.66$) y altitud ($r = - 0.56$) sobre la proporción de óvulos abortados. Las variables climáticas antes mencionadas y la temperatura del aire pueden afectar el desarrollo del cigoto y del embrión, provocando finalmente la muerte de éste (Andrade-Gómez *et al.*, 2021; Tighe, 2004); el aborto se pudo haber realizado poco después de la polinización (autopolinización) al no generarse el tubo polínico; o en el momento de la fertilización (Owens *et al.*, 1991; Owens *et al.*, 2008); e incluso en la etapa de la polinización o durante el desarrollo embrionario temprano o tardío (Owens *et al.*, 2008).

En promedio se contabilizaron en los rodales de La Malinche 63 óvulos (33 %), este valor fue mayor al que reportó Delgado-Valerio (1994) con 47 óvulos abortados por cono en poblaciones de *P. montezumae* en Michoacán.

Por lo tanto los rodales de San Pedro y San Bartolomé podrían tener un riesgo al fracasar y presentar problemas de polinización-fecundación como se ha demostrado con otras coníferas al tener un porcentaje igual o superior al 40 %; con *P. leiophylla* donde se reporta el 55 % de óvulos abortados como respuesta a la asincronía entre la liberación del grano de polen y la maduración del estróbilo femenino y problemas de polinización-fecundación (Delgado-Valerio, 1994); en *P. pseudostrobus* 60 % de óvulos abortados, debido a una baja densidad del arbolado (Aragón-Peralta *et al.*, 2020) y en *Picea mexicana* el 41 % de óvulos abortados es asociado con baja densidad de individuos y cantidad de polen (Flores-López *et al.*, 2005).

4.1.7 Índice de endogamia

En San Bartolomé el valor de depresión endogámica fue de 0.40, por lo tanto, se puede inferir que en esta población hay menor variabilidad genética y una mayor cantidad de individuos de condición homocigota, con ello aumenta la probabilidad de heredar alelos asociados a defectos genéticos (Ocampo y Cardona, 2013), debido a una escasa producción de polen y problemas de autopolinización (Flores-López *et al.*, 2005).

Por otro lado, una de las principales fuerzas evolutivas que originan la endogamia son la deriva genética y selección natural que se dan en poblaciones pequeñas, como consecuencia de una alta consanguinidad, la cual disminuye la diversidad genética (Torres-Hernández *et al.*, 2021). Por lo tanto, existe una correlación entre altos índices de endogamia y un alto riesgo de problemas asociados a genes de herencia recesiva.

4.1.8 Características de la semilla

En el estudio de El-Kassaby y Cook (1994) demostraron la relación entre la energía reproductiva femenina con la formación de semillas llenas (éxito reproductivo). En la Malinche se observó variación entre los rodales naturales, destacando a San Pedro como el sitio más eficiente (requiere de menor energía para generar una semilla).

Por lo tanto, la mayor cantidad de semillas por kilogramo se obtuvieron del rodal de San Pedro con un promedio de 48,219 semillas. Sin embargo, son valores inferiores a los estimados por Rodríguez-Franco (1997) de 56,000 semillas por kilogramo, la variación de las características de las semillas es debido al peso de la semilla.

El peso de la semilla tiene importancia en la viabilidad, germinación, emergencia, y supervivencia de las plántulas, las semillas más pesadas (Ixtenco) tienden a incrementar los procesos antes mencionados, por lo que les da una ventaja competitiva al menos en el primer año de crecimiento al producir plántulas más robustas respecto a las semillas de menor tamaño (San Pedro) debido a que deben tener una menor cantidad de sustancias de reserva disponibles para el embrión y las primeras etapas de desarrollo de la plántula (Ayala-Cordero *et al.*, 2004; Rodríguez-Laguna *et al.*, 2012 ; Mallo *et al.*, 2020), en el trabajo actual con *Pinus montezumae* se observó una baja relación entre el peso unitario de la semilla y la longitud ($r = 0.48$) y diámetro del cono ($r = 0.58$) (Tabla 7).

4.2 Calidad de la semilla de *Pinus montezumae* Lamb.

Los valores de la capacidad germinativa oscilan de entre 80.5% a 92.5%, lo cual puede estar asociado con la calidad fisiológica de la semilla, esto repercute en la dinámica de la repoblación natural (Torres y Renison, 2020). A pesar de ser semillas de la misma especie, recolectadas en el mismo ciclo de producción, los valores de la capacidad germinativa o porcentaje de germinación variaron significativamente, este fenómeno puede estar asociado con estrategias reproductivas y características genéticas de los individuos con respecto a la procedencia y las condiciones microambientales (Torres y Renison, 2020). En otros estudios con la misma especie los datos son similares, 99.5 % en el estado de Michoacán (Delgado-Valerio, 1994), 99 % de germinación con semillas llenas (Rodríguez-Franco, 1997), 88.5 % (Aparicio-Rentería *et al.*, 1999), 63% en Calpulalpan, Tlaxcala (Gonzáles *et al.*, 1991).

