



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ciencias Naturales
Doctorado en Ciencias Biológicas

"Distribución del almacén de carbono, biomasa aérea y su relación con variables climáticas en diez especies de pino de México"

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Doctorado en Ciencias Biológicas

Presenta:
Dioseline Girón Gutiérrez

Dirigido por:
Víctor Hugo Cambrón Sandoval

Dr. Víctor Hugo Cambrón Sandoval
Presidente

_____ Firma

Dr. Julian Cerano Paredes
Secretario

_____ Firma

Dr. Jorge Méndez González
Vocal

_____ Firma

Dr. José Carmen Soto Correa
Vocal

_____ Firma

Dra. Tamara Guadalupe Osorno
Suplente

_____ Firma

Centro Universitario
Querétaro, Qro.

Fecha (será el mes y año de aprobación del Consejo Universitario)

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciatario no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:

 **Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatario.

 **NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).

 **SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

RESUMEN

Se ha observado que el cambio climático puede modificar el ciclo de vida de los organismos presentes en un ecosistema. Los bosques de pino en México son sensibles a fluctuaciones en el clima, así como plagas forestales y eventos climáticos extremos acentuados por los efectos del cambio climático. Por mucho tiempo se ha observado que las condiciones climáticas son importantes factores que determinan el almacén de carbono. Por lo que es indispensable identificar cuales son las variables bioclimáticas que se asocian a la biomasa aérea. A partir de lo anterior, el objetivo de este estudio fue determinar la distribución espacial de la producción de biomasa aérea en diez especies de pino presentes en México, así como identificar, mediante correlaciones, las variables bioclimáticas asociadas con la producción de dicha biomasa. Se obtuvieron los datos dasométricos y de sitio para cada especie a partir del Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2009-2014, de acuerdo a criterios estadísticos se eligió la ecuación más adecuada para la estimación de producción de biomasa en cada especie. Despues se realizaron mapas de distribución para cada especie de acuerdo al estimado de producción de biomasa. Para el análisis de asociación de biomasa y clima se utilizaron 19 variables bioclimáticas de worldclim2 y mediante el valor de correlación de Pearson se determinaron las variables que se asocian con la producción de biomasa aérea en cada especie. De las diez especies, sólo seis presentaron correlación con alguna de las 19 variables bioclimáticas. Por otro lado, se determinó que las variables que presentaron un número mayor de correlaciones son las que están asociadas a temperatura. De acuerdo a lo encontrado, la fluctuación de las temperaturas extremas se asocian negativamente con la biomasa mientras que la isothermalidad, es decir, la poca variación en la temperatura se asocia positivamente en todas las especies que presentaron un valor significativo de correlación. Estos hallazgos son de gran importancia al momento de diseñar proyectos de manejo y conservación de especies de coníferas, sobre todo en aquellas que presentan una distribución limitada en México.

Palabras clave: biomasa, temperatura media anual, cambio climático, pino

SUMMARY

It has been observed that climate change can alter the life cycle of ecosystems. Pine forests in Mexico are sensitive to climate variability, forest pests, and extreme weather events, which are exacerbated by the effects of climate change. It has long been observed that climatic conditions are important determinants of carbon storage. Therefore, it is important to identify which bioclimatic variables are associated with aboveground biomass. The objective of the present study was to determine the spatial distribution of aboveground biomass production in ten pine species found in Mexico and, through correlations, to identify the bioclimatic variables associated with aboveground biomass production. The dasometric and location data for the ten species were obtained from the National Forest and Soil Inventory 2009-2014, according to statistical criteria the most appropriate equation was selected to estimate the biomass production in each species, distribution maps were made for each species according to the estimated biomass production. For the analysis of the relationship between biomass and climate, 19 bioclimatic variables from worldclim2 were used and the Pearson correlation value was used to determine the variables associated with the biomass production area in each species. Of the ten species, only six showed correlations with any of the 19 bioclimatic variables, on the other hand, it was found that the variables with the highest number of correlations were those associated with temperature. According to what was found, the fluctuation of extreme temperatures is negatively associated with biomass, while isothermality, i.e. little variation in temperature, is positively associated in all species that presented a significant correlation value. These results are of great importance in the design of management and conservation projects for conifer species, especially those with a limited distribution in Mexico.

Key words: biomass, annual mean temperature, climate change, pine.

Agradecimientos

A aquello que me impulsó en todo momento

A mis padres y hermanas

A mi esposo por e hijo

A todos aquellos que me dieron un consejo y animos.

A mi comité sinodal por cada observación, comentario y palabras de aliento

A mis amigos

A mis compañeros de generación

Al CONAHCYT ahora SECIHTI por la beca otorgada.

A aquel que tenga el interés de leer este pedacito de mi vida

Índice general

Introducción -----	10
Justificación -----	12
Marco teórico-----	13
3.1 Bosques templados-----	13
3.2 Pinos en México -----	14
3.3 Distribución-----	16
3.4 Clima-----	17
3.5 Altitud-----	18
3.6 Suelo-----	18
Factores climáticos -----	20
4.1 Temperatura -----	20
4.2 Precipitación -----	21
Biomasa. -----	22
5.1 Estimación de biomasa. -----	22
Ecuaciones Alométricas-----	24
Antecedentes-----	24
Objetivos-----	26
Objetivos Particulares: -----	26
Material y Método -----	27
9.1 Selección de especies -----	27
9. 2 Obtención de datos dasométricos. -----	28
9.3 Obtención de datos climáticos -----	29
9.4 Estimación de la biomasa. -----	30
9.5 Limpieza de bases de datos. -----	31
9.6 Distribución de la biomasa -----	32
9.7 Análisis estadísticos. -----	32
Resultados -----	33
10.1 Densidad de la biomasa -----	34
10.2 Distribución de la biomasa -----	35

10.3 Sitios con mayor biomasa. -----	38
10.4 Tolerancias climáticas -----	44
Influencia de las variables climáticas en la biomasa. -----	44
Discusión de resultados-----	48
Variables climáticas-----	49
CAPITULO II -----	52
Conclusión -----	77
Literatura citada -----	79

Índice de figuras

Figura 1. Distribución de algunos bosques templados presentes en México. Tomado de Ordoñez-Díaz et al. (2015).-----	14
Figura 2. Áreas de distribución de bosque de pinos en México, modificado de Sánchez-González (2008).-----	17
Figura 3. Distribución de las especies estudiadas en cuanto a las características dasométricas y su distribución altitudinal; a) Altura total (m), b) DAP (cm) y c) Altitud (msnm). -----	34
Figura 4. Distribución general de los sitios muestreados en las diez especies estudiadas; A) <i>Pinus arizonica</i> , B) <i>Pinus ayacahuite</i> , C) <i>Pinus cembroides</i> , D) <i>Pinus devoniana</i> , E) <i>Pinus leiophylla</i> , F) <i>Pinus montezumae</i> , G) <i>Pinus oocarpa</i> , H) <i>Pinus patula</i> , I) <i>Pinus pseudostrobus</i> , J) <i>Pinus teocote</i> .-----	37
Figura 5. Distribución de los sitios con mayor biomasa en <i>Pinus arizonica</i> y las provincias fisiográficas donde se encuentran. -----	39
Figura 6. Distribución de los sitios con mayor biomasa en <i>Pinus ayacahuite</i> y las provincias fisiográficas donde se encuentran. -----	39
Figura 7. Distribución de los sitios con mayor biomasa en <i>Pinus cembroides</i> y las provincias fisiográficas donde se encuentran. -----	40
Figura 8. Distribución de los sitios con mayor biomasa en <i>Pinus devoniana</i> y las provincias fisiográficas donde se encuentran. -----	40
Figura 9. Distribución de los sitios con mayor biomasa en <i>Pinus leiophylla</i> y las provincias fisiográficas donde se encuentran. -----	41

Figura 10. Distribución de los sitios con mayor biomasa en <i>Pinus montezumae</i> y las provincias fisiográficas donde se encuentran. -----	41
Figura 11. Distribución de los sitios con mayor biomasa en <i>Pinus oocarpa</i> y las provincias fisiográficas donde se encuentran. -----	42
Figura 12. Distribución de los sitios con mayor biomasa en <i>Pinus patula</i> y las provincias fisiográficas donde se encuentran. -----	42
Figura 13. Distribución de los sitios con mayor biomasa en <i>Pinus pseudostrobus</i> y las provincias fisiográficas donde se encuentran. -----	43
Figura 14. Distribución de los sitios con mayor biomasa en <i>Pinus teocote</i> y las provincias fisiográficas donde se encuentran. -----	43
Figura 15. Distribución de las tolerancias climáticas en las diez especies estudiadas.	
44	
Figura 16. Mapa de calor de las correlaciones entre las variables bioclimáticas y producción de biomasa en las especies estudiadas; Pari = <i>P.arizonica</i> ; Paya = <i>P. ayacahuite</i> ; Pcem = <i>P. cembroides</i> ; Pdev = <i>P. devoniana</i> ; Plei = <i>P. leiophylla</i> ; Pmon = <i>P. montezumae</i> ; Ppat = <i>P. patula</i> ; Ppse = <i>P. pseudostrobus</i> ; Pteo = <i>P. teocote</i> .	
47	

Índice de tablas

Tabla 1. Especies de pino reportadas en México. -----	15
Tabla 2. Descripción de las especies seleccionadas para el estudio. -----	27
Tabla 3. Descripción de variables bioclimáticas obtenidas de Worldclim2. -----	29
Tabla 4. Ecuaciones alométricas utilizadas para la estimación de la biomasa aérea.	
31	
Tabla 5. Resultados del análisis estadístico descriptivo e inferencial de las variables dasométricas y de biomasa estimada en las diez especies estudiadas.-----	35
Tabla 6. Estimación de biomasa en cada grupo de las diez especies estudiadas.	
36	
Tabla 7. Estado de México con el mayor número de sitios con mayor biomasa en cada especie.-----	38
Tabla 8. Resultado de las correlaciones significativas por especie. -----	46
Tabla 9. Valores del análisis descriptivo por grupos de las variables bioclimáticas que obtuvieron los mayores coeficientes de correlación con la biomasa aérea en	

Pinus arizonica, *Pinus cembroides*, *Pinus oocarpa*, *Pinus leiophylla* y *Pinus teocote*.
BIO1: temperatura media anual (°C); BIO4: estacionalidad de la temperatura
(desviación estándar ×100); BIO7: rango anual de temperatura (BIO5 - BIO6);
BIO12: precipitación anual (mm). ----- **48**

Introducción

Aproximadamente el 70% del territorio en México está cubierto por vegetación forestal natural, el resto es ocupado por zonas agropecuarias, de plantaciones forestales, urbanas y cuerpos de agua. De lo anterior, el 25.1% corresponde a bosques templados dominados por pinos y encinos ecosistemas esenciales tanto para el equilibrio ambiental como para la economía nacional. En este sentido, el género *Pinus* aporta el 70.9% de la producción maderera del país lo que resalta su gran valor económico. Además, posee una fuerte relevancia cultural ya que en las regiones forestales habitan alrededor de 11.87 millones de personas, de las cuales 3.6 millones pertenecen a pueblos indígenas que han desarrollado prácticas de gobernanza y manejo comunitario de los bosques (CONAFOR, 2021; Galicia et al., 2018; SEMARNAT, 2021).

México es un centro de diversificación del género *Pinus* con aproximadamente 47 especies registradas lo que representa de las cuales un 55% de sus especies son endémicas, lo que subraya la importancia de su conservación. Sin embargo, estos ecosistemas enfrentan múltiples amenazas, entre ellas el cambio de uso del suelo, la sobreexplotación forestal, los incendios y las plagas. A estas presiones se suma el cambio climático que altera las condiciones necesarias para la estabilidad y permanencia de los bosques templados (Ordóñez y Masera, 2001; Pan et al., 2013).

Los bosques de pino también cumplen un papel fundamental en la mitigación del cambio climático al actuar como sumideros de carbono, ya que su biomasa aérea (la masa de materia orgánica en la parte superior de los árboles) permite almacenar grandes cantidades de carbono. Esta capacidad los convierte en un recurso clave frente al calentamiento global (IPCC, 2000; Martin et al., 2018). No obstante, el incremento de la temperatura y los cambios en los patrones de precipitación están afectando la fisiología de estas especies, influyendo en procesos como la fotosíntesis, la transpiración, el crecimiento y la supervivencia. Esto a su vez, compromete su función como reservorios de carbono y su papel regulador en los ecosistemas forestales.

La capacidad de captura de carbono de los bosques depende en gran medida de la biomasa influenciada por factores como la distribución, estructura, densidad de arbolado y diversidad de especies, así como variables climáticas como la temperatura y la precipitación principalmente. Estudios previos han demostrado que la temperatura afecta directamente el diámetro y la biomasa aérea, mientras que la precipitación influye en la riqueza de especies y la densidad de carbono. Sin embargo, la relación entre variables climáticas y biomasa presenta variaciones importantes a nivel local, regional y continental, esto es especialmente evidente en el caso de los pinos en México ya que habitan una amplia gama de condiciones tanto bióticas como abióticas (Reich et al., 2014; Ali et al., 2019; Balima et al., 2021).

Las proyecciones climáticas futuras, basadas en escenarios como los del CMIP6 y las trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP), sugieren un incremento en la temperatura de hasta 5 °C hacia el año 2100. Este cambio podría provocar una reducción de la cobertura forestal, disminución en el crecimiento de la biomasa y pérdida de hábitats de especies del género *Pinus* con importancia ecológica y comercial en México. Para 2050, se estima que hasta un 20% de los bosques mexicanos podría sufrir una reducción de su área debido al cambio climático, lo que afectaría gravemente su productividad y los servicios ecosistémicos que proveen (CONAFOR, 2023; IPCC, 2000).

Si bien existen estudios a nivel global y regional que han analizado la influencia del clima sobre la biomasa (Pan et al., 2013; Reich et al., 2014; Ali et al., 2019), en México la información aún es limitada y en muchos casos no se ha explorado de manera específica la relación entre variables bioclimáticas y la biomasa aérea de especies de pino siendo un grupo tan diverso en México. Por lo tanto, este trabajo busca aportar evidencia científica que permita identificar qué variables climáticas se asocian con la biomasa aérea en distintas especies de *Pinus* distribuidas en México, la información generada será de gran utilidad para fortalecer las estrategias de manejo forestal, conservación y reforestación, así como para anticipar los posibles impactos del cambio climático en estos ecosistemas prioritarios.

Justificación

En México, aunque se han desarrollado estudios sobre los impactos del cambio climático en los diferentes ecosistemas y especies aún existe un vacío de información respecto a cómo las variables bioclimáticas influyen en la biomasa aérea de las especies de pino (Carlón-Allende et al., 2018; García-Aranda et al., 2018; Villanueva-Díaz et al., 2018; Chávez-García et al., 2022), a pesar de que estos bosques constituyen un componente fundamental en la captura de carbono y la regulación climática. Si bien a nivel global se han desarrollado investigaciones que relacionan el clima con la biomasa forestal los estudios enfocados en especies mexicanas son escasos o se han realizado únicamente a escala regional (Gómez-Romero et al., 2012; Pavon et al., 2012; Hernández-Salas et al., 2013; Liu et al., 2014; Lee y Lautenbach, 2016).

Generar conocimiento sobre la relación entre la biomasa aérea y las variables climáticas en diferentes especies de pino y en diferentes escalas, es indispensable para identificar aquellas con mayor capacidad de adaptación frente al cambio climático, este tipo de información permite reconocer las tolerancias climáticas de cada especie y con ello establecer criterios más sólidos para seleccionar especies prioritarias en proyectos de reforestación y restauración ecológica (Liu et al., 2014; Yao et al., 2022).

Los resultados de este trabajo no sólo contribuyen al entendimiento científico de la ecología de los bosques templados en México, sino que también fortalecen la gestión sustentable de los recursos forestales. Asimismo, servirán como referencia para diseñar políticas públicas y estrategias de manejo que busquen garantizar la resiliencia de los bosques frente al calentamiento global asegurando al mismo tiempo beneficios económicos, ecológicos y sociales para las comunidades que dependen de ellos.

Marco teórico

3.1 Bosques templados

Los bosques templados, también conocidos como bosques de coníferas, bosques de pino, bosques de abeto u oyamel, bosques de ayarín, bosques de cedro y táscate, bosques de encino o bosques mixtos de pino y encino, constituyen uno de los principales tipos de vegetación de México (Rzedowski, 2006).

Se consideran comunidades vegetales dominadas por árboles altos mayormente pinos y encinos así como, por otras varias especies que habitan en zonas montañosas con clima templado a frío. Se distribuyen en mayor extensión al norte y sur de Baja California, a lo largo de la Sierra Madre Occidental y Oriental, también se encuentran en el Eje neovolcánico, la sierra norte de Oaxaca y en el sur de Chiapas, su principal distribución abarca desde altitudes entre 2,000 y 3,000 msnm (metros sobre el nivel del mar). Los bosques templados ocupan actualmente el 16% del territorio mexicano (323,300 km²) aproximadamente (Ordoñez-Díaz et al., 2015; Galicia et al., 2018).

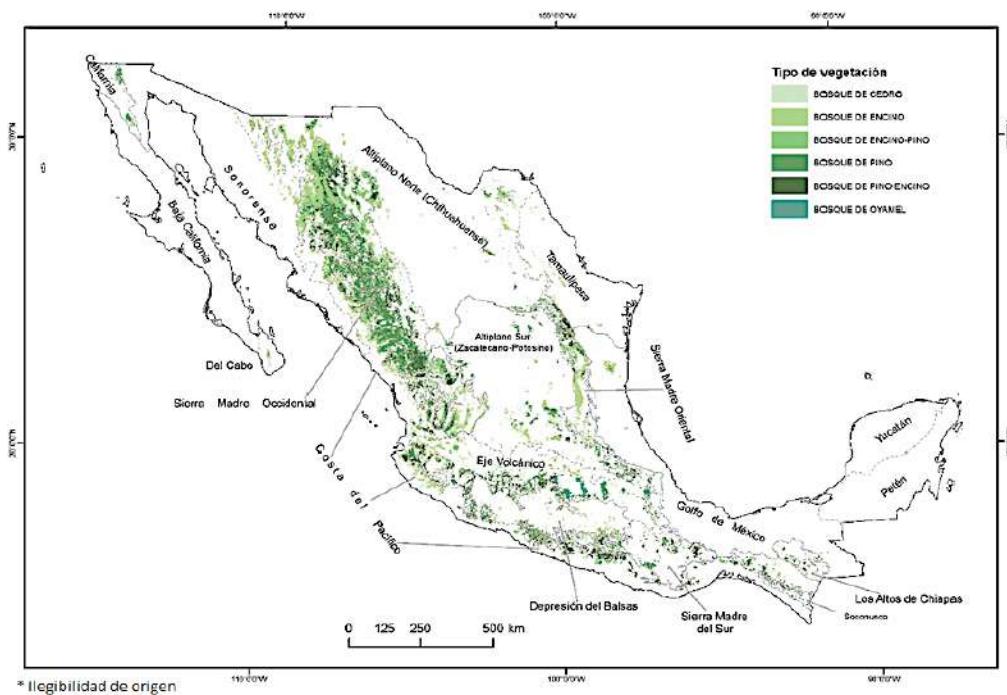


Figura 1. Distribución de algunos bosques templados presentes en México. Tomado de *Ordoñez-Díaz et al. (2015)*.