La semilla que proviene del rodal de San Pedro requiere de menor tiempo para alcanzar el 50 % de germinación total, el cual sucedió a los 12 días después de la imbibición, por lo tanto, esta semilla tuvo una mayor energía para iniciar las actividades durante el proceso de la germinación en comparación con las de Ixtenco, Altamira y San Bartolomé que necesitaron de más días para alcanzar el 50% de la germinación (GER50 %) esto sugiere una menor energía en la semilla para dar comienzo al proceso de germinación (Tabla 5) (Velasco-García *et al.*, 2022).

Otra de las causas que afectan la capacidad germinativa pueden ser el grosor de la testa, como se ha reportado en *Pinus orizabensis* D.K. Bailey, cuya testa es delgada permitiendo una mayor absorción de agua y por consiguiente el proceso de germinación fue más rápido que el de las semillas de *Pinus cembroides* Zuccarini donde el grosor de la testa era mayor, el cambio en el grosor de la testa suele ser un mecanismo de adaptación (Hernández-Anguiano *et al.*, 2018).

El valor pico, la germinación media diaria y el valor germinativo es superior en las semillas que provienen del rodal de San Pedro dado que presentó una mayor velocidad y uniformidad en la germinación (Tabla 5, Figuras 15 y 16), se observó una expresión compuesta de la velocidad de germinación, dentro de estas semillas existen una mayor actividad metabólica durante el proceso de germinación y emergencia de la plántula y crecimiento inicial en planta (Czabator, 1962; Meza-Cota *et al.*, 2022).

En San Bartolomé, Altamira e Ixtenco la germinación fue más lenta y con menor vigor, los bajos valores pueden indicar problemas de latencia o de endogamia debido al reducido tamaño de las poblaciones que repercuten en la germinación, es posible que los embriones se desarrollen de forma incompleta debido a la autofecundación (Mápula-Larreto *et al.*, 2008; Meza-Cota *et al.*, 2022).

Estudios previos mencionan que la germinación se ve influenciada por el tamaño de la semilla (a mayor tamaño mayor porcentaje de germinación), sin embargo, en este estudio no sucedió de esta forma, Ixtenco tuvo las semillas más grandes pero el menor porcentaje de germinación. El bajo porcentaje de germinación en Ixtenco puede asociarse con la sobreexpresión de ABA (ácido abscísico) y la biosíntesis de proteínas LEA (*Late embryogenic abundant*) durante la embriogénesis cigótica, que indujo la dormancia y el retraso de la germinación, las proteínas LEA juegan un rol en la tolerancia a la desecación de la semilla, los mRNA de LEA empieza a degradarse rápidamente en el proceso de imbibición previa a la germinación (Mantilla, 2008; Nonogaki, 2017).

Las semillas que provienen del rodal de Ixtenco presentaron los valores más bajos e incluso lentos para la germinación, las semillas que se recolectaron pueden presentar un estado de inmadurez, una baja viabilidad y latencia (Aparicio-Rentería *et al.*, 1999; Mápula-Larreto *et al.*, 2008). De acuerdo con la Figura 11, se observa como la capacidad y velocidad de germinación son inferiores respecto a los demás sitios de evaluación. La baja capacidad germinativa y el tiempo que tardan en iniciar

el proceso de germinación son determinantes en el éxito de la progenie (Mallo *et al.*, 2020). Las semillas de *P. montezumae* que provienen de climas templados-fríos, presentan una dificultad para germinar; por ello se han recomendado estratificar la semilla para aumentar la capacidad y el vigor germinativo, aunque se ve afectado de forma negativa la velocidad de germinación (Cruz-Jiménez *et al.*, 1999).

La velocidad de germinación y el porcentaje de germinación es importante para estimar los días que se requieren para germinar determinado número de semillas y para calcular el número de plantas a obtener y la densidad (Aparicio-Rentería *et al.*, 1999).

4.3 Calidad de planta de *Pinus montezumae* Lamb.

En la Tabla 6 se muestran los valores del análisis de varianza basado en el crecimiento inicial de las plantas de *P. montezumae*. Se observaron diferencias entre los rodales para las variables evaluadas del crecimiento inicial de las plántulas ($p < 0.0001$). Las plantas que provienen del rodal de San Pedro tuvieron la mayor altura en crecimiento a los 10 meses después de la germinación (28.8 cm), lo que puede ser un mecanismo de adaptación al sitio de origen donde existe abundante presencia de hierbas y arbustos (Rodríguez-Trejo, 2008). Por lo tanto, el crecimiento inicial representa una ventaja competitiva de la especie en su ambiente al ser más eficiente en la competencia por el recurso (Sáenz-Reyes *et al.*, 2014, Velasco-García *et al.*, 2022).

Las plantas del rodal de Altamira son las más pequeñas (10.6 cm), estos valores pueden estar asociados a estrategias de resistencia al déficit hídrico “*drought escape*” debido a que tienen una menor área foliar; además las plantas pudieron disminuir su crecimiento antes de la llegada del estrés al que puede estar sometidas en su ambiente original por lo que el periodo de crecimiento es más corto en comparación con los rodales de San Pedro y San Bartolomé (Vilagrosa *et al.*, 2005). También, puede deberse a problemas de autofecundación durante el proceso de la formación de la semilla, en el cual puede reflejarse en un descenso en el crecimiento inicial de las plántulas (Mápula-Larreto *et al.*, 2008).