Se desarrollan en zonas con temperaturas promedio entre 12 y 23°C aunque en invierno la temperatura puede llegar hasta por debajo de cero grados, son ecosistemas de subhúmedos a templado húmedos con una precipitación anual entre 600 y 1,000 mm, crecen sobre suelos muy variados desde limosos a arenosos y moderadamente ácidos, por lo general con abundante materia orgánica y hojarasca (Rzedowski, 2006).

3.2 Pinos en México

La diversificación de los pinos en México se explica por la historia evolutiva del género estrechamente vinculada a la dinámica geológica y orográfica del territorio, la formación de los sistemas montañosos representó un cambio significativo que influyó en las poblaciones de pinos provocando la desaparición de algunas especies y la reducción de otras a poblaciones relictas. Asimismo, las poblaciones fragmentadas pudieron dar origen a nuevas especies (Salinas-Moreno et al., 2004).

Según la historia geológica de los sistemas montañosos, se encontró que la sierra madre occidental es la más antigua, en general se pueden observar dos sitios de diversificación de pinos, la primera abarca desde el Eje Neovolcánico Transversal con extensiones a lo largo de la Sierra Madre Occidental y Sierra Madre del Sur con 24 especies de pinos, el otro centro se observa desde el noreste de México donde se pueden encontrar de 14 a 18 taxones (González-Cásares et al., 2020).

Por otro lado, la taxonomía de los pinos en México ha evolucionado considerablemente a través del tiempo reflejando las diferencias en los métodos de investigación y los criterios de clasificación de cada época. A lo largo del siglo XX, diversos estudios botánicos han revelado un creciente reconocimiento de la

diversidad de estas especies. Por ejemplo, los primeros conteos de Shaw (1909) y Standley (1920) sugirieron una variedad limitada, con 18 y 28 especies respectivamente. Sin embargo, investigaciones posteriores de Martínez (1948) y Loock (1950) ampliaron significativamente el número de especies, lo que demuestra un mayor entendimiento de la biodiversidad de los pinos. El consenso actual basado en los trabajos de Perry (1991) y Farjon (1996), sitúa el número de especies en 47 para la región, esta evolución en los datos subraya la riqueza y la complejidad de la flora de pinos de México.

Las especies que se han reportado en México de acuerdo a Sánchez-González (2008) se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Especies de pino reportadas en México.

Especie	Autoridad taxonómica	Variedades / Subespecies
<i>Pinus arizonica</i>	(Engelm.) Shaw	<i>cooperi, arizonica, stormiae</i>
<i>Pinus attenuata</i>	Lemmon	—
<i>Pinus ayacahuite</i>	—	<i>ayacahuite, veitchii</i>
<i>Pinus cembroides</i>	Zucc.	ssp. <i>cembroides, lagunae, orizabensis</i>
<i>Pinus contorta</i>	—	var. <i>murrayana</i>
<i>Pinus coulteri</i>	Lamb. ex D. Don	—
<i>Pinus culminicola</i>	Andresen & Beaman	—
<i>Pinus caribaea</i>	—	var. <i>hondurensis</i>
<i>Pinus devoniana</i>	Lindl	—
<i>Pinus discolor</i>	D.K. Bailey & Hawksw	—
<i>Pinus douglasiana</i>	Martínez	—
<i>Pinus durangensis</i>	Martínez	—
<i>Pinus edulis</i>	Engelm	—
<i>Pinus engelmannii</i>	Carrière	—
<i>Pinus flexilis</i>	—	var. <i>reflexa</i>
<i>Pinus greggii</i>	Engelm. ex Parl.	var. <i>australis, greggii</i>
<i>Pinus hartwegii</i>	Lindl.	—
<i>Pinus herrerae</i>	Martínez	—
<i>Pinus jaliscana</i>	Pérez De La Rosa	—
<i>Pinus jeffreyi</i>	Balf.	—
<i>Pinus johannis</i>	Rob.-Pass	—

<i>Pinus lambertiana</i>	Douglas	—
<i>Pinus lawsonii</i>	Roezl ex Gordon	—
<i>Pinus leiophylla</i>	Schiede ex Schltdl. & Cham.	var. <i>leiophylla</i> , var. <i>chihuahuana</i>
<i>Pinus lumholtzii</i>	B.L. Rob. & Fernald	—
<i>Pinus maximartinezii</i>	Rzed	—
<i>Pinus maximinoi</i>	H.E. Moore	—
<i>Pinus monophylla</i>	Torr. & Frém	—
<i>Pinus montezumae</i>	Lamb.	var. <i>montezumae</i>
<i>Pinus muricata</i>	D. Don	var. <i>muricata</i>
<i>Pinus nelsonii</i>	Shaw	—
<i>Pinus oocarpa</i>	Schiede ex Schltdl.	var. <i>oocarpa</i> , <i>trifoliata</i>
<i>Pinus patula</i>	Schltdl. & Cham.	var. <i>patula</i> , var. <i>longepedunculata</i>
<i>Pinus pinceana</i>	Gordon	—
<i>Pinus ponderosa</i>	—	var. <i>scopulorum</i>
<i>Pinus praetermissa</i>	Styles & McVaugh	—
<i>Pinus pringlei</i>	Shaw	—
<i>Pinus pseudostrobus</i>	Lindl.	var. <i>pseudostrobus</i> , var. <i>apulcensis</i>
<i>Pinus quadrifolia</i>	Parl. ex Sudw	—
<i>Pinus radiata</i>	—	var. <i>binata</i>
<i>Pinus remota</i>	(Little) D.K. Bailey & Hawksw	—
<i>Pinus rzedowskii</i>	Madrigal & Caballer	—
<i>Pinus strobiformis</i>	Engelm	—
<i>Pinus strobus</i>	—	var. <i>chiapensis</i>
<i>Pinus tecunumanii</i>	Eguiluz & J. P. Perry	—
<i>Pinus teocote</i>	Schltdl. & Cham.	—

3.3 Distribución

Existen bosques de pino en todas las entidades federativas del país, su distribución geográfica coincide a grandes rasgos con la de los elevados macizos montañosos. Actualmente se reconocen cinco áreas de distribución de los bosques de pino: región I. Baja California Norte y Sur, II. Sierra Madre Occidental: Chihuahua, Durango, Jalisco, Nayarit, Sinaloa, Sonora y Zacatecas; III. Sierra Madre Oriental: Coahuila, Nuevo León, Querétaro, San Luis Potosí y Tamaulipas; IV. Faja Volcánica Transmexicana: Aguascalientes, Colima, Distrito Federal, Estado de México, Guanajuato, Hidalgo, Michoacán, Morelos, Puebla, Tlaxcala y Veracruz; V. Sierra

Madre del Sur, Macizo de Oaxaca, Sierra de San Cristóbal, Sierra de Oaxaca y Península de Yucatán: Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Campeche y Quintana Roo (Perry, 1991; Sánchez-González, 2008) (Fig.2).

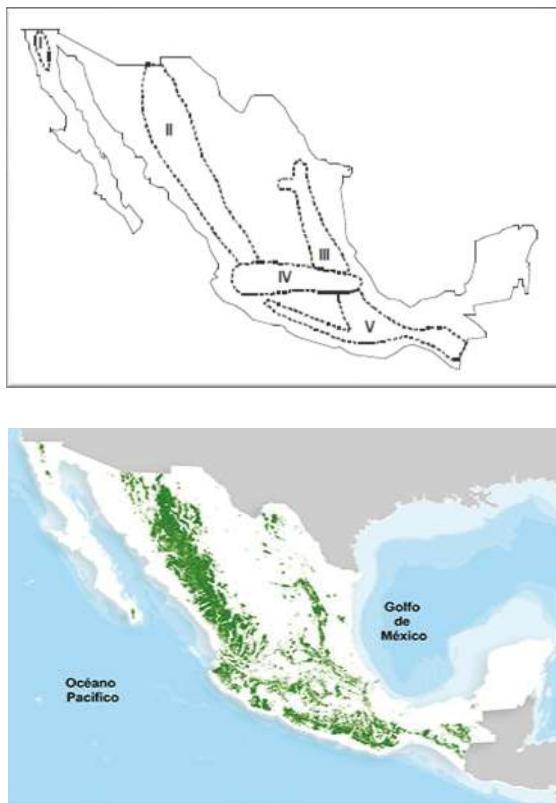


Figura 2. Áreas de distribución de bosque de pinos en México, modificado de Sánchez-González (2008).

3.4 Clima

La mayoría de las especies mexicanas de *Pinus* posee afinidades hacia los climas templados a fríos y semihúmedos y hacia los suelos ácidos. Sin embargo, existen algunas especies como *P. chiapensis* y *P. oocarpa* que han sido reportadas en ambientes cálidos, así como suelos alcalinos (Sáenz-Romero et al., 2006; 2016). Por otra parte, dentro de las mismas zonas de clima templado y semihúmedos los pinares no constituyen el único tipo de vegetación prevaleciente, pues compiten ahí

con los bosques de *Quercus* y a veces son los de *Abies*, de *Juniperus*, de *Alnus* y con algunas otras comunidades vegetales (Rzedowski, 2006).

3.5 Altitud

La distribución altitudinal de los pinos varía entre 1,500 y 3,000 msnm (metros sobre el nivel del mar) pero pueden alcanzar el límite superior de la vegetación arbórea que va en un rango de 3,650 msnm en el norte y 4,000 msnm en el centro y sur de México (Yeaton, 1982).

En el centro y sur del país esta línea se ubica aproximadamente a unos 4000 msnm de altitud, pudiendo sobrepasar localmente la cota de 4,100 msnm cuando la altitud de la montaña excede los valores mencionados, el pinar limita en su parte superior con los zacatonales o con otro tipo de vegetación alpina, en muchas partes de México los cerros menos elevados sobre todo entre 2,500 y 3,900 msnm llevan el pinar en sus cumbres y laderas superiores (Farjon, 1996; Perry, 1991).

De lo expuesto puede deducirse que una gran variedad de condiciones climáticas corresponde a los bosques del género *Pinus* en el territorio mexicano y en efecto los límites absolutos de distribución marcan tolerancia de temperatura media anual entre 6 y 28 °C; así como entre clima totalmente libre de heladas y otros en que este fenómeno puede presentarse en todos los meses del año (Rzedowski, 2006; Gil de María y Campos, 2014).

3.6 Suelo

El suelo es considerado como un cuerpo natural que subyace entre la litosfera y la atmósfera, es esencial para el reciclaje de materia orgánica muerta y en descomposición, el almacenamiento de nutrientes para las plantas, la desnaturalización de contaminantes, la filtración de agua, el secuestro de carbono, la moderación del clima, el almacenamiento de germoplasma y la provisión de hábitat para la biodiversidad generando la productividad primaria neta y sustenta

toda la vida terrestre al proporcionar las condiciones necesarias para su bienestar (Lal, 2016).

Es común observar que el contacto entre roca ígnea y sedimentaria marina corresponde a un límite neto entre el pinar y otra comunidad vegetal, la razón de esta preferencia por las rocas volcánicas no es del todo clara, aunque se ha evidenciado que la mayoría de las coníferas crece en suelos ácidos, en México se ha encontrado que los pinos tienen preferencia por áreas cubiertas por rocas ígneas tanto antiguas como recientes, también se les encuentra sobre gneis y esquistos, así como en margas, areniscas, lutitas y calizas, aunque sobre estas últimas con menor frecuencia (Rzedowski, 2006).

También se ha observado que en muchas regiones los pinares comparten su distribución con los encinares, especialmente en condiciones de clima subhúmedo donde la combinación con las rocas ígneas se derivan en suelos cuyo pH varía generalmente entre 5 y 7, incluso en zonas dominadas por caliza ya que estos suelos a menudo carecen de carbonato de calcio libre (Rzedowski, 2006; Sánchez-Velasquez et al., 2008).

Derivado de lo anterior, el suelo constituye un factor determinante para la distribución, productividad y regeneración de los bosques de pino, sus características físicas y químicas condicionan la disponibilidad de agua y nutrientes, la acumulación de carbono y la capacidad adaptativa frente a cambios ambientales. Sin embargo, el manejo del suelo también puede tener implicaciones importantes en la biomasa forestal, por ejemplo en la cuenca de Amanalco - Valle de Bravo en el Estado de México se observó que en plantaciones de *P. ayacahuite*, *P. pseudostrobus* y *P. patula* se han registrado variaciones importantes en el pH del suelo derivado del uso previo del (agrícola o ganadero), así como el uso de fertilizantes orgánicos o minerales y esto a su vez se relacionó con la cantidad de biomasa acumulada en los árboles (García Martínez et al., 2024).

Factores climáticos

4.1 Temperatura

A nivel fisiológico, la temperatura actúa como un modulador directo de procesos vitales como la fotosíntesis, la respiración y la transpiración, en este sentido, un aumento moderado de la temperatura puede, estimular la fotosíntesis acelerando la producción de biomasa y el crecimiento. Sin embargo, este efecto positivo tiene un punto de inflexión. Al superar ciertos umbrales térmicos, la transpiración se dispara, lo que aumenta la demanda de agua y provoca estrés hídrico en el árbol. Este estrés no sólo reduce la eficiencia fotosintética, sino que también limita la capacidad del pino para utilizar el carbono asimilado, lo que finalmente frena su crecimiento.

La relación entre temperatura y respiración es particularmente compleja. Aunque la respiración foliar y radicular tiende a aclimatarse a temperaturas más altas, reduciendo en parte las pérdidas de carbono, esta aclimatación no siempre es suficiente para compensar el impacto negativo del calor excesivo (Way & Oren, 2010) Esta respuesta adaptativa, que reduce la pérdida de carbono asociada al mantenimiento del tejido vivo, es crucial para la supervivencia del árbol en condiciones de calor prolongado (Bennett et al., 2020; Larjavaara et al., 2021).

La temperatura también desempeña un papel determinante en cómo los pinos distribuyen sus recursos, a través de la asignación de biomasa entre hojas, tallos y raíces lo cual es una estrategia de adaptación al clima local. En climas más fríos, los pinos tienden a invertir una mayor proporción de sus recursos en el desarrollo de las raíces esto se debe a que un sistema radicular más grande facilita la absorción de agua y nutrientes en suelos con baja actividad biológica (Reich et al., 2014).

Por el contrario, en climas más cálidos la prioridad cambia hacia la inversión en biomasa foliar, ya que un mayor follaje permite maximizar la captación de luz y por

ende la fotosíntesis, lo cual es vital en ambientes donde la radiación solar es intensa. Esta flexibilidad en la asignación de recursos demuestra la sofisticada respuesta de los pinos a las condiciones ambientales, permitiéndoles optimizar su crecimiento y supervivencia (Cita).

La sensibilidad al calor no es uniforme a lo largo de la vida de un pino; varía con la edad del árbol. Por ejemplo, estudios en *Pinus cooperi* han revelado que las temperaturas máximas invernales elevadas inhiben el crecimiento radial en ejemplares jóvenes. Sin embargo, un aumento en las temperaturas mínimas invernales favorece este crecimiento en la misma etapa, lo interesante es que estos efectos no se replican en árboles más viejos (Pompa-García et al., 2017). Esta diferencia puede deberse a que los árboles jóvenes, con sistemas radiculares y foliares menos desarrollados son más vulnerables a las fluctuaciones extremas de temperatura. En contraste, los árboles maduros, con sistemas más robustos y mayor capacidad de almacenamiento de recursos, pueden amortiguar mejor el impacto de las variaciones térmicas.

4.2 Precipitación

La precipitación es un factor climático crítico que regula la productividad y el almacenamiento de biomasa en los ecosistemas forestales. El agua, un recurso fundamental que no sólo determina la disponibilidad hídrica para el crecimiento sino que también moldea las estrategias adaptativas de las especies arbóreas. La capacidad de un árbol para crecer y producir biomasa está directamente ligada a la cantidad de agua disponible y a la eficiencia con la que la utiliza (McDowell et al., 2008).

En este sentido, para resistir el estrés por sequía, las plantas han desarrollado sofisticados mecanismos de adaptación. Levitt (1980) las categorizó en dos estrategias principales: la evitación de la sequía y la tolerancia a la deshidratación, la primera implica mecanismos que previenen la pérdida de agua, como el cierre de

estomas para reducir la transpiración o el desarrollo de un sistema radicular profundo que asegure la absorción de agua. La segunda permite a la planta mantener funciones vitales incluso en condiciones de deshidratación severa. En algunos casos ciertas especies completan su ciclo de vida durante la estación húmeda evitando de esta manera la sequía.

La asignación de recursos también es una respuesta crucial al déficit hídrico, por ejemplo, la relación biomasa radicular: parte aérea tiende a ajustarse para optimizar la captación de recursos. En condiciones de sequía, la planta puede priorizar el crecimiento de las raíces en detrimento de la parte aérea para buscar activamente agua en el suelo, este ajuste asegura que los recursos fotosintéticos se destinen a la estructura que minimiza la limitación hídrica (Fritts, 1976; Salisbury et al., 2000).

Otro fenómeno es observado cuando el déficit de agua reduce la presión de turgencia en las células, lo que inhibe la expansión celular y deriva en el crecimiento de estructuras como las hojas, para mitigar este efecto las plantas activan mecanismos como la inhibición de la expansión de las hojas y el alargamiento de las raíces, que son las partes más sensibles al déficit de agua. Estas respuestas buscan mantener un balance entre la absorción de agua por las raíces y la pérdida por transpiración en la parte aérea (Salisbury et al., 2000).

Biomasa.

5.1 Estimación de biomasa.

Para determinar la capacidad de captura de carbono de un tipo de vegetación, es indispensable conocer su biomasa. Para determinar la biomasa de los árboles y generar sus ecuaciones alométricas se utilizan métodos directos o destructivos los cuales implican la destrucción de los árboles evaluados, estos métodos se basan en el derribo y pesaje de la vegetación (Fehse et al., 2002)

Se distinguen dos tipos de biomasa forestal: la biomasa aérea y la biomasa subterránea.