El diámetro del cuello de la raíz es una variable importante que evaluar, los valores óptimos para la especie con estado cespitoso deben ser superiores a 5 mm (Sáenz-Reyes *et al.*, 2014), valor que es superado por las plantas de *P. montezumae* de los rodales estudiados en La Malinche, por lo que sugiere que las plantas son de buena calidad. Sin embargo, aquellas que provienen de Ixtenco y Altamira tienen los valores más altos (Tabla 6) lo que significa que estas plantas son aún más resistentes a ser dobladas e incluso afectadas por factores climáticos como heladas o fuertes vientos (Rodríguez-Trejo, 2008). A pesar de lo antes mencionado, la altura y diámetro son

variables que por sí solas no son un predictor confiable para estimar la supervivencia de la planta en campo (Romero-Arenas *et al.*, 2019).

Se observó una variación en la altura y diámetro del cuello de la raíz (Figura 17), esta diferenciación puede estar asociado a procesos implicados en la adaptación de las plantas a un ambiente determinado ya que esta especie crece en un amplio intervalo de distribución, los bosques de *P. montezumae* se encuentra a altitudes que van desde 2 500 y 3 100 m s.n.m. en La Malinche (López-Domínguez y Acosta, 2005).

Las plantas de los rodales de Altamira e Ixtenco a pesar de ser de menor altura presentan un mejor índice de esbeltez, es decir una adecuada proporción de la altura con respecto al diámetro del cuello de la raíz, son árboles más pequeños y robustos (arquitectura de la planta); por lo tanto, tendría una mayor resistencia a daños por vientos o heladas, de esta manera se favorece la supervivencia y crecimiento en campo. Además, estas plantas pueden adaptarse y crecer mejor en sitios con limitación de humedad, al mantener un mejor estado hídrico, con un consumo moderado de agua en presencia de una situación de déficit hídrica (Velasco-García *et al.*, 2022). Las plantas de San Pedro y San Bartolomé presentaron los valores más altos debido a que en estos sitios la precipitación pluvial es mayor y existe una mayor disponibilidad del recurso hídrico que permite el establecimiento de las plantas (Rodríguez-Trejo, 2008). Sin embargo, las plantas de los cuatro rodales poseen los valores óptimos (≤ 6) para especies que presentan un estado cespitoso (Sáenz-Reyes *et al.*, 2014).

Si bien la altura y diámetro y su relación son indicadores de buena calidad de la planta, durante el primer año del trasplante se observa la mayor mortalidad para *P. montezumae*; durante los meses de febrero y marzo, cuando las temperaturas aumentan y la precipitación pluvial es baja, aunque 120 días sin lluvia son suficientes para causar el 100% de mortalidad de las plantas (Gonzáles *et al.*, 1991; Rodríguez-Franco, 1997; Vilagrosa *et al.*, 2005).

El Índice de Calidad de Dickson de los cuatro rodales superan el valor sugerido para este índice (0.5) (Cuadro 6) en las especies que presentan un estado cespitoso (Sáenz-Reyes *et al.*, 2014), por lo tanto, las plantas de los cuatro rodales son consideradas de alta calidad. En los rodales de Altamira e Ixtenco se observaron los valores más altos, lo cual puede estar asociado con plantas más vigorosas (adecuada distribución de la biomasa y robustez de la planta) y una mayor probabilidad de supervivencia en campo.

En el Parque Nacional La Malinche la regeneración natural es un aspecto trascendencia por lo que es necesario identificar las características morfológicas óptimas para el establecimiento de la planta en campo (Gómez, 2011). Las plantas de Altamira son las más pequeñas, pero con diámetros superiores a los demás, es decir, estos rasgos pueden deberse a la influencia del ambiente (11.4 °C; precipitación de 809 mm/año) a diferencia de San Pedro (11.9 °C; precipitación de 852 mm/año) (Ginnobili, 2013).

Tomando en cuenta las evaluadas y con la información obtenida, no es suficiente aseverar y garantizar la supervivencia de la especie en campo, ya que los procesos y las respuestas a las interacciones en el establecimiento de la planta está en función a factores bióticos y abióticos, por ejemplo: disponibilidad hídrica, limitación de recursos nutricionales, temperaturas elevadas, alta radiación, compactación del suelo; dando como resultado un abanico heterogéneo de patrones de respuestas a las condiciones del sitio (Vilagrosa *et al.*, 2005).