La biomasa forestal se clasifica en dos componentes principales: biomasa aérea y biomasa subterránea. La biomasa aérea comprende el peso seco del material vegetal ubicado por encima del suelo incluyendo el fuste, la corteza, las ramas y las hojas de los árboles con un diámetro a la altura del pecho (DAP) mayor a 10 cm (Dauber et al., 2003). Por su parte, la biomasa subterránea está constituida por las raíces y otros componentes orgánicos presentes en el suelo.

La biomasa total de un ecosistema forestal se obtiene al sumar ambos componentes. Diversos estudios indican que la biomasa aérea representa la mayor proporción de la biomasa total mientras que la subterránea puede contribuir con hasta un 40 % de esta (Brown et al., 1993; FAO, 2010).

Por otro lado, la estimación de la biomasa aérea es relevante ya que permite inferir el contenido de carbono de la vegetación. Se ha determinado que el 50% de la biomasa corresponde al carbono contenido en la vegetación, lo que posibilita evaluar la capacidad de captura de carbono de la cubierta forestal (Álvarez-Dávila et al., 2017). En este sentido algunos estudios sugieren que la estimación del contenido de carbono se realiza multiplicando la biomasa por un factor que varía entre 0.40 y 0.55 la elección de este factor depende de la densidad de la madera de la especie estudiada (Díaz-Franco et al., 2007).

Ecuaciones Alométricas

Las ecuaciones alométricas son modelos matemáticos que se utilizan para estimar atributos de los árboles que son difíciles de medir directamente, como la biomasa y el carbono almacenado. Desde el punto científico y matemático son representaciones aritméticas, conjunto de proposiciones matemáticas que permite inferir teoremas a partir de suposiciones o postulados (Solano et al., 2019). Los modelos poseen estructuras dadas por la teoría, pero creadas para condiciones específicas, que pretenden exponer las características de una situación, explicando los procesos interrelacionados mediante la utilización de fórmulas matemáticas que simulen el estado actual de un supuesto (Chave et al., 2014).

En este contexto, la alometría se define como el estudio de las relaciones entre las dimensiones de los organismos y las variaciones en dichas dimensiones. Por ejemplo, de un árbol, con respecto a su tamaño total, es decir una ecuación matemática que relaciona la biomasa con variables del árbol, fácilmente medibles en pie (diámetro normal, altura de la copa, altura comercial, altura total)(Solano et al., 2019). Aplicando lo anterior a la cobertura forestal estos modelos son ecuaciones matemáticas que estiman e incluyen los valores de biomasa y variables como el carbono presente en los árboles y para su solución se requieren de las variables mencionadas puesto que ayudan a estimar el almacenamiento de carbono (Segura y Kanninen, 2005).

Antecedentes

En diversos estudios (Usuga et al., 2010; Pan et al., 2013; Álvarez-Dávila et al., 2017; Arasa-Gisbert et al., 2018; Fotis et al., 2018; Ali et al., 2019; Bennett et al., 2020; Balima et al., 2021; Jia et al., 2022; Li et al., 2022), se ha documentado que los factores climáticos como la temperatura y la precipitación se han identificado como moduladores clave de la productividad de la biomasa, estudios que analizaron grandes regiones han encontrado que la temperatura ejerce predominantemente

una influencia negativa en el crecimiento y la densidad de los árboles en los bosques boreales, templados y tropicales (Ma *et al.*, 2023). En este contexto, Alí *et al.* (2019) encontraron que la temperatura es el principal factor que influye en variables de crecimiento como el diámetro normal y como resultado afecta la productividad de biomasa. Se reportaron hallazgos similares en México (Arasa-Gisbert *et al.*, 2018), destacando específicamente a la temperatura media anual como la variable más fuertemente (negativamente) asociada con la biomasa. Así mismo las temperaturas mínimas también juegan un papel importante en la distribución de la biomasa en el árbol, esto a través de la estacionalidad (Reich *et al.*, 2014).

La asociación con la precipitación anual es inconsistente a escala global, mientras que algunos autores han estudiado un incremento en la biomasa total de árbol en gradientes de precipitación (Ma *et al.*, 2023). Otros observaron una relación diferente a nivel ecosistema (Ali *et al.*, 2020).

Objetivos

Objetivo general

Analizar la influencia de factores climáticos, particularmente la temperatura y la precipitación en la biomasa aérea de diez especies de pino en México, con el fin de identificar patrones espaciales y ecológicos que contribuyan al conocimiento y manejo sustentable de los bosques templados frente al cambio climático.

Objetivos Particulares:

- Estimar la biomasa aérea de diez especies de pino mediante ecuaciones alométricas basadas en variables dasométricas (altura total, DAP y densidad de la madera).
- Identificar los sitios con mayor y menor acumulación de biomasa, considerando su distribución espacial en el territorio nacional.
- Determinar las correlaciones entre la biomasa aérea y variables bioclimáticas a nivel de sitio, para reconocer diferencias en la respuesta de las especies frente a gradientes ambientales.

Material y Método

9.1 Selección de especies

Para la selección de especies se tomaron en cuenta cuatro criterios con base en la información disponible y de especie los cuales fueron: Los criterios de selección fueron: (1) especies con registros mayores a 1,000 observaciones, (2) establecimiento natural (no plantaciones), (3) distribuciones geográficas distintas en todo el país, con el fin de explorar las diversas adaptaciones que posee cada especie, y (4) que las especies representen alguna importancia económica, ecológica y/o cultural (Tabla 2).

Tabla 2. Descripción de las especies seleccionadas para el estudio.

Especie	Importancia ecológica, económica y/o cultural.	Descripción
<i>Pinus arizonica</i> Engelm	Madera	Se distribuye principalmente en la Sierra Madre Oriental. Los árboles maduros alcanzan una altura de entre 30 y 35 metros y DAP < 1 m. En los ejemplares maduros, la copa es redondeada y en los jóvenes es piramidal. Los conos son ovoides lustrosos y con resina. Se encuentra en bosques de coníferas y encinares, en la región norte del país, desde Durango hasta Chihuahua (CONAFOR-CONABIO, n.d.)
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenb. ex Schltl	Resina, madera y reforestación	Originario del centro de México hasta América Central, este árbol alcanza una altura de 35-40 metros y un DAP de hasta 2 metros con una copa cónica. Se encuentra en bosques de coníferas y encinos, y puede mezclarse con otros pinos y abetos en las montañas de México. Se extiende hasta la parte central del país, con grupos considerables en las montañas de Chiapas, Oaxaca y Guerrero, así como un pequeño grupo en Puebla y Tlaxcala (CONAFOR & CONABIO, n.d.-a)
<i>Pinus cembroides</i> Zucc.	Resina, madera, cocina y reforestación	Es una especie de baja altura, endémica de México y se extiende hasta el sur de Estados Unidos. El árbol crece de 5 a 10 metros y hasta 15 metros de altura, con un DAP de 30 cm y hasta 70 cm. Tiene un tronco corto con ramas delgadas y bien distribuidas, y suele crecer lentamente. Se encuentra en bosques de coníferas y encinos y es la especie más ampliamente distribuida en México (CONAFOR & CONABIO, n.d.-b)
<i>Pinus devoniana</i> Lindl	Madera y resina	Es un árbol nativo de México, que crece de 20 a 30 metros de altura con un DAP de 1 metro. Se establece en laderas de bosques de pino y pino-encino y se extiende desde el centro de México hasta el centro de Guatemala (CONAFOR & CONABIO, n.d.-c).
<i>Pinus leiophylla</i> Schiede ex Schltl. y Cham	Madera y reforestación	Es endémica de México, crece de 20 a 30 metros de altura con un DAP de 35 a 80 cm. Comienza a florecer entre los cinco y seis años de edad. Se encuentra en bosques de pino y pino-encino y se distribuye en Chihuahua, Durango, Zacatecas, Jalisco, Sinaloa, Nayarit, Colima, Michoacán, México, Tlaxcala, Puebla, Morelos, Veracruz y Oaxaca (CONAFOR & CONABIO, n.d.-d).

<i>Pinus montezumae</i> Lamb	Madera y resina	Endémico de México su distribución se extiende hasta Guatemala. Este árbol crece de 25 a 30 metros de altura con un DAP de 50 a 90 cm. Se encuentra en bosques de encino y coníferas. En México tiene una amplia distribución, extendiéndose desde la Sierra Madre Oriental, Sierra Madre del Sur y Sierra Madre de Chiapas (CONAFOR & CONABIO, n.d.-e).
<i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schltdl	Madera, resina y reforestaciones.	Endémico de originario de México y América Central. Es un árbol de tamaño mediano que crece de 12 a 18 metros de altura con un DAP de 40 a 75 cm. Se encuentra en bosques de encino y coníferas y se distribuye desde el noreste de México en Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Zacatecas, Durango, Nayarit, Michoacán, hasta el sureste de Guerrero, Oaxaca, Chiapas, y en la parte central del país en México (CONAFOR & CONABIO, n.d.-f).
<i>Pinus patula</i> Schltdl. y Cham	Madera y producción de papel.	Este árbol alcanza una altura de 30 a 35 metros y un DAP de 50 a 90 cm. Tiene una copa abierta y redondeada. El tronco es recto y sin ramas, presenta un crecimiento rápido. Se encuentra en pinares y bosques de pino-encino, y se distribuye naturalmente en las formaciones montañosas de la Sierra Madre Oriental, la Faja Volcánica Transversal y la Sierra Madre de Oaxaca (CONAFOR & CONABIO, n.d.-g).
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl	Resina, plantaciones comerciales.	Se le conoce como pino ortiguillo. Es originario de México, Guatemala y Honduras. Este árbol crece de 30 a 40 metros de altura, alcanzando ocasionalmente hasta 45 metros, con un DAP de 40 a 80 cm. El tronco es recto y sin ramas. Se encuentra en bosques de coníferas y bosques de pino-encino. En México se encuentra en los estados de Jalisco, Michoacán, Estado de México, Morelos, Puebla, Hidalgo, Tlaxcala, Oaxaca, Guerrero, Chiapas y se distribuye escasamente en el norte de México (CONAFOR & CONABIO, n.d.-h).
<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltdl. y Cham.	Resina y madera	Se le conoce como pino rojo, originario de México. Este árbol de tamaño medio alcanza los 25 m de altura en los árboles maduros. La copa es redondeada en los árboles maduros y densa con forma piramidal en los árboles jóvenes. Se encuentra en bosques de coníferas y tiene una amplia distribución. Se extiende a lo largo de la Sierra Madre Occidental desde el sur de Chihuahua hasta Chiapas, en la Sierra Madre Oriental desde Coahuila y Nuevo León hasta Hidalgo, y en el Estado de México, Puebla (CONAFOR & CONABIO, n.d.-i).

9. 2 Obtención de datos dasométricos.

Los datos fueron obtenidos del Inventario Nacional Forestal y del Suelo (INFyS) de México del ciclo 2009 al 2014 (para el comienzo del trabajo esta base era la más actualizada), los cuales fueron publicados por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) en su sitio web oficial <https://snmf.cnf.gob.mx/infys/> (última consulta el 23 de septiembre de 2023). Los datos incluyen información ecológica (tipo de vegetación, especies presentes, tipo de suelo, estado del suelo) de salud (árbol vivo, muerto, con daños, precencia de plaga) y dasométrica (altura total, comercial, diámetro a la altura del pecho, diámetro basal) de cada árbol que se encuentra dentro de los conglomerados de monitoreo.

Estos conglomerados o parcelas son equivalentes a una hectárea, de forma circular y dentro de ellos se evalúan cuatro sitios de muestreo secundario. Los conglomerados están distribuidos en todo el territorio mexicano mediante una red de puntos equidistantes con una distancia de 5 km entre ellos cuando la vegetación se trataba de Bosques y Selvas, para el presente estudio el inventario contaba con un total de 22 409 conglomerados (CONAFOR, 2017a).

Para el presente estudio se tomaron los datos dasométricos que proporcionan detalles como la identificación del grupo (sitios), las coordenadas geográficas (latitud y longitud), la altitud (metros sobre el nivel del mar), el nombre científico de la especie, el número de árboles por conglomerado, la altura total de cada árbol (en metros) y el diámetro a la altura del pecho de cada árbol (en centímetros).

9.3 Obtención de datos climáticos

Para cada conglomerado se obtuvieron datos bioclimáticos que comprenden 19 variables (BIOS) con una resolución espacial de 1 km² para cada sitio obtenidas de la página <https://www.worldclim.org/data/worldclim21.htm> (último acceso el 28 de septiembre de 2023). Estos datos bioclimáticos son variables estandarizadas extremas derivadas de la temperatura y precipitación con el fin de analizar mejor las tendencias biológicas según (O'Donnell y Ignizio, 2012) (Tabla 3).

Tabla 3. Descripción de variables bioclimáticas obtenidas de Worldclim2.

Variable	Descripción	Unidad
BIO1	Temperatura media anual.	°C
BIO2	Rango diario medio.	°C
BIO3	Isotermalidad (BIO2/BIO7)x100	-
BIO4	Estacionalidad de la temperatura (SDx100)	-
BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido.	°C
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío.	°C
BIO7	Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6)	-

BIO8	Temperatura media del cuarto más húmedo.	°C
BIO9	Temperatura media del trimestre más seco.	°C
BIO10	Temperatura media del cuarto más cálido.	°C
BIO11	Temperatura media del trimestre más frío.	°C
BIO12	Precipitación anual.	mm
BIO13	Precipitación del mes más húmedo.	mm
BIO14	Precipitación del mes más seco.	mm
BIO15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)	-
BIO16	Precipitación del cuarto más húmedo.	mm
BIO17	Precipitación del cuarto más seco.	mm
BIO18	Precipitación del cuarto más cálido.	mm
BIO19	Precipitación del trimestre más frío.	mm

9.4 Estimación de la biomasa.

Para asegurar la calidad y precisión de los datos, se realizó una búsqueda exhaustiva de ecuaciones alométricas en bases de datos, artículos científicos y tesis, la selección de las ecuaciones se basó en los siguientes criterios:

1.-Tamaño de muestra: Se priorizaron las ecuaciones que se diseñaron con el mayor número de individuos por especie.

2.-Rango de diámetro: Se seleccionaron aquellas ecuaciones que incluyeran el rango más amplio de diámetros de árboles.

3.-Tipo de bosque: Se eligieron ecuaciones desarrolladas en bosques naturales para evitar sesgos provenientes de plantaciones forestales.

4.- Ajuste del modelo: Las ecuaciones seleccionadas para cada especie debían tener el mayor coeficiente de determinación (R^2).

La biomasa aérea a nivel de árbol individual (BA) se calculó con cada ecuación seleccionada (Tabla 4). Posteriormente, este valor se extrapoló para obtener la densidad de biomasa aérea (ABd, en $t\ ha^{-1}$) siguiendo las directrices de muestreo del INFyS (CONAFOR, 2017b).

Tabla 4. Ecuaciones alométricas utilizadas para la estimación de la biomasa aérea
 AGB = Biomasa aérea DAP = Diámetro a la altura del pecho (cm).

Espezie	Ecuación	R ²	Autor
<i>Pinus arizonica</i>	AGB=(0.0819) * (DAP ^{2.4293})	0.97	Návar (2009)
<i>Pinus ayacahuite</i>	AGB=(0.2893) * (DAP ^{2.1569})	0.97	Návar (2009)
<i>Pinus cembroides</i>	AGB=exp(0.9173) * (DAP ^{1.0730})	0.98	Guerrero (2013)
<i>Pinus devoniana</i>	AGB=(0.182) * (DAP ^{1.936})	0.98	Méndez-González et al. (2011)
<i>Pinus leiophylla</i>	AGB=(0.1751) * (DAP ^{2.2629})	0.93	Návar (2009)
<i>Pinus montezumae</i>	AGB=(0.013) * (DAP ^{3.0462})	0.99	Carrillo-Anzúres et al. (2018)
<i>Pinus oocarpa</i>	AGB=(0.10012) * (DAP ^{2.4589})	0.96	Navarro-Martínez et al. (2020)
<i>Pinus patula</i>	AGB=(0.0948) * (DAP ^{2.4079})	0.99	Díaz-Franco et al. (2007)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	AGB=(0.003) * (DAP ^{3.383})	0.99	Méndez-González et al. (2011)
<i>Pinus teocote</i>	AGB=(0.2057) * (DAP ^{2.2583})	0.99	Návar (2009)

9.5 Limpieza de bases de datos.

Para eliminar posibles sesgos como, árboles duplicados o especies mal identificadas se realizó primero una inspección visual mediante estadística y graficos descriptivos eliminando los posibles datos que no correspondían a la altitud o altura reportada.

Posteriormente se relizó un análisis de componentes principales con la librería FactoMiner v2.8 con el programa Rstudio (Lê et al., 2008), para esto se tomaron los datos de las variables bioclimáticas para realizar una matriz de datos de esta manera estandarizando los datos que resulto en una elipse con un 95% de confianza, posterior a esto se eliminaron todos los sitios fuera de la elipse que correspondían a sitios con errores en la ubicación geográfica, inexistentes, así como altitudes extremas y especies que no correspondían a las ubicaciones geográficas, de acuerdo a lo estudiado en cada especie y los estudios históricos reportados por Martínez, 1948; Perry, 1991; Farjon, 1996; Rzedowski, 2006; Návar, 2009.

9.6 Distribución de la biomasa

Se realizaron mapas para determinar la distribución de los sitios con mayor y menor biomasa, para esto se tomó el total de la biomasa y se realizó una división en cinco grupos con una escala de 1 a 5, donde los sitios en el grupo uno son los sitios que obtuvieron “menos biomasa” con respecto a su total por especie, y el grupo 5 son los sitios con mayor biomasa de acuerdo a lo estimado en cada especie. Posteriormente se realizó la extracción de datos bioclimáticos en cada categoría y analizar cuáles son las condiciones que poseen estos sitios. Todo lo anterior se realizó utilizando el software QGIS v 3.14 (Moyroud y Portet, 2018).

9.7 Análisis estadísticos.

Para conocer las distribuciones y métodos estadísticos inferenciales se realizaron pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov con corrección de Lilliefors a todas las variables, utilizando la librería “rstatix” en Rstudio (Kassambara, 2023). Para

evaluar la influencia del clima en la variabilidad de la biomasa en las diez especies se utilizó una correlación de Spearman entre la densidad de la biomasa y las variables bioclimáticas, para esto se usó la librería "correlation" (De Mendiburo, 2009). Además, se calculó la significancia estadística de cada correlación, los resultados de las correlaciones fueron convertidos en un gráfico de calor donde sólo se muestran las correlaciones significativas ($p \leq 0.05$) para cada especie.

Finalmente, para corroborar una diferencia estadística entre los sitios con mayor y menor biomasa se realizó una prueba no paramétrica (U de mann-Whitney) con un 95%, sólo con las variables bioclimáticas que presentaron los valores más altos de correlación ($\rho = >0.22$) y significancia ($p < 0.05$), todo esto mediante la librería 'ggpubr' (Kassambara, 2023).

Resultados

Se determinó que *Pinus arizónica* es la especie con el mayor número de registros (árboles) por sitio (conglomerados con un área de 1 ha^{-1}) con un promedio de 27 y *P. ayacahuite* la especie con menos registros con un promedio de 7 árboles por sitio. En cuanto a las variables dasométricas, los árboles con el mayor promedio de altura fueron de las especies *P. patula* y *P. pseudostrobus* con un promedio de 13.37 m y 13.27 m respectivamente mientras que *P. cembroides* presentó los árboles con menor altura con 5.52 m, por otro lado, en cuanto al DAP *P. pseudostrobus* y *P. devoniana* fueron las especies de mayor DAP, contrario a árboles de *P. cembroides* que presentan menores valores promedio de DAP (14.82 cm) (Tabla 5). Respecto a la distribución altitudinal, *P. arizónica* se presentó a una mayor elevación con un promedio de 2,475 msnm., mientras que *P. devoniana* se presentó en menores altitudes con una media de 1,890 msnm (Fig.3).

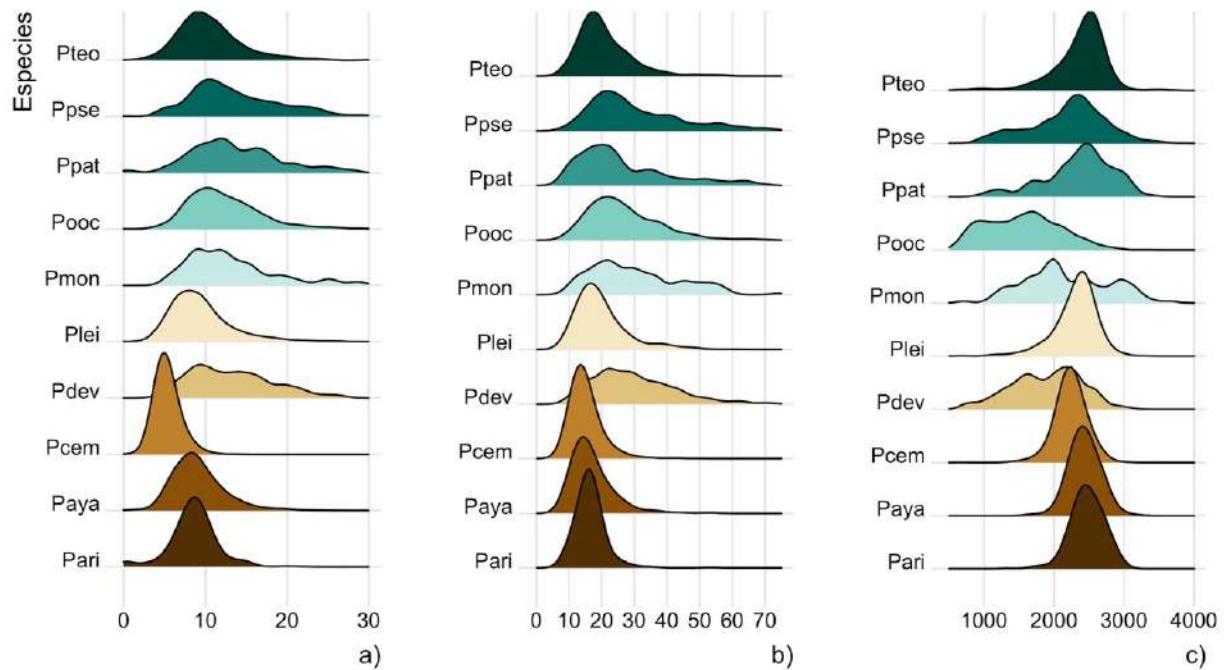


Figura 3. Distribución de las especies estudiadas en cuanto a las características dasométricas y su distribución altitudinal; a) Altura total (m), b) DAP (cm) y c) Altitud (msnm).

10.1 Densidad de la biomasa

Las pruebas de normalidad revelaron que los datos de dBA (densidad de la biomasa aérea) y las variables bioclimáticas no se ajustaban a una distribución normal ($p \leq 0.05$) lo que requería el uso de pruebas estadísticas no paramétricas. De acuerdo con la prueba de rangos de Kruskal-Wallis, las especies con la dBA más altas fueron *P. pseudostrobus*, *P. montezumae*, *P. patula* y *P. oocarpa* con valores promedio que oscilan entre 5,07 a 9,01 t ha^{-1} , destacando el potencial de sitios con *P. pseudostrobus* que alcanzaron hasta 99.78 t ha^{-1} .

Por el contrario, *P. devoniana* y *P. ayacahuite* promediaron 1.16 y 1.14 t ha^{-1} respectivamente, esto se debe principalmente a su distribución restringida y a la baja densidad de los rodales en los que se encuentran (Tabla 4).

Tabla 5. Resultados del análisis estadístico descriptivo e inferencial de las variables dasométricas y de biomasa estimada en las diez especies estudiadas.

Especie	Altura (m)			DAP (cm)			dBA (t ha ⁻¹)		
	Min	Max	Media	Min	Max	Media	Min	Max	Media
<i>P. arizonica</i>	0.20	29.50	8.57 ^e	7.50	61.50	16.62 ^f	0.013	19.07	3.11 ^c
<i>P. ayacahuite</i>	0.20	30.00	8.89 ^d	7.50	62.40	15.77 ^f	0.022	12.32	1.14 ^f
<i>P. cembroides</i>	0.20	16.20	5.52 ^f	7.50	60.50	14.82 ^g	0.002	14.30	2.33 ^d
<i>P. devoniana</i>	0.20	41.50	12.31 ^{ab}	7.50	85.10	24.55 ^a	0.010	12.40	1.16 ^f
<i>P. leiophylla</i>	0.20	35.00	9.60 ^d	7.50	67.80	18.39 ^e	0.020	26.45	1.92 ^e
<i>P. montezumae</i>	0.20	35.70	12.32 ^{ab}	7.50	97.00	24.76 ^{ab}	0.020	82.33	8.08 ^a
<i>P. oocarpa</i>	0.20	36.70	11.67 ^b	7.50	89.00	22.61 ^b	0.014	58.23	5.07 ^a
<i>P. patula</i>	0.20	36.70	13.37 ^a	7.50	84.90	20.88 ^c	0.010	53.59	6.66 ^a
<i>P. pseudostrobus</i>	0.20	44.40	13.27 ^a	7.50	101.0	25.54 ^a	0.010	99.78	9.01 ^a
<i>P. teocote</i>	0.20	33.00	10.28 ^c	7.50	71.10	19.21 ^d	0.022	30.14	3.48 ^b

Letras diferentes representan grupos diferentes de acuerdo a la prueba de Kruskall-Wallis ($\alpha = 0.05$), DAP: diámetro a la altura del pecho, dBA: densidad de la biomasa aérea.

10.2 Distribución de la biomasa

En general se observa que cada especie presenta una distribución diferente, en primer lugar *P. arizonica*, *P. ayacahuite* y *P. cembroides* se distribuyen principalmente en la región de la sierra madre occidental. Por otra parte, *P. devoniana* y *P. montezumae* presentan su distribución en la porción sur de la sierra madre occidental, así como en la faja volcánica transmexicana.

En el caso de *P. leiophylla* su distribución es notable a lo largo de toda la sierra madre occidental, así como la faja volcánica transversal y algunas regiones de la sierra madre del sur. En *P. oocarpa* muestra una marcada presencia a lo largo de la vertiente del pacífico en México.

Por su parte, *P. pseudostrobus* tiene una distribución preferente en la faja volcánica transversal y la porción sur de la sierra madre oriental. En cuanto a *P. patula* esta se distribuye principalmente en la parte central del Eje volcánico transversal. Finalmente, *P. teocote* se distribuye en la sierra madre del sur, sierra madre oriental,

Eje volcánico transversal, aunque se observa con una marcada presencia en la sierra madre occidental (Fig.4).

Tabla 6. Estimación de biomasa en cada grupo de las diez especies estudiadas.

Especie	Grupo 1 (menor biomasa)	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5 (mayor biomasa)
<i>P. arizonica</i>	0.02 - 0.39	0.40 - 1.05	1.06 - 2.59	2.60 - 5.10	5.11 - 19.09
<i>P. ayacahuite</i>	0.02 - 0.16	0.17 - 0.40	0.41 - 0.91	0.92 - 1.86	1.87 - 12.32
<i>P. cembroides</i>	0.01 - 0.34	0.35 - 0.86	0.87 - 1.73	1.74 - 3.51	3.52 - 23.7
<i>P. devoniana</i>	0.01 - 0.18	0.19 - 0.40	0.41 - 0.95	0.96 - 1.83	1.84 - 12.4
<i>P. leiophylla</i>	0.02 - 0.22	0.23 - 0.61	0.62 - 1.35	1.36 - 2.8	2.9 - 6.45
<i>P. montezumae</i>	0.02 - 0.73	0.74 - 2.14	2.15 - 5.17	5.18 - 10.60	10.61 - 82.34
<i>P. oocarpa</i>	0.01 - 0.82	0.83 - 2.25	2.26 - 4.52	4.53 - 8.54	8.55 - 58.23
<i>P. patula</i>	0.01 - 0.77	0.78 - 2.03	2.04 - 4.04	4.05 - 9.84	9.85 - 53.59
<i>P. pseudostrobus</i>	0.01 - 0.81	0.82 - 2.57	2.58 - 5.79	5.80 - 14.34	14.35 - 99.78
<i>P. teocote</i>	0.02 - 0.42	0.43 - 1.44	1.45 - 2.96	2.97 - 5.55	5.56 - 30.14

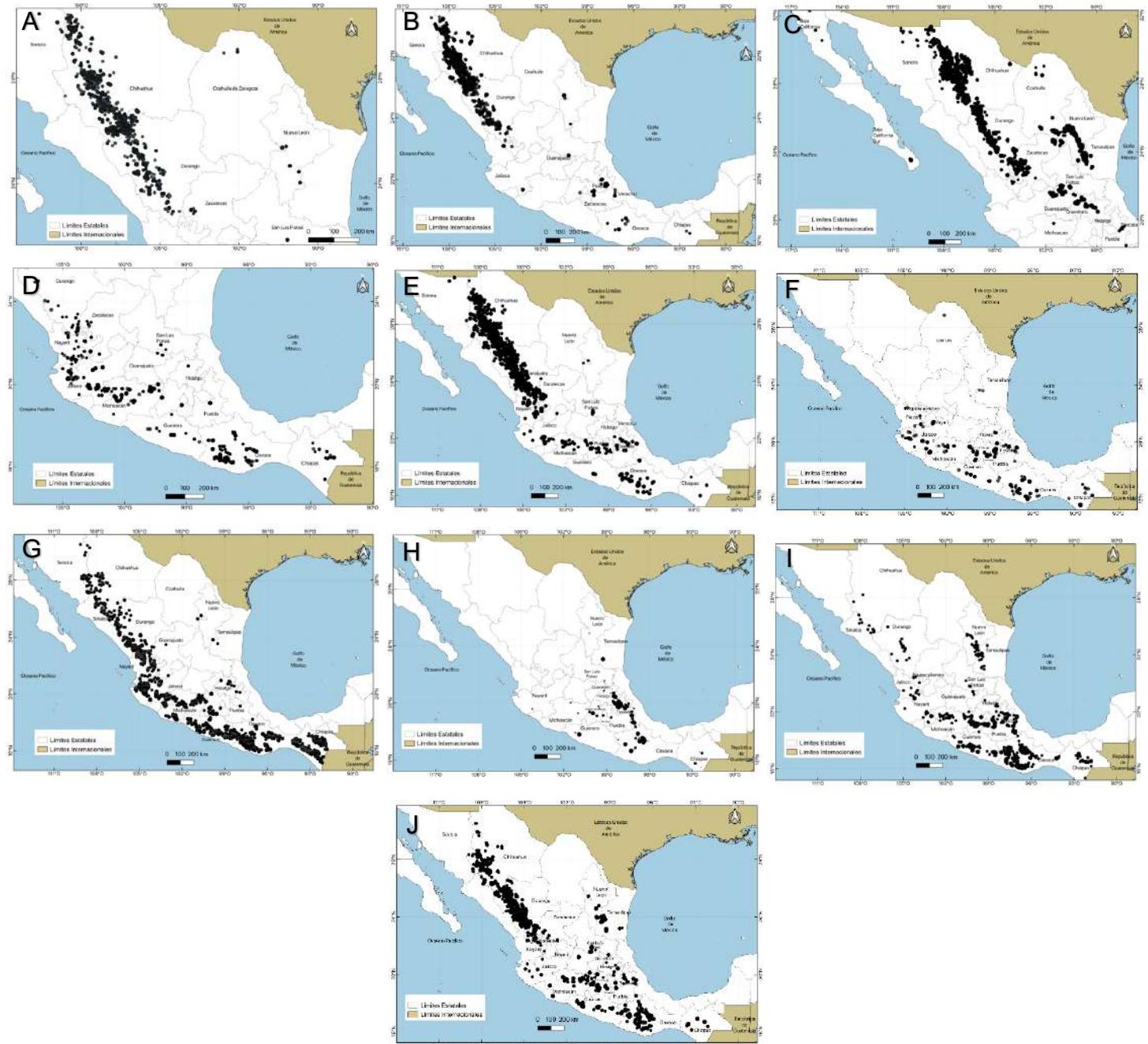


Figura 4. Distribución general de los sitios muestreados en las diez especies estudiadas; A) *Pinus arizonica*, B) *Pinus ayacahuite*, C) *Pinus cembroides*, D) *Pinus devoniana*, E) *Pinus leiophylla*, F) *Pinus montezumae*, G) *Pinus oocarpa*, H) *Pinus patula*, I) *Pinus pseudostrobus*, J) *Pinus teocote*.

10.3 Sitios con mayor biomasa.

De acuerdo a lo anterior en Oaxaca y Chihuahua son los estados que presentan más sitios con mayor producción de biomasa en tres especies (Tabla 6) (Fig.5-14).

Tabla 7. Estado de México con el mayor número de sitios con mayor biomasa en cada especie.

Estados	Especies	Número de sitios	Biomasa t/ha
Chihuahua	<i>P. ayacahuite</i>	99	1.87 - 12.32
	<i>P. cembroides</i>	86	3.53 - 23.7
	<i>P. arizonica</i>	73	5.11 – 19.08
Oaxaca	<i>P. pseudostrobus</i>	40	14.34 - 99.7
	<i>P. patula</i>	10	9.85 - 53.59
	<i>P. montezumae</i>	6	10.6 - 82.34
Oaxaca y Guerrero	<i>P. oocarpa</i>	40	8.55 - 58.23
Durango	<i>P. teocote</i>	69	5.56 - 30.1
	<i>P. leiophylla</i>	65	2.9 - 26.4
Jalisco y Michoacán	<i>P. devoniana</i>	13	1.84 - 2.4

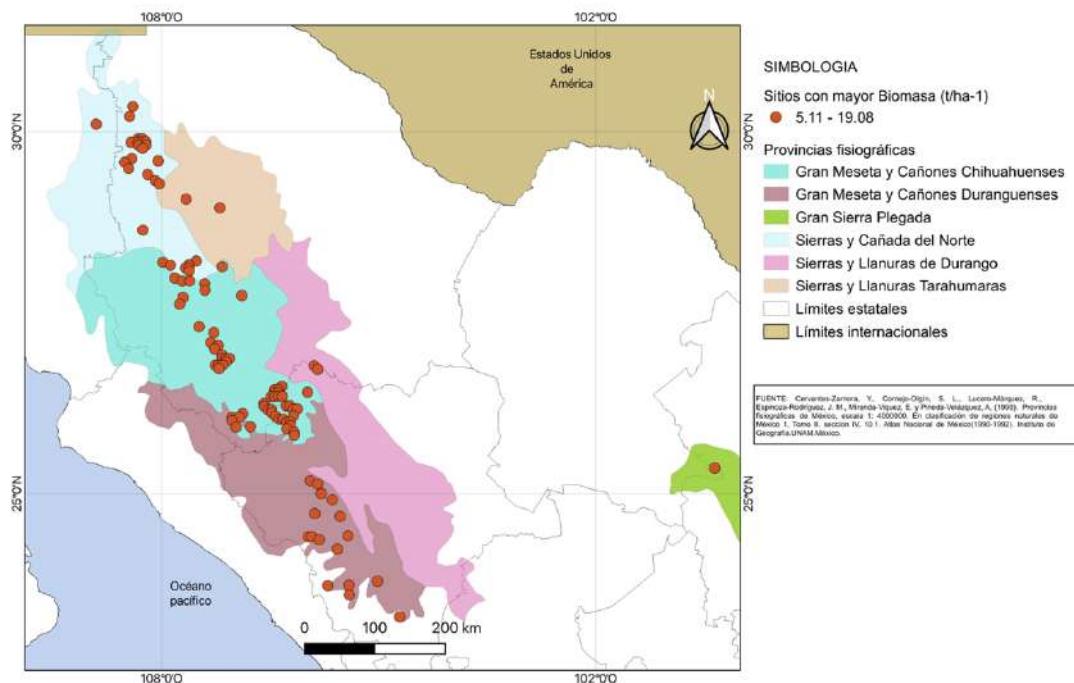


Figura 5. Distribución de los sitios con mayor biomasa en *Pinus arizonica* y las provincias fisiográficas donde se encuentran.

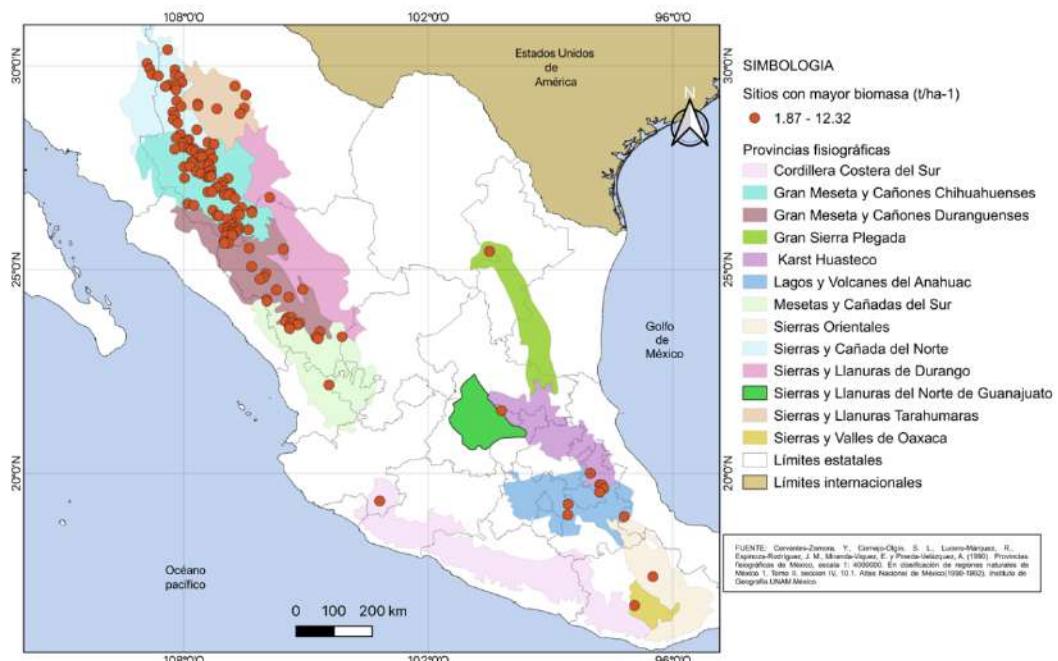


Figura 6. Distribución de los sitios con mayor biomasa en *Pinus ayacahuite* y las provincias fisiográficas donde se encuentran.