V. CONCLUSIONES

- En el Parque Nacional La Malinche el rodal de Ixtenco fue el más eficiente en la producción de semillas de *Pinus montezumae* Lamb. (85 semillas llenas/estróbilo femenino).
- De acuerdo con los valores obtenidos del porcentaje de germinación final y el valor germinativo, el germoplasma que proviene del rodal de San Pedro tuvo una mejor calidad de semilla en comparación con los otros tres rodales de *Pinus montezumae* Lamb. en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala. La calidad de la planta que se produjo en el vivero es alta de acuerdo con el índice de Dickson (valores superiores a 0.5).
- La longitud del estróbilo y la cantidad de semillas desarrolladas no estuvieron asociada a factores abióticos; por otro lado, de acuerdo a los valores de las propiedades del suelo en específico la concentración del ion nitrato y fósforo pudieran estar relacionados con el porcentaje de óvulos abortados y el diámetro del estróbilo.

VI. LITERATURA CITADA

- Aguilera-Rodríguez, M., Aldrete, A., Martínez-Trinidad, T. y Ordaz-Chaparro, V. M. (2016). Producción de *Pinus montezumae* Lamb. con diferentes sustratos y fertilizantes de liberación controlada. *Agrociencia*, 50 (1), 107-118.
- Andrade-Gómez, K.A., Ramírez-Herrera, C., López-Upton, J., Jiménez-Casas, M. y Lobato-Ortiz, R. (2021). Indicadores reproductivos en dos poblaciones naturales de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 44(2), 183-189. DOI: 10.35196/rfm.2021.2.183
- Aparicio-Rentería, A., Cruz Jiménez, H. y Alba-Landa, J. (1999). Efecto de seis sustratos sobre la germinación de *Pinus patula* Sch. et Cham., *Pinus montezumae* Lamb. y *Pinus pseudostobus* Lindl. en condiciones de vivero. *Foresta Veracruzana*, 1 (2), 31-36.
- Aragón-Peralta, R. D., Rodríguez Ortiz, G., Vargas Hernández, J. J., Enríquez del Valle, J. R., Hernández Hernández, A. y Campos Ángeles, G. V. (2020). Selección fenotípica y características reproductivas de *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana* (Mirov) S.G. Harrison. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 11(59), 118-140. DOI: 10.29298/RMCF.V11I59.700
- Ayala-Cordero, G., Terrazas, T., López-Mata, L. y Trejo, C. (2004). Variación en el tamaño y peso de la semilla y su relación con la germinación en una población de *Stenocereus beneckeii*. *Interciencia*, 29 (12), 692-697.
- Barančíková, G., Liptaj, T. and Prónayová, N. (2007). Phosphorus fractions in arable and mountain soils and their humic acids. *Soil and Water Research*, 2(4), 141–148. DOI: 10.17221/2111-swr
- Barradas, V. L. (1983). Capacidad de captación de agua a partir de la niebla en *Pinus montezumae* Lambert, de la región de las grandes montañas del estado de Veracruz. *Biotica* 8 (4): 427-431
- Bewley, J. D. (1997). Seed germination and dormancy. *The Plant Cell*. 9, 1055-1066. DOI: 10.1105/tpc.9.7.1055
- Benkman, C. W. (1995): Wind dispersal capacity of pine seeds and the evolution of different seed dispersal modes in pines. *Oikos*, 73 (2), 221- 224 DOI: 10.2307/3545911
- Boutheina, A., El Aouni, M.H. and Balandier, P. (2013). Influence of stand and tree attributes and silviculture on cone and seed productions in forests of *Pinus pinea* L. in northern Tunisia. *Options Méditerranéennes*, 105, 9-14. <http://om.ciheam.org/om/pdf/a105/00006775.pdf>
- Bramlett, D.L., Belcher Jr, E. W., DeBarr, G.L., Hertel, J.L., Karrfalt R.P., Lantz, C. W., Miller T., Ware, K.D. and Yates H. O. (1977). Cone analysis of southern pines: a guidebook. USDA Forest Service General Technical Report, Southeastern Forest Experiment Station. N° SE-13, 28.