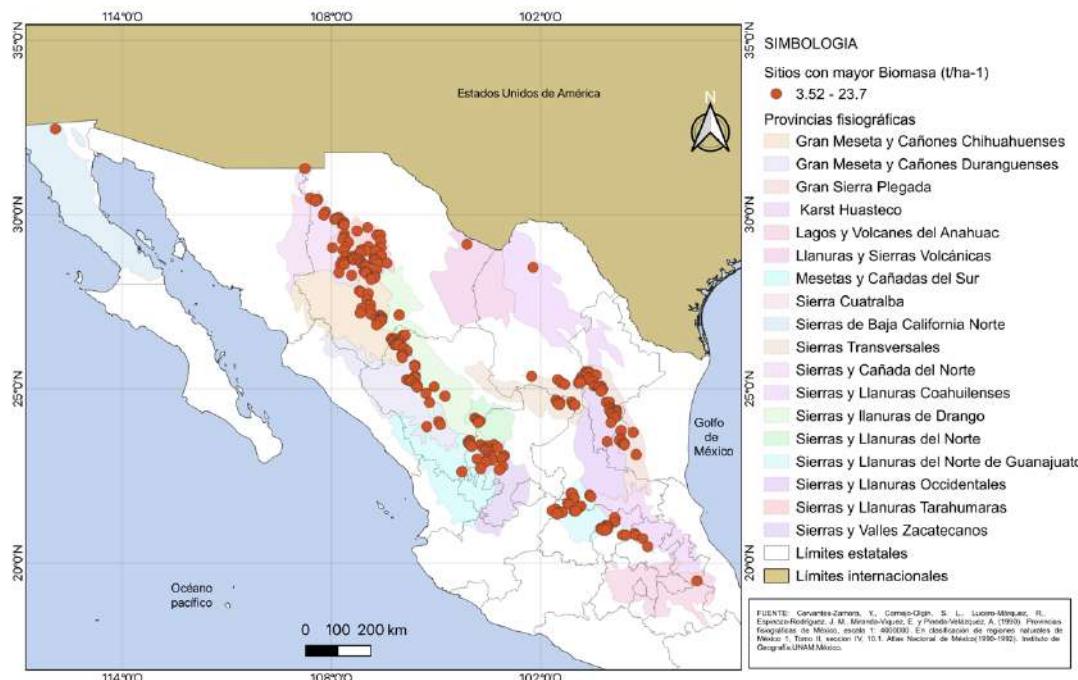


Figura 7. Distribución de los sitios con mayor biomasa en *Pinus cembroides* y las provincias fisiográficas donde se encuentran.

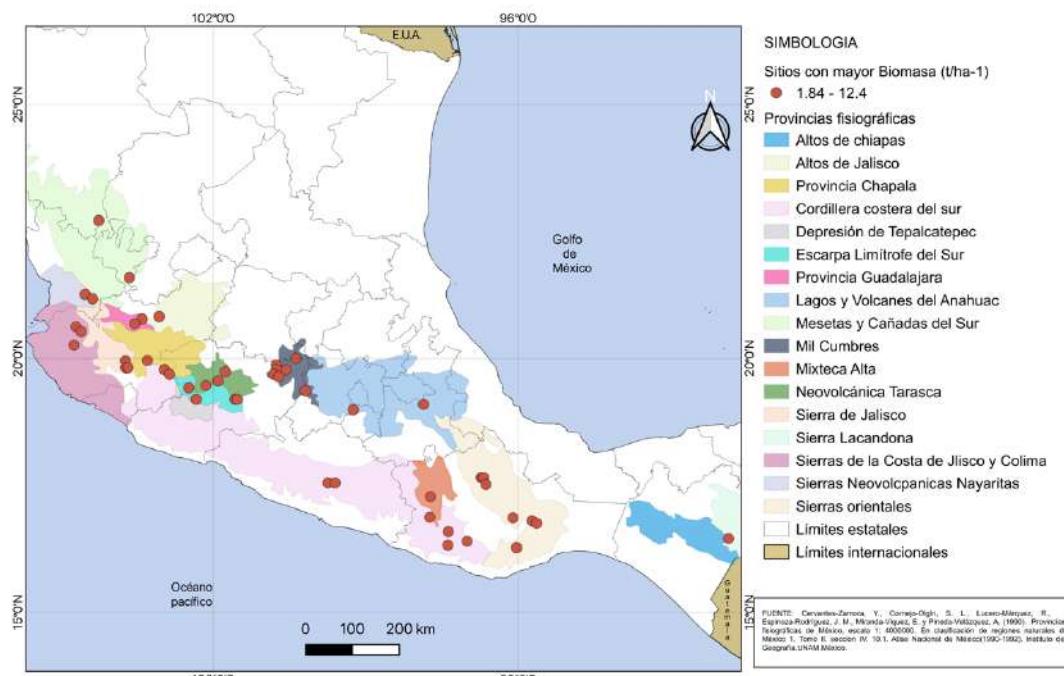


Figura 8. Distribución de los sitios con mayor biomasa en *Pinus devoniana* y las provincias fisiográficas donde se encuentran.

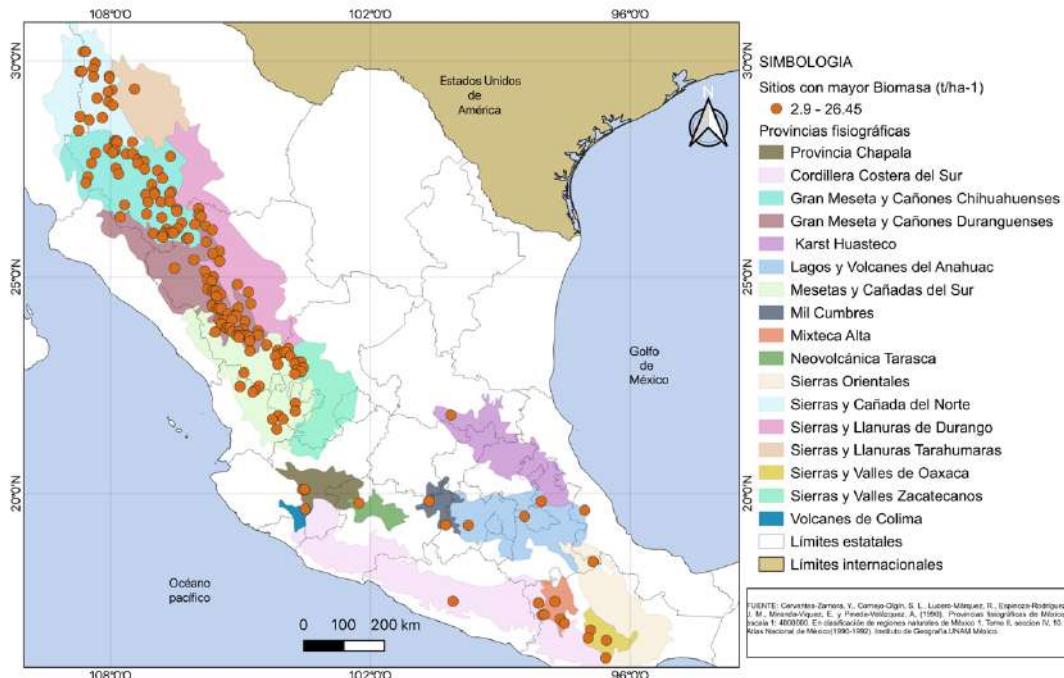


Figura 9. Distribución de los sitios con mayor biomasa en *Pinus leiophylla* y las provincias fisiográficas donde se encuentran.

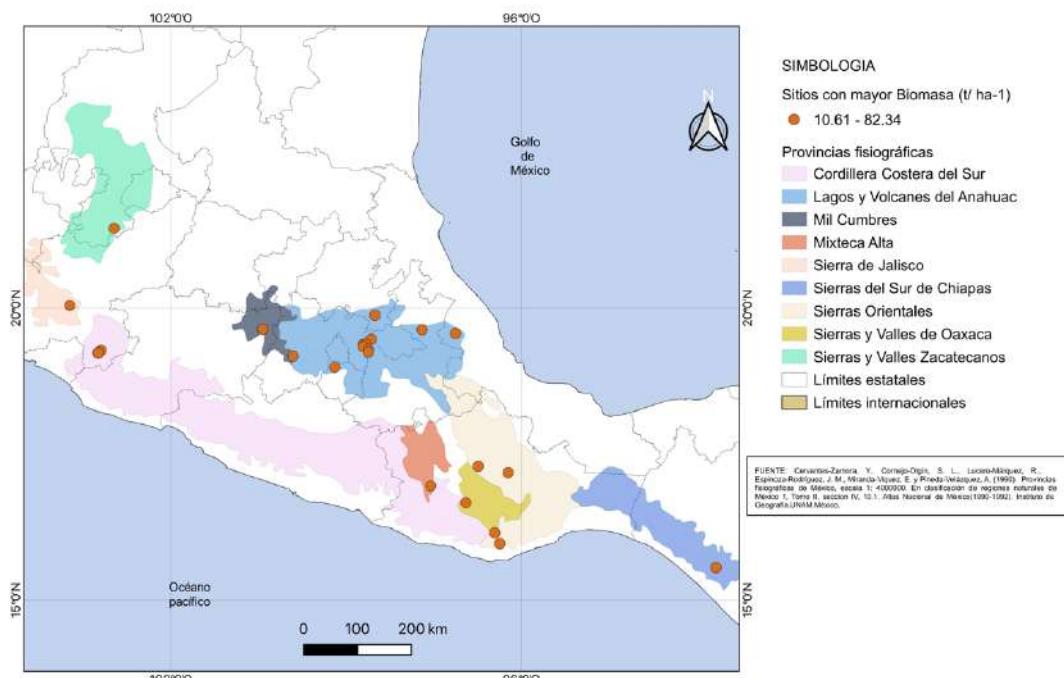


Figura 10. Distribución de los sitios con mayor biomasa en *Pinus montezumae* y las provincias fisiográficas donde se encuentran.

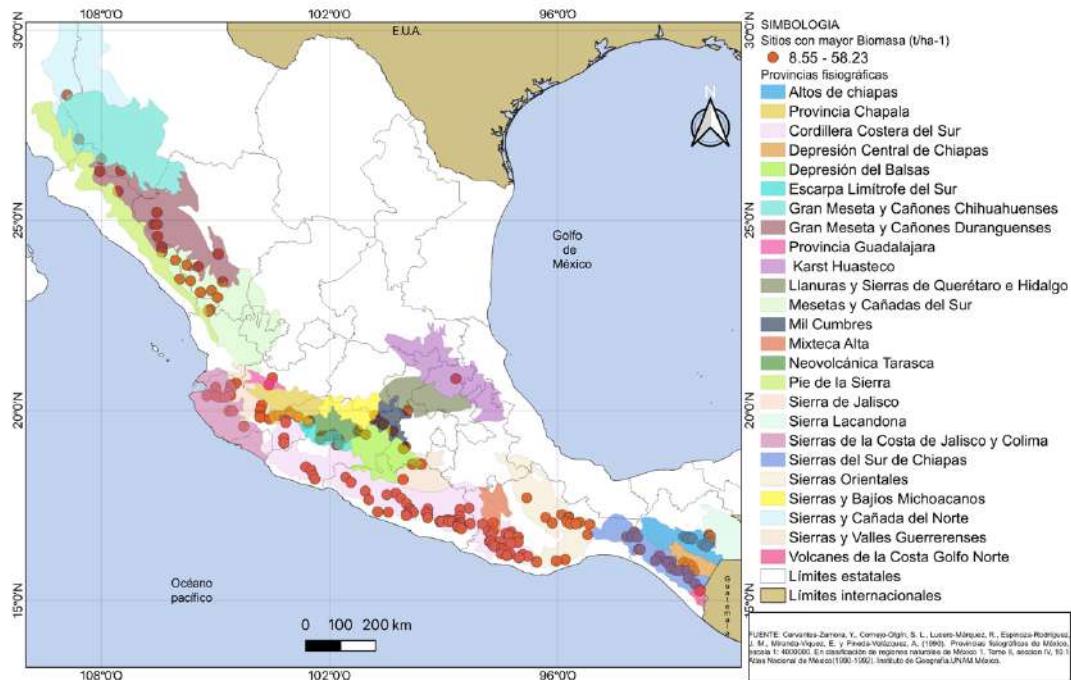


Figura 11. Distribución de los sitios con mayor biomasa en *Pinus oocarpa* y las provincias fisiográficas donde se encuentran.

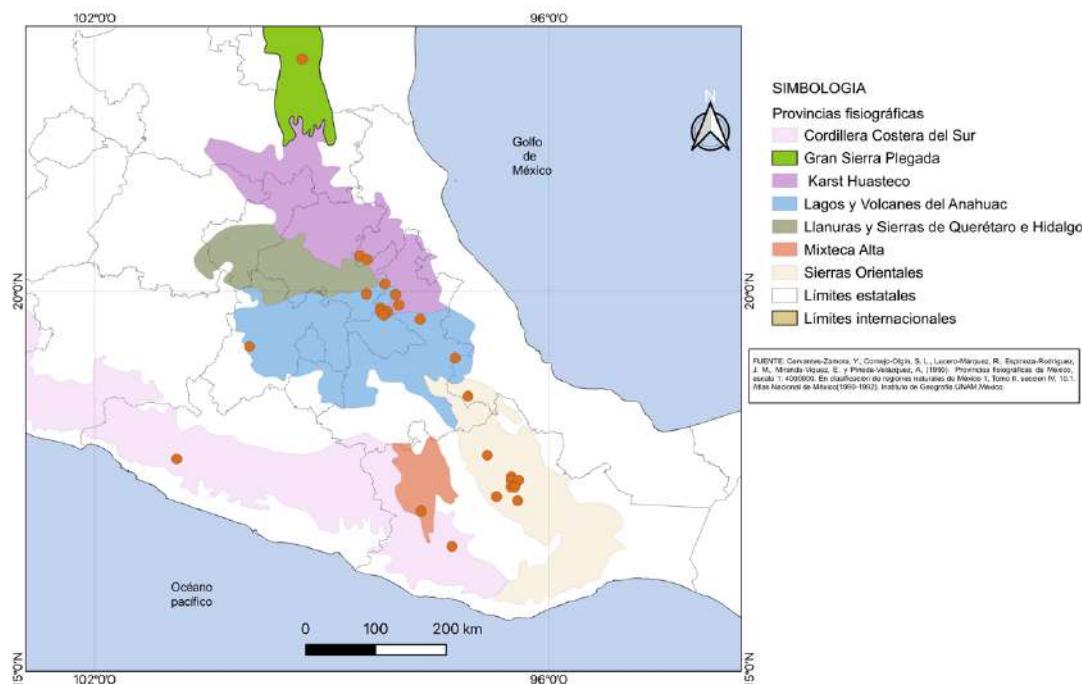


Figura 12. Distribución de los sitios con mayor biomasa en *Pinus patula* y las provincias fisiográficas donde se encuentran.

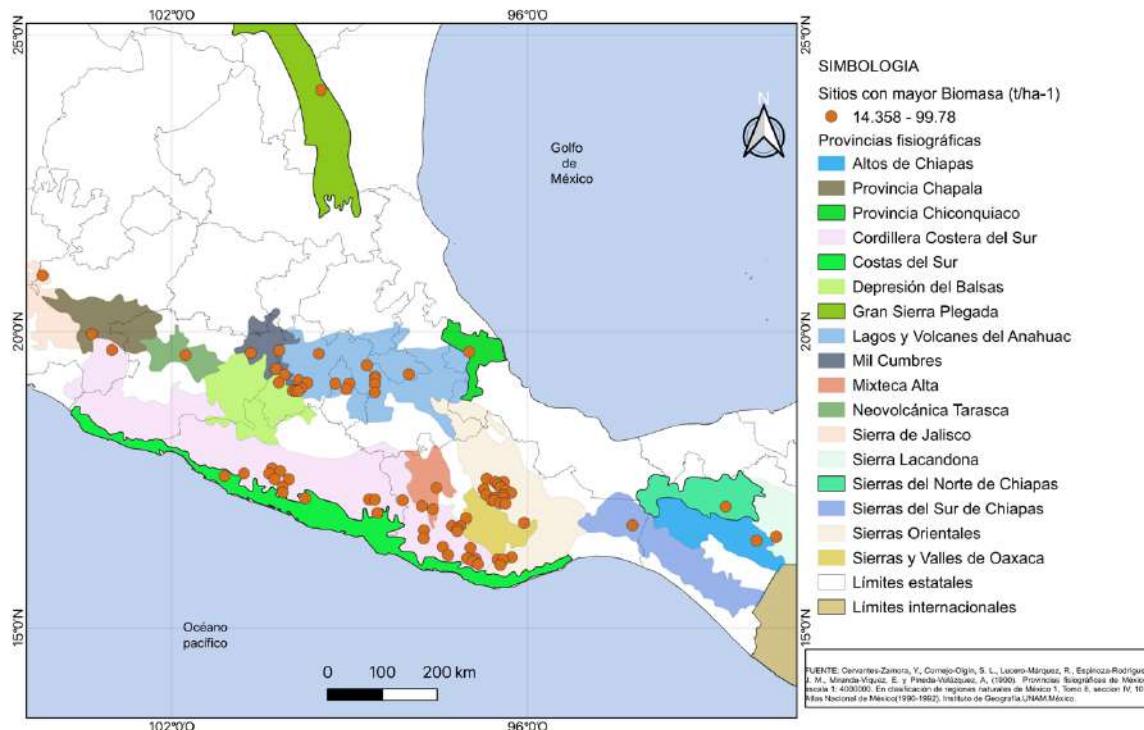


Figura 13. Distribución de los sitios con mayor biomasa en *Pinus pseudostrobus* y las provincias fisiográficas donde se encuentran.

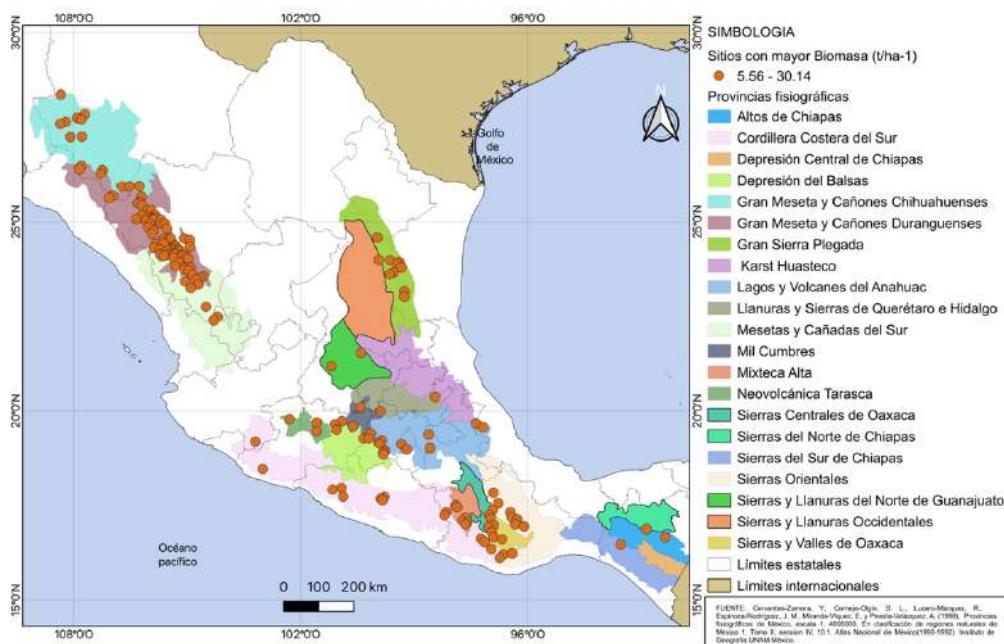


Figura 14. Distribución de los sitios con mayor biomasa en *Pinus teocote* y las provincias fisiográficas donde se encuentran.

10.4 Tolerancias climáticas

En cuanto a las tolerancias climáticas pudo observarse que las especies *P. oocarpa* y *P. pseudostrobus* son especies que toleran mejor las temperaturas altas (Fig.15- a). Por su parte cinco especies toleran bien las temperaturas mínimas extremas (Fig.15- d).

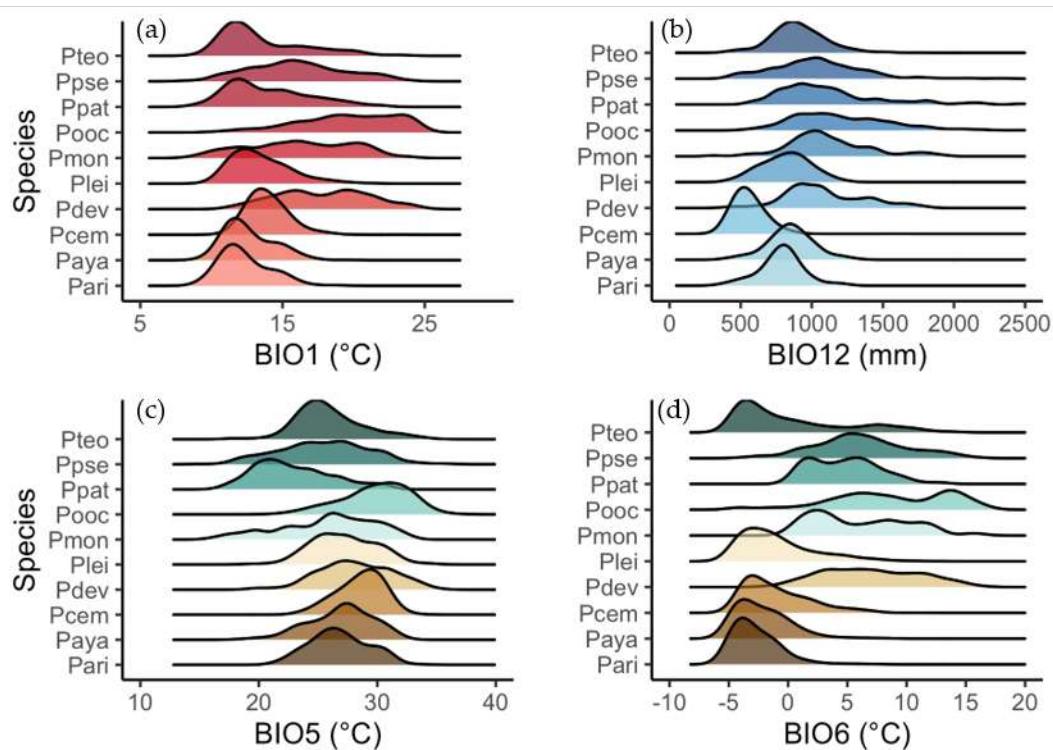


Figura 15. Distribución de las tolerancias climáticas en las diez especies estudiadas.

Influencia de las variables climáticas en la biomasa.

La distribución de los datos en cuanto los datos bioclimáticos no fueron uniformes, es decir, el 91.5% de las variables no presentaron una distribución bajo el supuesto de normalidad ($p < 0.001$), por lo que los análisis para determinar su correlación se hicieron mediante pruebas no paramétricas (Spearman).

De las diez especies de estudio, seis especies presentaron correlaciones significativas (Tabla 5). La especie que se correlaciona con más variables bioclimáticas es *P. cembroides* con 13 variables, mientras que *P. teocote* resultó con menores correlaciones con cinco variables. Por otro lado, *P. ayacahuite*, *P. montezumae*, *P. devoniana* y *P. patula* no presentaron correlación con ninguna de las 19 variables bioclimáticas.

Las correlaciones positivas más altas se observaron para las variables BIO12 (precipitación anual), en *P. leiophylla*, *P. oocarpa*, *P. pseudostrobus* y BIO 3 (isotermalidad) en *P. teocote* y *P. cembroides*. En cuanto a las correlaciones negativas los coeficientes más altos en orden descendente se mostraron en BIO1 (temperatura media anual) y BIO7 (rango anual de temperatura) en *P. arizonica* y *P. pseudostrobus*. También es importante mencionar que en cada especie se presentaron diferentes grupos de variables bioclimáticas interactuando con la biomasa (Fig.16).

Tabla 8. Resultado de las correlaciones significativas por especie.

Espece	Variable bioclimatica	Rho	Espece	Variable bioclimatica	Rho
<i>P. arizonica</i>	BIO1	-0.3***	<i>P. oocarpa</i>	BIO1	0.11*
	BIO5	-0.21***		BIO2	-0.22***
	BIO6	-0.27***		BIO3	0.16***
	BIO8	-0.21***		BIO4	-0.19***
	BIO9	-0.23***		BIO6	0.16***
	BIO10	-0.21***		BIO7	-0.22***
	BIO11	-0.25***		BIO9	0.11*
				BIO11	0.14***
				BIO12	0.14***
				BIO13	0.22***
<i>P. cembroides</i>	BIO2	-0.15***	<i>P. pseudostrobus</i>	BIO2	-0.27***
	BIO3	0.19***		BIO3	0.19**
	BIO4	-0.23***		BIO4	-0.24***
	BIO5	-0.16***		BIO5	-0.17*
	BIO6	0.18***		BIO7	-0.3***
	BIO7	-0.22***		BIO12	0.22***
	BIO8	-0.12***		BIO16	0.2***
	BIO10	-0.13***			
	BIO11	0.18***			
	BIO13	-0.15***			
	BIO16	-0.13***			
	BIO18	-0.15***			
	BIO19	-0.14***			
<i>P. leiophylla</i>	BIO3	0.22***	<i>P. teocote</i>	BIO2	-0.12*
	BIO4	-0.20***		BIO3	0.21***
	BIO5	-0.18***		BIO4	-0.22***
	BIO7	-0.18***		BIO7	-0.19***
	BIO8	-0.15***		BIO11	0.13**
	BIO10	-0.16***		BIO12	0.14**
	BIO12	0.24***			
	BIO13	0.18***			
	BIO16	0.21***			

En cuanto a la frecuencia de interaccion, BIO3 (temperatua), BIO4 (estacionalidad de temperatura), BIO7 (rango anual de temperatura) y BIO12 (precipitación anual), son las variables más frecuentes observándose en cinco de las seis especies que

presentaron correlación por el contrario, BIO19 (precipitación del cuarto más frío) es la variable menos frecuente presentándose en una especie (*P. arizonica*). Por otro lado, las variables BIO14 (precipitación de mes más seco) BIO15 (estacionalidad de la precipitación) y BIO17 (precipitación del mes más seco) no se correlacionaron con la biomasa en ninguna de las especies.

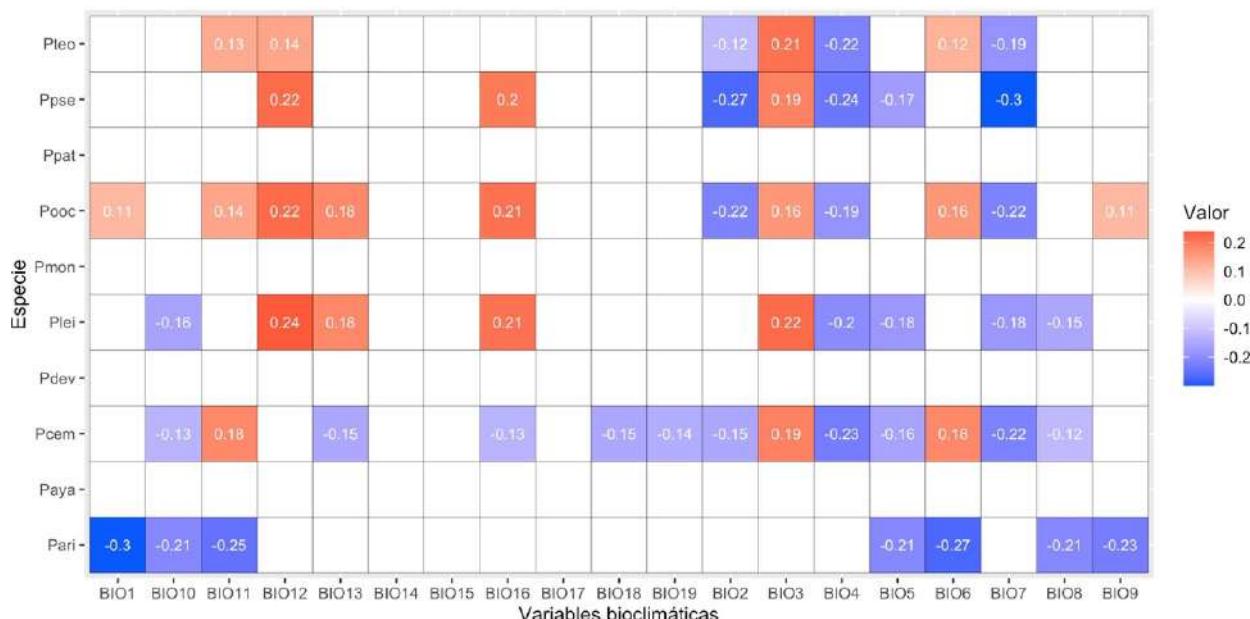


Figura 16. Mapa de calor de las correlaciones entre las variables bioclimáticas y producción de biomasa en las especies estudiadas; Pari = *P. arizonica*; Paya = *P. ayacahuite*; Pcem = *P. cembroides*; Pdev = *P. devoniana*; Plei = *P. leiophylla*; Pmon = *P. montezumae*; Ppat = *P. patula*; Ppse = *P. pseudostrobus*; Pteo = *P. teocote*.

También se obtuvieron los valores de las variables bioclimáticas que obtuvieron mayores coeficientes de correlación en cada especie (Tabla 8), estos valores nos sirven de referencia para ayudar a determinar los sitios en donde se podrían desarrollar programas de reforestación.

Tabla 9. Valores del análisis descriptivo por grupos de las variables bioclimáticas que obtuvieron los mayores coeficientes de correlación con la biomasa aérea en *Pinus arizonica*, *Pinus cembroides*, *Pinus oocarpa*, *Pinus leiophylla* y *Pinus teocote*. BIO1: temperatura media anual (°C); BIO4: estacionalidad de la temperatura (desviación estándar × 100); BIO7: rango anual de temperatura (BIO5 - BIO6); BIO12: precipitación anual (mm).

Grupo 1 (sitios con menor biomasa)						
	<i>Pinus arizonica</i>	<i>Pinus cembroides</i>	<i>Pinus leiophylla</i>	<i>Pinus oocarpa</i>	<i>Pinus pseudostrubus</i>	<i>Pinus teocote</i>
Variable	BIO1	BIO4	BIO12	BIO12	BIO7	BIO4
Min	9.10	168.80	431.00	600.00	13.30	101.19
Max	18.60	678.78	1230.00	2216.00	32.00	564.99
Media	12.86	458.46	778.01	1121.35	20.22	347.51
Mediana	12.67	490.94	774.00	1050.50	19.20	358.27
SD	1.67	120.52	171.03	317.93	4.10	99.50

Grupo 5 (sitios con mayor biomasa)						
	<i>Pinus arizonica</i>	<i>Pinus cembroides</i>	<i>Pinus leiophylla</i>	<i>Pinus oocarpa</i>	<i>Pinus pseudostrubus</i>	<i>Pinus teocote</i>
Variable	BIO1	BIO4	BIO12	BIO12	BIO7	BIO4
Min	8.74	195.01	542.00	692.00	13.00	74.84
Max	15.82	664.21	1940.00	2462.00	24.10	532.58
Media	11.57	387.17	898.22	1288.27	16.97	272.41
Mediana	11.23	350.06	904.50	1235.00	16.90	303.20
SD	1.47	124.36	162.16	338.90	2.36	110.99

Discusión de resultados

La distribución observada de las especies de pino estudiadas refleja con claridad los patrones biogeográficos previamente descritos para los bosques templados en México lo que confirma la coherencia ecológica de los datos analizados. En este sentido, la procedencia de las especies en las distintas regiones de México coincide con lo reportado por Perry (1991) y Rzedowski (2006), lo que reafirma la amplitud ecológica y la diversidad altitudinal del género *Pinus* en México.

En cuanto a la distribución de la biomasa la literatura disponible sobre el mapeo de biomasa aérea en México sigue siendo limitada. Los pocos estudios existentes se han enfocado principalmente en escalas locales o en la validación de métodos de teledetección, sin abordar comparativamente distintas especies de pino ni su relación con variables climáticas (Hernández Stefanoni et al., 2021; Rodríguez-Veiga et al., 2016). En este contexto, los resultados del presente trabajo aportan una perspectiva nacional integradora que amplía el conocimiento sobre la distribución espacial de la biomasa aérea y su variabilidad ecológica entre especies.

Los resultados sugieren que la Sierra Madre Oriental es la región con mayor biomasa para seis de las diez especies estudiadas, un hallazgo que coincide con otros estudios que consideran esta región como la de mayor diversidad de especies (Sánchez-González, 2008). Adicionalmente, se ha reconocido a esta región por el importante movimiento económico derivado del manejo de grandes áreas forestales (CONAFOR, 2021). Además, es importante mencionar que aunque *P. oocarpa* tiene una amplia distribución en la vertiente del Pacífico, los resultados del presente estudio indican que las mejores condiciones para su crecimiento se encuentran en la Faja Volcánica Transversal (FVT) y parte de la Sierra Madre del Sur, ya que en estos puntos se registraron los sitios con mayor biomasa (8.55 – 58.2 t/ha).

Variables climáticas

La variable que más se ha estudiado es la temperatura media anual que en estudios a gran escala se ha determinado que esta correlacionada positivamente con la biomasa en bosques de pino (Chen et al., 2023) esta aseveración coincide con lo estimado en *P. oocarpa* ya que en el presente estudio esta correlacionada positivamente con la biomasa (0.11), aunque no es el valor más alto. Sin embargo, esto no correspondería con *P. arizonica* ya que en el presente estudio la temperatura media anual fue la variable con un coeficiente negativo de correlación más alto (-0.3). No obstante, Aceves-Rangel et al. (2018) mencionan que la temperatura media anual es una variable que explica la distribución de esta especie.

Por otro lado, en *P. teocote*, *P. leiophylla* y *P. cembroides* la estacionalidad de la temperatura es la variable con los coeficientes más altos de correlación negativa (-0.22, -0.20, -0.23) con respecto a la biomasa sugiriendo que puede haber una afectación, algo similar fue descrito por Pompa-García y Hadad (2016), con poblaciones *Pinus cooperi* en México, llegando a la conclusión de que los árboles más jóvenes (<80 años) tienen afectaciones en el crecimiento de sus anillos cuando las temperaturas máximas fueron prolongadas. A su vez, esta idea coincide con Vieilledent et al. (2016); Bennett et al. (2020) ya que menciona que la temperatura a través de su estacionalidad funciona como un factor limitante en la acumulación de biomasa en bosques tropicales.

En cuanto a la precipitación anual (BIO12), *P. leiophylla*, *P. oocarpa*, *P. pseudostrobus* y *P. teocote* presentaron valores de correlación altos con respecto a la biomasa (0.24, 0.22, 0.22, 0.14) sugiriendo que esta variable tiene un efecto positivo, es decir, está asociada al aumento de la biomasa, esto es corroborado por Chen et al. (2023), ya que en su estudio encontraron que hubo una asociación positiva significativa con el aumento en la biomasa en bosques de pino. No obstante, es importante mencionar que en *P. cembroides* la precipitación anual mostró una correlación negativa.

Por último, en todas las correlaciones positivas, y dentro de los valores más altos pudo observarse la presencia de Isotermalidad y precipitación anual, lo que sugiere que la interacción de estas dos variables tiene efectos benéficos para la producción de biomasa en estas especies, si bien se ha mencionado que la precipitación es un factor positivo para la producción de biomasa (Poorter et al., 2016; Ali et al., 2019; Bennett et al., 2020; Wang y Ali, 2021), la isotermalidad no había sido observada tan claramente en otros estudios.

Se ha demostrado en estudios anteriores que la altitud juega un rol importante en la distribución de algunas especies del bosque templado (Lee et al., 2022), sin

embargo en el presente estudio no se estimaron correlaciones con esta variable, lo que deja un espacio para examinar en estudios posteriores.

Los resultados en general del presente estudio permiten identificar patrones climáticos y de distribución geográfica que influyen en la producción de biomasa, lo cual, resulta de suma importancia desde el punto para el desarrollo de programas de conservación y/o manejo forestal identificando zonas de alta y baja productividad, así como las variables climáticas de mayor significancia que se pueden ver modificadas por acciones como el cambio climático.