- Cayuela, L. (2006). Deforestación y fragmentación de bosques tropicales montanos en los Altos de Chiapas, México. Efectos sobre la diversidad de árboles. *Ecosistemas*, 15(3), 192-198.
- Cagnolo, L. y Valladares, G. (2011). Fragmentación del hábitat y desensamble de redes tróficas. *Ecosistemas*, 20 (2-3), 68-78.
- Capilla-Dinorin, E., López-Upton, J., Jiménez-Casas, M. y Rebolledo-Camacho, V. (2021). Características reproductivas y calidad de la semilla en poblaciones fragmentadas de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 44 (2), 211-219. DOI: 10.35196/rfm.2021.2.211
- Carrillo A. F., Acosta M. M., Flores A. E., Juárez B. J. E., y Bonilla P. E. (2014). Estimación de biomasa y carbono en dos especies arbóreas en La Sierra Nevada, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(5), 779-793. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342014000500005&lng=es&tlng=es.
- Cerón, L. y Aristizábal, F. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14 (1), 285-295.
- Cordero-Rivera, A. (2011). Cuando los árboles no dejan ver el bosque: efecto de los monocultivos forestales en la conservación de la biodiversidad. *Acta Biológica Colombiana*, 16(2), 247-268.
- Cruz-Jiménez, H., Aparicio Rentería, A., y Rebolledo Camacho, V. (1999). Efecto de la estratificación en semillas de *Pinus montezumae* Lamb. y de *Abies religiosa* (HBK) Schl. & Cham. sobre los parámetros que valoran el proceso de germinación. I Simposio Internacional sobre Recursos Naturales Bosque-Suelo-Agua. pp: 35-36.
- Czabator, F. (1962). Valor de germinación: un índice que combina la velocidad y la integración de la germinación de semillas de pino. *Ciencias Forestales*, 8 (4), 386-396.
- Delgado-Valerio, P. (1994). Evaluación de la capacidad productiva y eficiencia de semillas para tres especies del género *Pinus* (*P. montezumae* Lamb. *P. pseudostrobus* Lind. y *P. leiophylla* Schl. & Cham.), en la zona boscosa de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 54, 267-274.
- Díaz-Castillo, K. V. (2019). Efecto del cambio climático sobre la distribución de *Pinus montezumae* y su consecuencia en la captación de agua y CO₂ en el estado de Tlaxcala. Tesis de Maestría en Ciencias en Sistemas del Ambiente. Universidad Autónoma de Tlaxcala. 85 p
- Díaz-Fleischer, F., Hernández-Arellano, V., Sánchez-Velásquez, L., Cano-Medina, T., Cervantes-Alday, R. y López-Ortega, M. (2010). Investigación preliminar de la depredación de semillas en la germinación de las bellotas de *Quercus candicans* Née. *Agrociencia*, 44, 83-92
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2016). Certificación de la operación de viveros forestales. NMX-AA-170-SCFI-2016, 190

- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2002). NOM-021-SEMARNAT-2000. Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. 31 de diciembre de 2002. 85 p
- Doria, J. (2010). Generalidades sobre las semillas: su producción, conservación y almacenamiento. *Cultivos Tropicales*, 31 (1), 74-85.
- El-Kassaby, Y.A. and Cook, C. (1994). Female reproductive energy and reproductive success in a Douglas-fir seed orchard and its impact on genetic diversity. *Silvae Genetica*, 43 (4), 243-247.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2015). Carta mundial de los suelos revisada. Organización de las Naciones Unidad para la Alimentación y la Agricultura. Roma, 10 <https://www.fao.org/3/i4965s/i4965s.pdf>
- Flores-López, C., López-Upton, J. y Vargas-Hernández, J. J. (2005). Indicadores reproductivos en poblaciones naturales de *Picea mexicana* Martínez. *Agrociencia*, 39 (1), 117-126.
- Galicia, L., Chávez-Vergara, B. M., Kolb, M., Jasso-Flores, R. I., Rodríguez-Bustos, L. A., Solís, L. E., ... Villanueva, A. (2018). Perspectivas del enfoque socioecológico en la conservación, el aprovechamiento y pago de servicios ambientales de los bosques templados de México. *Madera y Bosques*, 24(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421443>
- Galinco Segura L.A., Finegan B., Delgado-Rodríguez D., Mesén Sequiera F. (2020). Variación intraespecífica de rasgos funcionales de *Cedrela odorata* L. en la Península de Nicoya, Costa Rica. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales* 11(5), 57-86. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i57.556>
- Gernandt, D. S. y Pérez-de la Rosa, J. A. (2014). Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 126-133. DOI: 10.7550/rmb.32195
- Ginnobili, S. (2013). Fitness ecológico. *Revista Internacional de Filosofía: Suplemento*, 18, 83-97.
DOI: 10.24310/contrastescontrastes.v0i0.1160
- Gómez, J. W. L. (2011). Regeneración natural de nueve especies maderables en un bosque intervenido de la Amazonia Boliviana. *Acta Amazonica*, 41(1), 135–142. DOI: 10.1590/s0044-59672011000100016
- Gómez-Jiménez, D. M., Ramírez-Herrera, C., Jasson-Mata, J. y López-Upton, J. (2010). Variación en características reproductivas y germinación de semillas de *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl & Cham. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33 (4), 297-304.
DOI: 10.35196/rfm.2010.4.297
- Hernández-Anguiano, L. A., López-Upton, J., Ramírez-Herrera, C. y Romero- Manzanares, A. (2018). Variación en germinación de semillas de *Pinus cembroides* y *Pinus orizabensis*. *Agrociencia*, 52 (8), 1161-1178.
- Julca-Otoniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R. y Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia* (Aeica), 24 (1), 49-61. DOI: 10.4067/s0718-34292006000100009