CAPITULO II

El siguiente capítulo muestra el artículo derivado del trabajo de tesis:

Climate as a Driver of Aboveground Biomass Density Variation: A Study of Ten Pine Species in México. Giron-gutierrez, D., Mendez-Gonzales, J., Osorno-Sanchez, T.G., Cerano-Paredes J., Soto-Correa, J.C., Cambrón-Sandoval, V.H. 2024. *Forests*. 15, 1160. <https://doi.org/10.3390/f15071160>.

Article

Climate as a Driver of Aboveground Biomass Density Variation: A Study of Ten Pine Species in Mexico

Dioseline Girón-Gutiérrez ¹ , Jorge Méndez-González ^{2,*}, Tamara G. Osorno-Sánchez ³ , Julián Cerano-Paredes ⁴ , José C. Soto-Correa ¹ and Víctor H. Cambrón-Sandoval ^{1,*}

¹ Faculty of Natural Sciences, Juriquilla Campus, Autonomous University of Queretaro, Av. de las Ciencias s/n, Juriquilla 76230, Querétaro, Mexico; diosely27@gmail.com (D.G.-G.); jocasoco@uag.mx (J.C.S.-C.)

² Department of Forestry, Autonomous Agrarian University Antonio Narro, Calz Antonio Narro 1923, Saltillo 25315, Coahuila, Mexico

³ Faculty of Natural Sciences, Aeropuerto Campus, Autonomous University of Queretaro, Carretera a Chichimequillas s/n, Ejido Bolafas 76140, Querétaro, Mexico; tamara.osorno@uag.mx

⁴ National Institute of Forestry, Agricultural and Livestock Research, National Center for Disciplinary Research Water-Soil-Plant-Atmosphere Relation, km 6.5 Margen Derecha Canal Sacramento, Gómez Palacio 35150, Durango, Mexico; cerano.julian@inifap.gob.mx

* Correspondence: jmendezg@hotmail.com (J.M.-G.); hugo.cambron@gmail.com (V.H.C.-S.)

Abstract: The native pine species of Mexico, constituting 55% of all pine species, play a crucial economic role for local populations. Climatic factors affected by climate change, such as temperature and precipitation, influence tree physiology and distribution. Our study focused on the aboveground biomass density (AGB_d) distribution of ten Mexican pine species and its correlation with bioclimatic variables. Dendrometric data were obtained from National Forest and Soil Inventory (INFyS) (period: 2009 and 2014) while data on bioclimatic variables were obtained from WorldClim2. AGB_d distribution maps were generated for the ten species. Spearman and Bayesian correlations were determined between AGB_d and the 19 bioclimatic variables. Six species showed a significant correlation ($p < 0.05$) between AGB_d and bioclimatic variables. The results did not show geographical regionalization for AGB_d and highlighted the complexity of responses in each species. Temperature variables showed the highest number of correlations with AGB_d (76%), which varied between species. Regarding precipitation, correlations were mostly positive. In general, our findings suggest an important link between climate and AGB_d , from which relevant strategies can be developed for sustainable forest management of the country's forests in relation to expected climate change.

Keywords: aboveground biomass; pine species; mean temperature; correlation



Citation: Girón-Gutiérrez, D.; Méndez-González, J.; Osorno-Sánchez, T.G.; Cerano-Paredes, J.; Soto-Correa, J.C.; Cambrón-Sandoval, V.H. Climate as a Driver of Aboveground Biomass Density Variation: A Study of Ten Pine Species in Mexico. *Forests* **2024**, *15*, 1160. <https://doi.org/10.3390/f15071160>

Academic Editor: José Aranha

Received: 22 May 2024

Revised: 28 June 2024

Accepted: 2 July 2024

Published: 3 July 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

In Mexico, temperate forests composed mainly of pines and oaks are of great economic relevance, as the genus *Pinus* contributes 70.9% of timber forest production [1]. They have cultural importance because at least 11.87 million people live in forest regions, 3.6 million of whom are indigenous peoples who have developed processes of governance, community organization, and forestry based on social cooperation [2]. They also have ecological importance, since they are present in the five mountainous regions of Mexico and are distributed over a wide range of temperatures, elevations, and precipitation levels, which is why Mexico is considered a center of diversification of the genus *Pinus*. In total, 55% of the pine species are endemic to Mexico, without taking into account recently described subspecies and varieties [3,4], which emphasizes the importance of conserving this type of vegetation.

In addition, climate change has had significant repercussions on the dynamics of temperate forests [5]. Forest ecosystems play a vital role in addressing climate change by serving

as large carbon sinks through photosynthesis. They store carbon in their plant tissues, mainly in the form of biomass in the aerial part (AGB), below ground, or in total, with about 50% of AGB consisting of carbon [6]. AGB refers to the total mass of living organic matter in a specific area [7]. Young, growing plants absorb more carbon in their biomass, while mature forests serve as significant carbon reservoirs [8]. It is estimated that forests globally can absorb approximately $2.4 \pm 0.4 \text{ Pg C year}^{-1}$ [9]. In Mexico, the estimated carbon stock in living biomass is $1.69 \text{ Gt C} \pm 1\%$, with an average carbon density of 21.8 t C ha^{-1} [10].

In this context, AGB and carbon sequestration in forests depend on plant biomass production, which is influenced by various factors. These factors include distribution, structure [11], stand density [12,13], diversity [14,15] forest type [16], slope and elevation [17,18], soil type [19], and of course climatic variables. For example, a study [12] found that temperature is the main factor affecting diameter and AGB, while precipitation was key for species richness in three types of forests. Another study [15] correlated climatic variables with carbon density in African forests and found that carbon density is positively correlated with mean annual precipitation but negatively correlated with mean annual temperature. Additionally, a global study [20] reported that mean annual temperature has a positive effect on the AGB accumulation rate in young coniferous forests and a negative effect in broadleaf deciduous forests. However, the association with annual precipitation is inconsistent on a global scale. At the individual tree level, significant correlations are also observed between temperature and biomass fractions, such as roots, foliage, and total biomass [21]. These factors collectively contribute to the dynamics of biomass.

In several studies [5,12–19,22], climatic factors such as temperature and precipitation have been identified as key modulators of biomass productivity. On a broader scale, larger studies have revealed that temperature predominantly exerts a negative influence on tree growth and density across boreal, temperate, and tropical forests [23]. Similar findings were reported in Mexico [16], highlighting mean annual temperature as the most strongly (negatively) associated variable with biomass. Minimum temperatures were also found to influence biomass distribution due to seasonality [21].

The CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project) scenarios and the shared socioeconomic pathways (SSP1 to SSP5) utilized by the IPCC have projected a consistent temperature increase trend. These scenarios indicate an average temperature rise of $1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (SSP1–1.9), while high-warming scenarios (SSP5–8.5) predict a temperature increase of up to $5.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ by 2100 [24]. This is expected to worsen issues in temperate forests, such as reduced timber yields, resilience, and biodiversity [25], as well as the spatial and temporal modification of AGB [10,26]. Projections for Mexico suggest a reduction in forest cover, particularly in temperate and cold forests [27]. Additionally, by 2050, projections suggest that approximately 20% of Mexican forests could experience a reduction in their coverage owing to the impacts of climate change. Moreover, a reduction of up to 50% in the natural range of certain commercially valuable species within the genus *Pinus* is anticipated [28].

Climate uncertainty underscores the necessity of comprehending the climatic patterns influencing or contributing to biomass productivity in each species. However, this specific relationship between climatic variables and aboveground biomass across different regions of Mexico remains poorly documented for pine species [16,28]. Our objective was to identify and quantify, using two approaches (Frequentist and Bayesian), the correlation between bioclimatic variables and aboveground biomass density (AGB_d) in ten economically and ecologically important pine species of Mexico. We hypothesized that there is a significant correlation between climate variables (temperature and precipitation) and the AGB_d of pine species in Mexico.

2. Materials and Methods

2.1. Characteristics of the Study Area and Species Selection

This study was realized in the forests of Mexico, covering an area of 1,960,189 km². The country is the 14th largest in the world and its coordinates are between latitudes 14°32'27" N and 32°43'06" N and longitudes 86°42'36" W and 118°27'24" W [29]. Due to the geographical location of the country, there is a great diversity of pine species found at altitudes ranging from 1500 to 3000 m above sea level, with some populations found as high as 4000 m. Pine species thrive in mean annual temperatures ranging from 6 °C to 28 °C and average annual precipitation ranging from 350 mm to over 2000 mm [4,21]. In other words, these species can adapt to a wide variety of temperature and precipitation conditions.

The species were selected based on the following criteria: (1) abundance, (2) natural establishment (not plantations), (3) different geographical distributions across the country, and (4) economic and ecological importance [30]. In this study, ten pine species were selected, including *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. and Cham; *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl. and Cham; *Pinus montezumae* Lamb; *Pinus pseudostrobus* Lindl; and *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl; these are resin-rich species that serve as economic sustenance for local populations [4,31–33]. *Pinus oocarpa*, distributed throughout Mexico, has served as a model for assisted migration implementation [34] (Table S1).

Other chosen species included *Pinus devoniana* Lindl and *Pinus cembroides* Zucc, which are significant species in restoring severely eroded sites [35–37]. Additionally, *P. cembroides* is renowned for its seed consumption in a wide variety of traditional Mexican dishes and is widely distributed across Mexico [38,39]. Also selected was *Pinus arizonica* Engelm., as its distribution is restricted to northern Mexico (hence its importance for conservation). The final selections, *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl. and *Pinus patula* Schltdl. and Cham, are widely used for their timber quality [4,40–42] (Table S1).

2.2. Database Acquisition

The data were collected from the National Forest and Soil Inventory (INFyS) platform of Mexico for the years 2009 to 2014; these datasets were published by the National Forestry Commission (CONAFOR) on its official website <https://snmf.cnf.gob.mx/infys/> (accessed on 23 September 2023). The data include ecological, health, and dasometric information. Dasometric data provide details such as cluster ID (sites), geographic coordinates (latitude and longitude), altitude (meters above sea level), scientific name of the species, number of trees, total height of each tree (in meters), and diameter at breast height of each tree (in centimeters). To be included in the inventory, individual trees must have a minimum diameter at breast height (DBH) of 7.5 cm, and only trees meeting this criterion have all their information recorded [43].

Additionally, bioclimatic data, comprising 19 variables (BIOS) with a spatial resolution of 1 km² for each site, were obtained from <https://www.worldclim.org/data/worldclim21.htm> (accessed on 28 September 2023) [44] (Appendix A). These data were obtained using the coordinates of each site.

2.3. Aboveground Biomass Estimation and Data Cleaning

The aboveground biomass (AGB) was calculated using published equations for each species (refer to Table 1) based on the following criteria for equation selection: (i) the equation with the largest sample size, (ii) including the widest range of tree diameter categories, (iii) developed in natural forests, and (iv) with the highest fit (R^2). AGB was calculated at the individual tree level and then extrapolated to density, AGB_d (t ha⁻¹), according to the INFyS sampling methodological guidelines [43].

The AGB_d data underwent refinement using principal component analysis (PCA). In this process, the bioclimatic variable values obtained in the previous section were extracted for each site or cluster using GIS. A matrix was then created with AGB_d , altitude, and 19 bioclimatic variables. The PCA was conducted with standardized variables, resulting in a 95% confidence ellipse. Data outside the ellipse were identified and considered as atypical,

and were eliminated from the database. FactoMineR, an R library ver. 2.8 package [45], was utilized for this analysis. The eliminated sites included data entry errors, incorrect geographic locations of the species, and misidentified species [46,47].

Table 1. Equations used to estimate aboveground biomass.

Species	Equation	R ²	n	Author
<i>P. arizónica</i>	AGB = (0.0819) * (DBH ^{2.4293})	0.97	66	[47]
<i>P. ayacahuite</i>	AGB = (0.2893) * (DBH ^{2.1569})	0.97	58	[47]
<i>P. cembroides</i>	AGB = exp(0.9173) * (DBH ^{1.0730})	0.98	30	[48]
<i>P. devoniana</i>	AGB = (0.182) * (DBH ^{1.936})	0.98	20	[49]
<i>P. leiophylla</i>	AGB = (0.1751) * (DBH ^{2.2629})	0.93	27	[47]
<i>P. montezumae</i>	AGB = (0.013) * (DBH ^{3.0462})	0.99	16	[50]
<i>P. oocarpa</i>	AGB = (0.10012) * (DBH ^{2.4589})	0.96	33	[51]
<i>P. patula</i>	AGB = (0.0948) * (DBH ^{2.4079})	0.99	25	[52]
<i>P. pseudostrobus</i>	AGB = (0.003) * (DBH ^{3.383})	0.99	20	[49]
<i>P. teocote</i>	AGB = (0.2057) * (DBH ^{2.2583})	0.99	56	[47]

Note: AGB: total aboveground biomass (kg); DBH: diameter at breast height (cm); n: number of trees.

In addition, cartographic representations were created to visualize the spatial distribution of the species and AGB_d quantities. AGB_d was divided into two categories: lower AGB_d (quantile 1 = 0–20 t ha⁻¹) and higher AGB_d (quantile 5 = 80–100 t ha⁻¹), and these categories were then mapped using QGIS software (ver. 3.28, Firenze) [53].

2.4. Statistical Analysis

In this study, we utilized the ‘psych’ library in Rstudio software v.2023.09.1+494 “Desert Sunflower” Release [54,55] to compute descriptive statistics for the variables DBH, H, number of trees, and AGB_d per species. Following this, we applied the Kruskal–Wallis non-parametric test (owing to the non-normality of the variables) using the ‘agricolae’ R library [55] to ascertain whether there were significant differences ($\alpha = 0.05$) in the medians of DBH, H, and AGB_d among species. To discern the climatic tolerances and preferences of each species, we generated density plots for the variables BIO1, BIO12, BIO5, and BIO6 (Figure 1) to understand how species are distributed in relation to these climatic variables.

To determine the distribution of the variables of interest, Kolmogorov–Smirnov normality tests with Lilliefors correction were applied to AGB_d and the 19 bioclimatic variables, using the ‘rstatix’ library [56]. To assess the influence of climate on the variability of AGB_d in pine species in Mexico, we used Spearman’s correlation between AGB_d and each of the bioclimatic variables, using the ‘correlation’ library [55]. In addition, we calculated the statistical significance of each relationship and the confidence intervals of “ p ”. From this, a heatmap was derived, showing only statistically significant correlations ($p < 0.05$) for each species.

To strengthen our findings, we have augmented our analysis with Bayesian correlation (Spearman’s). This approach provides a full probability distribution for the correlation coefficient, offering a detailed and comprehensive representation of the uncertainty associated with our estimations [57,58]. In the context of our correlation, the null hypothesis would be no correlation between the two variables ($H_0 : \rho = 0$; where ρ stands for Bayesian correlation coefficient), while the alternative hypothesis would be that there is a correlation different than 0—positive or negative ($H_1 : \rho \neq 0$).

Finally, using the ‘ggpubr’ library [58], the non-parametric Mann–Whitney U test (95%) was applied exclusively to those significant correlations ($p < 0.05$) with coefficients greater than $\rho = > |0.22|$ between AGB_d and the bioclimatic variables (BIOs). This was done to identify possible statistical differences in the values of the BIOs between quantile 5 and the rest of the quantiles, thus providing an additional way to determine whether the variation of AGB_d is influenced by climate.

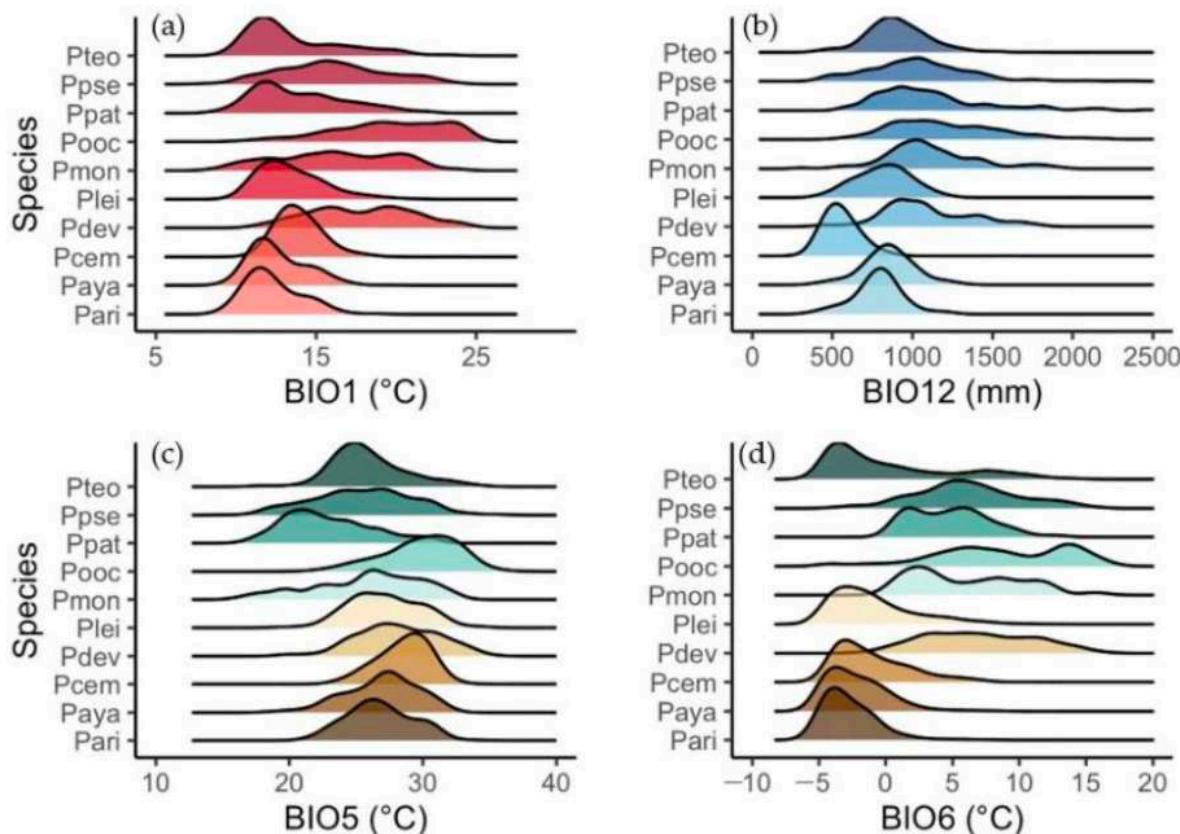


Figure 1. Climatic tolerances of 10 Mexican conifer species—BIO1: mean annual temperature (a); BIO12: mean annual precipitation (b); BIO5: maximum temperature of the warmest month (c); BIO6: minimum temperature of the coldest month (d). Pari: *Pinus arizonica* Engelm; Paya: *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl.; Pcem: *Pinus cembroides* Zucc; Pdev: *Pinus devoniana* Lindl; Plei: *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. and Cham; Pmon: *Pinus montezumae* Lamb; Pooc: *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl.; Ppat: *Pinus patula* Schiede and Cham; Ppse: *Pinus pseudostrobus* Lindl; Pteo: *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl.