- Kolotelo, D., Steenis V. E., Peterson, M., Bennett, R. and Trotter D. (2001). Seed handling guidebook. National Library of Canada Cataloguing, British Columbia Ministry of Forests. 106 p.
- León-Sánchez, M. A., Reyes Pozo, J. L., Pérez León, V. E., Bonilla Vichot, M. y Herrero Echavarría, G. (2019). Esbeltez y fertilización mineral en plantaciones de *Pinus caribaea* en Cuba. *Madera y Bosques*, 25(2), e2521777. DOI: 10.21829/myb.2019.2521777
- López Díaz, M. y Medina, H. E. (2015). Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. *Bioagrocencias*, 8 (1), 3-11.
- López-Domínguez, J. C. y Acosta Pérez, R. (2005). Biodiversidad del Parque Nacional Malinche Tlaxcala, México. Descripción del Parque Nacional Malinche. 1ra ed. ISBN 970-94333-0-X. México, Tlaxcala. pp: 3-14.
- Mallo, N. N., Zas, R. y Rodríguez, A. (2020). El viaje de la vecería. Efectos transgeneracionales en la progenie de *Pinus pinaster*. Cuadernos de La Sociedad Española de Ciencias Forestales, 46 (11), 245-260. DOI: 10.31167/csecfv5i46.19908
- Mantilla, Á. J. (2008). Desarrollo y germinación de las semillas. *Fundamentos de Fisiología Vegetal*, 537-558.
- Manzanilla Q., U., Delgado Valerio, P., Hernández Ramos, J., Molina Sánchez, A., García Magaña, J. J. y Rocha Granados, M. del C. 2018 (2019). Similaridad del nicho ecológico de *Pinus montezumae* y *Pinus pseudostrobus* (Pinaceae) en México: implicaciones para la selección de áreas productoras de semillas y de conservación. *Acta Botánica Mexicana*, 126, e1398. DOI: 10.21829/abm126.2019.1398
- Mápula-Larreta, M., López Upton, J., Vargas Hernández, J. J. y Hernández Livera, A. (2008). Germinación y vigor de semillas en *Pseudotsuga menziesii* de México. *Ra Ximhai*, 4(1), 119-134. DOI: 10.35197/rx.04.01.2008.07.mm
- Márquez-Ramírez, J., Alba Landa, J., Mendizábal Hernández, L. del C., Ramírez García, E. O. y Cruz Jiménez, H. (2010). La fenología reproductiva y el manejo de los recursos forestales. *Foresta veracruzana*, 12(2), 35-38. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49719770006>
- Martínez-Rivas, J. A., Cruz Cobos, F., Gurrola Amaya, J. G. y Nájera Luna, J. A. (2020). Potencial productivo de conos y semillas de dos especies del género *Pinus*. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 11(58), 26-42. DOI: 10.29298/rmcf.v11i58.592
- Meza-Cota, A. B., Vargas-Hernández, J. J., Vázquez-Badillo, M. E., Villarreal-Quintanilla, J. Á., López-Aguillón, R., & Florez-López, C. (2022). Morfología, calidad de semillas y plántulas de *Yucca endlichiana* e implicaciones en su conservación. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 9(1). DOI: 10.19136/era.a9n1.2834
- Miniño-Mejía, V. A., Rodríguez de Francisco, L. E., Paíno Perdomo, O., León, Y. y Paulino, L. (2014). Caracterización de la morfología de la semilla de *Pinus occidentalis* Swartz. *Ciencia y Sociedad*, 39(4), 777-801. DOI: 10.22206/cys.2014.v39i4.pp777-801

- Morales-Velázquez, M. G., Ramírez-Mandujano, C. A., Delgado-Valerio, P. y López-Upton J. (2010). Indicadores reproductivos de *Pinus leiophylla* Schltdl et Cham en la cuenca del Río Angulo, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(2), 31-41.
- Mosseler, A., Major J. E., Simpson J. D., Daigle B., Lange K., Park Y. S., Johnsen K. H., y Rajora, O. P. (2000). Indicators of population viability in red spruce, *Picea rubens*. I. Reproductive traits and fecundity. *Canadian Journal of Botany*, 78 (7), 928-940. DOI: 10.1139/cjb-78-7-928
- Nonogaki, H. (2017). Seed Biology Updates-Highlights and new discoveries in seed dormancy and germination research. *Frontiers in Plant Sciences*, 8, 524. DOI:10.3389/fpls.2017.00524
- Ocampo, G. R. y Cardona, C. H. (2013). La endogamia en la producción animal. *Revista Colombiana de Ciencias Animales*, 5(1), 465-479. DOI:10.24188/recia.v5.n2.2013.458
- Oberson, A. y Frossard, E. (2015). Phosphorus management for organic agriculture. In: Sims J. T. and Sharpley A. N. (eds.) *Phosphorus: Agriculture and the Environment*, Agronomy Monograph 46, Madison, Wiley. 761-779. DOI: 10.2134/agronmonogr46.c24
- Ortiz-Bibian, M. A., Blanco-García, A., Lindig-Cisneros, R. A., Gómez-Romero, M., Castellanos-Acuña, D., Herrerías-Diego, Y., Sánchez-Vargas, N. M. y Sáenz-Romero, C. (2017). Genetic variation in *Abies religiosa* for quantitative traits and delineation of elevational and climatic zoning for maintaining Monarch butterfly overwintering sites in Mexico, considering climatic change. *Silvae Genetica*, 66(1), 14-23. DOI:10.1515/sg-2017-0003
- Ortiz V. B. y Ortiz S., C. A. (1990). *Edafología*. Universidad Autónoma de Chapingo 5ª. Ed. México.
- Owens, J. N, Colangeli, A.M. y Morris, S. J. (1991). Factors affecting seed set in Douglas-fir (*Pseudotsuga menziessii*). *Canadian Journal of Botany*, 69 (2). DOI:10.1139/b91-033
- Owens, J. N., Kittirat, T. y Mahalovich, M. F. (2008). Whitebark pine (*Pinus albicaulis* Engelm.) seed production in natural stands. *Forest Ecology and Management*, 255 (3-4), 803-809. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.09.067
- Pérez-Reyes, C., Fuentes González, M. W., y Geada López, G. (2020). Reproductive capacity of *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari in Marbajita's the seed orchard. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 8 (2), 333-343.
- Perry, J.P. (1991). *The Pines of México and Central America*. Timber Press, Portland, Oregon. pp:110-113.
- Piñeira, J., Tapia, M., Gebauer, F. y Tamel Aike, I. (2015). ¿Qué es la consanguinidad? *Inia*, informativo N° 45 <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/123456789/5005/NR41871.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

- Pire, R. y Pereira, A. (2003). Propiedades físicas de componentes de sustratos de uso común en la horticultura del estado de Lara, Venezuela. Propuesta metodológica. *Bioagro*, 15 (1), 55-64.
- Quiroz Vázquez, R. I., López Upton, J., Cetina Alcalá, V. M. y Ángeles Pérez, G. (2017). Capacidad reproductiva de *Pinus pinceana* Gordon en el límite sur de su distribución natural. *Agrociencia*, 51 (1), 91-104.
- Ramírez-Mandujano, C. A., González Cortés, J. C., Valdovinos Rivera, N. L. y López Aguirre, P. (2017). Densidad de árboles vecinos y porcentaje de semillas llenas en *Pinus leiophylla* Schltdl. et Cham. *Biología*, 19 (2), 1-7.
- Rodríguez Franco, C. (1997). La silvicultura de *Pinus montezumae* Lamb. en la región central de México. *Revista Ciencia Forestal en México*, 22 (81), 91-115
- Rodríguez Laguna, R., Razo Zárate, R., Juárez Muñoz, J., Capulín Grande, J., y Soto Gutiérrez, R. (2012). Tamaño de cono y semilla en procedencias de *Pinus greggii* Engelm. var. *greggii* establecidas en diferentes suelos. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(4), 289-298. DOI: 10.35196/rfm.2012.4.289
- Rodríguez Trejo, D. A. (2008). Indicadores de calidad de planta forestal. Mundi Prensa México. Universidad Autónoma Chapingo.
- Rodríguez de Francisco, L. E. (2016). Caracterización de la viabilidad de poblaciones de *Pinus occidentalis* Swartz en la República Dominicana mediante el empleo de técnicas morfoanatómicas y moleculares. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba. República Dominicana, 182 p.
- Rojas-García, F. y Villers-Ruíz, L. (2008). Estimación de la biomasa forestal del parque Nacional Malinche: Tlaxcala-Puebla. *Revista de Ciencia Forestal en México*, 33(104), 59-86.
- Romero-Arenas, O., Flores Flores, A. del P., Rivera Tapia, J. A., Hernández Aldana, F., Parraguirre Lezama, J. F. C., Villa Ruano, N. y Landeta Cortés, G. (2019). Producción de plántulas de *Pinus pseudostrobus* en composta a base de residuos de Shiitake en vivero. *Madera y Bosques*, 25(1). 1-11 DOI: 10.21829/myb.2019.2511675
- Romero-Barrios, C., García-Gallegos, E. y Hernández-Acosta, E. (2015). Materia orgánica y densidad aparente en suelos del suroeste de La Malinche, Tlaxcala, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 2 (5), 63-70.
- Rubio, G., Cabello, M. J. y Gutiérrez Boem, F.H. (2008). Estimating available soil phosphorus increases after phosphorus addition in Mollisols. *Soil Science Society of America Journal*. 72, 1721–1727. DOI: 10.2136/sssaj2007.0049
- Rzedowski, J., 2006. Vegetación de México; Capítulo 17 . Bosque de coníferas. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Sadzawka R., A., Peralta P., M., Ibarra M., M., Peralta A., J.M., y Fuentes E., J. P. (1995). Características químicas de suelos forestales chilenos. *Bosque*, 16(1), 9-28. DOI: 10.4206/bosque.1995.v16n1-02
- Sánchez G. A. (2016). Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y bosques*, 14(1), 107-120. DOI: 10.21829/myb.2008.1411222

- Sáenz Reyes, J.T., Muñoz Flores, H. J., Pérez D., C.M.A., Rueda Sánchez, A. y Hernández Ramos, J. (2014). Calidad de planta de tres especies de pino en el vivero "Morelia", estado de Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5 (26), 98-111. DOI: 10.29298/rmcf.v5i26.293
- Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Joyce, D. G., Beaulieu, J., St. Clair, J. B. and Jaquish, B. C. (2016). Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(3), 303-323. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2014.10.052
- Serrada-Herrera, R. (2003). Regeneración natural: situaciones, conceptos, factores y evaluación. *Cuaderno de La Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 15, 11-15.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2013). Programa de Manejo Parque Nacional La Montaña Malinche o Matlalcuéyatl. Primera edición, *Printed and bound in México*. pag. 25-30
- Schoonover, J. E. and Crim, J. F. (2015). An introduction to soil concepts and the role of soils in watershed management. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 154 (1), 21-47. DOI: 10.1111/j.1936-704x.2015.03186.x
- The International Seed Testing Association (ISTA). (2016). Reglas Internacionales para el Análisis de las semillas 2016. Uruguay
- Torres, R.C. y Renison, D. (2020). Capacidad germinativa y longevidad en semillas de dos especies arbóreas nativas del bosque serrano en el Centro Argentino. *Revista de Ciencias Forestales*, 28 (1), 54-61.
- Torres-Hernández, D., Fletcher-Toledo, T., Ortiz-Martínez, R. A. y Acosta-Aragón, M. A. (2021). Endogamy as a cause of consanguinity an its association with congenital anomalies. *Medicina & Laboratorio*, 25, 409-418. DOI:10.36384/0.1232576.354
- Torres-Rojas, J. M. (2004). Estudio de tendencia y perspectiva del sector forestal en América Latina al año 2020. Informe Nacional México. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO. (En Línea) disponible en https://www.researchgate.net/publication/308141519_Rojo_Juan_Manuel_Torres_Estudio_de_tendencias_y_perspectivas_del_sector_forestal_en_America_Latina_a_l_ano_2020_informe_nacional_Mexico
- Tighe, M. E. (2004). Manual de recolección y manejo de polen de pinos tropicales y subtropicales procedentes de rodales naturales. Desde <http://www.iiap.org.pe/Archivos/publicaciones/PUBL488.pdf>
- Tzompantzi N. R. (1994). Estudio de variaciones morfológicas de conos y semillas de *Pinus montezumae* Lamb del volcán la Malinche, ladera oeste y norte estado de Tlaxcala. Tesis de Licenciatura en Biología Agropecuaria. Universidad Autónoma de Tlaxcala
- Valcarce, A. (2007). Principio de Arquímedes. *Universidad de Castilla-La Mancha*, 1–1 (3), 120–130.
- Vela-Correa, G. y Rodríguez Gamiño., Ma. De L., Vázquez Martínez, B. E. y Domínguez Rubio, I. V. (2007). Caracterización edáfica de sitios con regeneración natural de *Pinus montezumae* Lamb. En el volcán la Malinche, México. *Agrociencias*, 41 (4), 371-383.

- Velasco-García, M.V., Hernández Arroyo, D.G., Muñoz Gutiérrez, L., Castillo Martínez, C.R., Vallejo Reyna, M. A. y García Campusano, F. (2022). Crioconservación de semillas de *Cedrela odorata* L.: germinación y establecimiento temprano en vivero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13 (69), 31-55. DOI: 10.29298/rmcf.v13i69.1198
- Vilagrosa, A., Cortina, J., Rubio, E., Trubat, R. y Chirino, E. (2005). El papel de la ecofisiología en la restauración forestal de ecosistemas mediterráneos. *Darwin*, 14 (3), 446–461.
- Villavicencio-García, R., Santiago Pérez, A. L., Godínez Herrera, J. de J., Chávez Anaya, J. M. y Toledo González, S. L. (2012). Efectos de la fragmentación sobre la regeneración natural en la Sierra de Quila, Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(11), 9-14.
- Villegas T., O. G., Domínguez P., M. L., Albavera P., M., Andrade R., M., Sotelo N., H., Martínez R., M. G., Aguilar C., M., Castillo C., C. y Magadan S., M. C. (2017). *Sustratos como material de última generación*. 1era Ed., OmniaScience, Barcelona, España. pp: 15-16 DOI: 0.3926/oms.36415
- Zalba, P. y Peinemann, N. (1987). Efecto de algunas especies forestales sobre ciertas propiedades fisicoquímicas del suelo. *Ciencia del Suelo*, 5 (1): 71-76.
- Zamora-Campos, E. M., Vázquez Cuecuecha, O. G., Pérez Ahuatzi, A., Cano Flores, R., Aparicio Rentería, A. y Fernández Pedraza, E. (2007). Variación natural de la densidad de la madera en *Pinus montezumae* Lamb. en tres altitudes del parque nacional la Malinche, Tlaxcala, México. *Foresta Veracruzana*, 9(2), 33- 37.
- Zevallos P. P.A. y Flores B., Y. (2016). Caracterización morfológica de plántulas de “una de gato” *Uncaria tomentosa* (Willd. ex Roemer & Schultes) D.C. y *U. guianensis* (Aublet) Gmelin del Bosque Nacional Alexander von Humboldt. *Ecología Aplicada*, 2(1-2), 41-46. DOI: 10.21704/rea.v2i1-2.245.