3. Results

3.1. Basic Comparative Analysis

Pinus cembroides was the species with the most trees recorded ($n = 21,494$), distributed in 1238 sites, indicating a wide adaptation to a variety of climatic conditions (Appendix A). In contrast, *P. montezumae* had the fewest records ($n = 1475$) at 119 sites. In terms of height, *P. cembroides* (5.30 ± 1.40 m) and *P. arizonica* (8.52 ± 2.59 m) had the lowest averages, while *P. pseudostrobus* (14.07 ± 6.20 m) and *P. patula* (13.92 ± 5.82 m) had the highest averages.

The normality tests revealed that AGB_d data and bioclimatic variables did not conform to a normal distribution ($p < 0.05$), thus necessitating the use of non-parametric statistical tests. According to the above-stated approach, per the Kruskal–Wallis rank test, the species with

the highest AGB_d were *P. pseudostrobus*, *P. montezumae*, *P. patula*, and *P. oocarpa* (5.07–9.01 t ha^{-1}), with *P. pseudostrobus* at up to 99.78 t ha^{-1} , highlighting the capacity of these species to accumulate large amounts of biomass due to their dimensions and the density of trees in the stand. In contrast, *P. devoniana* and *P. ayacahuite* averaged 1.16 and 1.14 t ha^{-1} , respectively, which is due to their restricted distribution and low stand tree density (Table 2).

Table 2. Descriptive and inferential analyses of dasometric variables and aboveground biomass density in the species studied.

Species	H (m)			DBH (cm)			AGB_d (t ha^{-1})		
	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
<i>P. arizonica</i>	0.20	29.50	8.57 ^e	7.50	61.50	16.62 ^f	0.013	19.07	3.11 ^c
<i>P. ayacahuite</i>	0.20	30.00	8.89 ^d	7.50	62.40	15.77 ^f	0.022	12.32	1.14 ^f
<i>P. cembroides</i>	0.20	16.20	5.52 ^f	7.50	60.50	14.82 ^g	0.002	14.30	2.33 ^d
<i>P. devoniana</i>	0.20	41.50	12.31 ^{ab}	7.50	85.10	24.55 ^a	0.010	12.40	1.16 ^f
<i>P. leiophylla</i>	0.20	35.00	9.60 ^d	7.50	67.80	18.39 ^e	0.020	26.45	1.92 ^e
<i>P. montezumae</i>	0.20	35.70	12.32 ^{ab}	7.50	97.00	24.76 ^{ab}	0.020	82.33	8.08 ^a
<i>P. oocarpa</i>	0.20	36.70	11.67 ^b	7.50	89.00	22.61 ^b	0.014	58.23	5.07 ^a
<i>P. patula</i>	0.20	36.70	13.37 ^a	7.50	84.90	20.88 ^c	0.010	53.59	6.66 ^a
<i>P. pseudostrobus</i>	0.20	44.40	13.27 ^a	7.50	101.0	25.54 ^a	0.010	99.78	9.01 ^a
<i>P. teocote</i>	0.20	33.00	10.28 ^c	7.50	71.10	19.21 ^d	0.022	30.14	3.48 ^b

Note: Different letters in columns represent different groups according to the Kruskal–Wallis test ($\alpha = 0.05$); DBH: diameter at breast height; H: Total height; AGB_d : aboveground biomass density.

3.2. Distribution Patterns and Climatic Tolerances

Pinus pseudostrobus demonstrated a wider range (16 °C) in mean annual temperature (BIO1), spanning 7 to 24 °C (Figure 1a). In contrast, *P. ayacahuite* was within a narrower range (10 °C), ranging from 9 to 19 °C. Three groups of species, *P. oocarpa*, *P. pseudostrobus*, and *P. patula*, were distributed in precipitation ranges above 1900 mm, while *P. leiophylla*, *P. arizonica*, and *P. ayacahuite* were found in lower precipitation ranges of 875, 932, and 954 mm, respectively (Figure 1b).

Similarly, *P. pseudostrobus* exhibited a higher tolerance to extreme temperatures (BIO5), ranging from 15.20 °C to 36.20 °C (Figure 1c), contrasting with *P. cembroides*, which demonstrated a smaller range (11.60 °C) but can withstand temperatures of up to 34.30 °C. *P. oocarpa* displayed a wide range of minimum temperatures (BIO6), spanning from –4.90 °C to 17.70 °C (a range of 22.60 °C); in contrast, *P. patula* exhibited a more restricted tolerance, with a range of less than half that of *P. oocarpa* (12.20 °C), from 0.5 to 12.70 °C (Figure 1d).

It has been observed that the climatic tolerances of species are directly related to AGB productivity [15,22,59,60]. The ability of *P. pseudostrobus* to withstand a wide range of temperatures allows it to maintain sustained growth and high productivity even under variable climatic conditions [61]. Species like *P. ayacahuite*, with restricted temperature and precipitation ranges, show lower average AGB_d (1.14 t ha^{-1} , Table 2), suggesting that their growth and biomass accumulation are limited to specific climatic conditions.

Overall, we observe that species with greater tolerances to broad and extreme climatic variations, such as *P. pseudostrobus* and *P. oocarpa*, are capable of accumulating more biomass due to their adaptability to different environmental conditions, similar to what has been demonstrated by [22,62].

The distribution maps of maximum (quantile 5: 80–100 AGB_d t ha^{-1}) and minimum (quantile 1: 0–20 AGB_d t ha^{-1}) AGB_d did not show any discernible pattern that could indicate an association between AGB_d and a specific region, suggesting that the microclimatic conditions of the site play a significant role (Figure 2a–j).

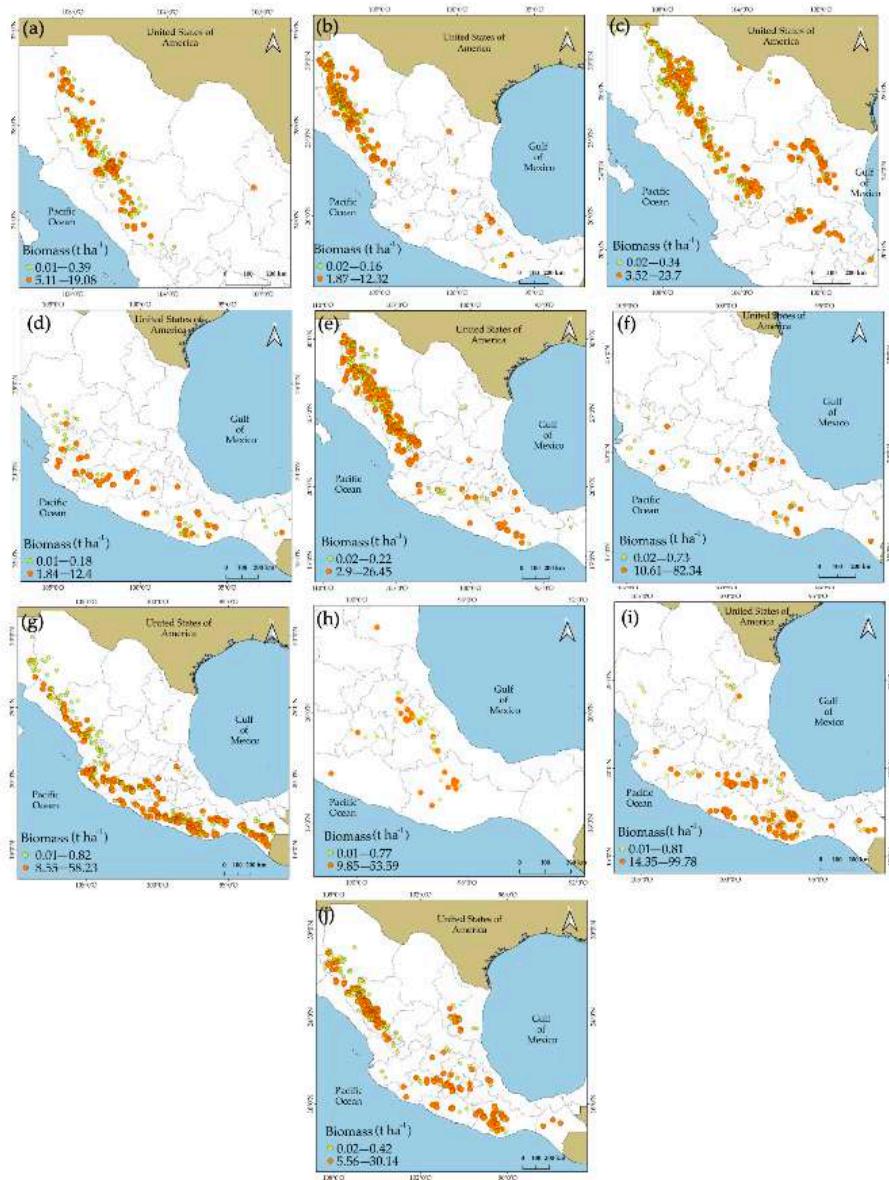


Figure 2. Geographic distribution of maximum (quantiles 80–100, orange dots) and minimum (quantiles 0–20, yellow dots) aboveground biomass density of 10 conifer species in Mexico. *Pinus arizonica* Engelm. (a); *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl. (b); *Pinus cembroides* Zucc (c); *Pinus devoniana* Lindl (d); *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. and Cham (e); *Pinus montezumae* Lamb (f); *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. (g); *P. patula* Schiede and Cham (h); *Pinus pseudostrobus* Lindl (i); *P. teocote* Schiede ex Schltdl. (j).

3.3. Influence of Bioclimatic Variables on Aboveground Biomass Density

The analysis revealed the AGB_d of six of the ten species (*P. arizonica*, *P. cembroides*, *P. leiophylla*, *P. oocarpa*, *P. pseudostrobus*, and *P. teocote*) studied showed a significant correlation ($p < 0.05$) with at least one of the bioclimatic variables. Conversely, the AGB_d of *P. ayacahuite*, *P. montezumae*, *P. devoniana*, and *P. patula* did not correlate with any of the 19 bioclimatic variables (Figure 3). The same procedure was performed with the transformed bioclimatic variables [(BIOS)²] to meet a possible inflection point, but the correlation did not improve and followed the same patterns as before.

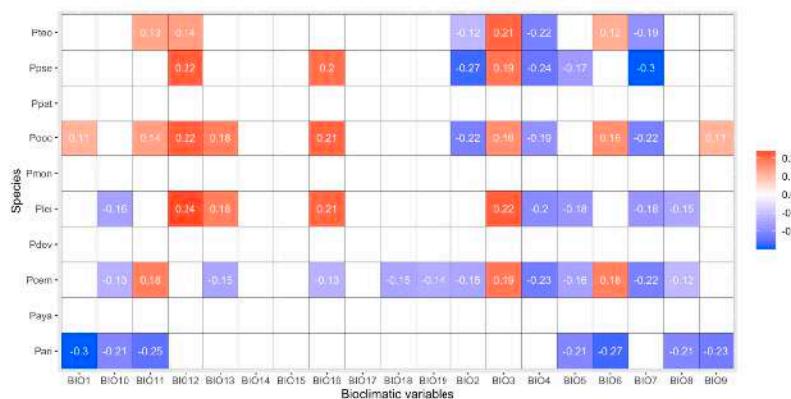


Figure 3. Correlations between the aboveground biomass density of 10 species studied with 19 bioclimatic variables. Pari: *Pinus arizonica* Engelm; Paya: *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl.; Pcem: *Pinus cembroides* Zucc; Pdev: *Pinus devoniana* Lindl; Plei: *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. and Cham; Pmon: *Pinus montezumae* Lamb; Pooc: *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl.; Ppat: *Pinus patula* Schiede and Cham; Ppse: *Pinus pseudostrobus* Lindl; Pteo: *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl; BIO1: Annual Mean Temperature; BIO2: Mean Diurnal Range; BIO3: Isothermality; BIO4: Temperature Seasonality; BIO5: Max Temperature of Warmest Month; BIO6: Min Temperature of Coldest Month; BIO7: Temperature Annual Range; BIO8: Mean Temperature of Wettest Quarter; BIO9: Mean Temperature of Driest Quarter; BIO10: Mean Temperature of Warmest Quarter; BIO11: Mean Temperature of Coldest Quarter; BIO12: Annual Precipitation; BIO13: Precipitation of Wettest Month; BIO14: Precipitation of Driest Month; BIO15: Precipitation Seasonality; BIO16: Precipitation of Wettest Quarter; BIO17: Precipitation of Driest Quarter; BIO18: Precipitation of Warmest Quarter; BIO19: Precipitation of Coldest Quarter.

Out of 54 correlations recorded across the six species, 59.30% (32) were negative with an average of $\rho = -0.20$, while 40.70% (22) were positive ($\rho = 0.18$). The strongest negative correlation value, $\rho = -0.30$, was observed between AGB_d and BIO1 in *P. arizonica*, a similar correlation to that of AGB_d and BIO7 in *P. pseudostrobus*. These negative correlations suggest that an increase in mean annual temperature and its variability in the coming years could lead to a decrease in AGB_d in these species.

The highest positive correlation ($\rho = 0.24$) was observed when relating AGB_d to BIO12 in *P. leiophylla* (Figure 3) (Appendix C). The AGB_d of *P. cembroides* correlated with up to thirteen bioclimatic variables (nine corresponding to temperature and four to precipitation), reflecting its high physiological plasticity, resource use efficiency, and environmental stress tolerance; these characteristics translate into more excellent aboveground biomass production and a broader potential geographic distribution than more specialized species. The AGB_d of *P. teocote*, *P. arizonica*, and *P. pseudostrobus* correlated with seven variables, of which 90.47% corresponded to temperature.

Of the 32 negative correlations, 87.5% (twenty-eight) corresponded to variables related to temperature and 12.5% (four) corresponded to variables related to precipitation. Of the 22 positive correlations, 59% (thirteen) corresponded to variables related to temperature, and 41% (nine) corresponded to precipitation. Notably, the AGB_d of *P. arizonica* only displayed negative correlations with variables related to temperature (Figure 3), indicating the sensitivity of this species to high temperatures, adaptation to temperate climates, and limitations in growth and consequently in AGB production.

Moreover, the variables: BIO14 (precipitation of the driest month), BIO15 (seasonality of precipitation), and BIO17 (precipitation of the driest quarter) did not correlate with the AGB_d of any of the species studied. These observations indicate that the evaluated pine species possess physiological and ecological strategies that allow them to tolerate and adapt to variable precipitation conditions (Figure 3).

The Bayesian approach to Spearman's correlation reinforces the results found in the frequentist correlation. Temperature (left, Figure 3) is the main factor driving the variability of AGB_d , unlike precipitation (right, Figure 3). The magnitude of the correlation (height of the boxes) is more evident in the temperature BIOS than in the precipitation BIOS. It is confirmed that the correlation of AGB_d is negative with temperature and positive with precipitation (Figure 3), although for *P. cembroides*, *P. oocarpa*, and *P. teocote*, the correlation is both positive and negative.

According to the Bayes factor (BF > 1, Table 3), statistical significance ("**", Table 3), and the proportion within the Region of Practical Equivalence (ROPE, indicated above the boxes in Figure 4), the AGB_d of *P. cembroides* exhibits the highest sensitivity to climatic factors, followed by *P. teocote*, *P. pseudostrobus*, and *P. oocarpa*. This observation is corroborated by frequentist correlation analysis. In contrast, the AGB_d of *P. ayacahuite* and *P. devoniana* shows no significant response to bioclimatic variables. Variables BIO 5, 10, and 11 exert the greatest influence on AGB_d variation across the ten studied conifer species, whereas BIO 14, 15, and 17 (representing drier months) exert minimal influence.

Table 3. Bayes factor values calculated between aboveground biomass density and 19 bioclimatic variables across 10 conifer species from Mexico.

Parameter	Pari	Payá	Pcem	Pdev	Plei	Pmon	Pooc	Ppat	Ppse	Pteo
BIO1	2.11×10^3 ***	0.094	1.46×10^9 ***	0.857	2.17×10^7 ***	1.89	1.15	6.75 *	2.84	50.51 ***
BIO2	0.353	0.608	2.04×10^{18} ***	0.313	0.696	2.05	1.46×10^9 ***	0.338	1.09×10^6 ***	2.97×10^9 ***
BIO3	0.153	0.147	9.59×10^{22} ***	0.198	72.00 ***	0.637	2.69×10^4 ***	0.456	239.75 ***	3.32×10^8 ***
BIO4	0.183	0.307	5.84×10^{28} ***	0.178	11.35 **	0.536	7.69×10^7 ***	0.742	1.13×10^4 ***	8.87×10^{13} ***
BIO5	19.88 **	0.278	8.23×10^{12} ***	2.03	4.46×10^{11} ***	11.61 **	1.12	10.94 **	1.12×10^5 ***	0.91
BIO6	115.62 ***	0.142	8.54×10^{31} ***	0.31	0.922	0.424	1.47×10^3 ***	1.39	0.15	2.27×10^7 ***
BIO7	0.106	0.542	1.17×10^{35} ***	0.19	42.36 ***	2.38	9.90×10^8 ***	0.812	2.19×10^7 ***	2.72×10^{13} ***
BIO8	10.05 **	0.186	4.15×10^3 ***	3.34 *	4.11×10^{11} ***	2.94	0.074	7.46 *	62.22 ***	0.089
BIO9	66.21 ***	0.089	0.405	0.44	1.20×10^7 ***	1.33	0.737	3.12 *	0.648	22.90 **
BIO10	12.52 **	0.18	3.50×10^5 ***	1.64	4.39×10^{11} ***	3.29 *	0.075	7.65 *	141.23 ***	0.082
BIO11	4.99×10^3 ***	0.105	3.74×10^{25} ***	0.465	10.14 **	0.948	99.08 ***	4.50 *	0.194	1.46×10^6 ***
BIO12	0.117	0.185	76.19 ***	0.158	0.108	0.241	7.30×10^4 ***	0.36	156.21 ***	5.38×10^3 ***
BIO13	0.128	0.09	7.41×10^{16} ***	0.154	0.09	0.359	393.53 ***	0.565	8.92 *	0.749
BIO14	0.113	0.093	2.82×10^4 ***	0.276	0.104	0.212	0.138	0.362	0.13	0.083
BIO15	0.173	0.381	2.29×10^{25} ***	0.19	0.084	0.215	0.077	0.205	0.749	0.138
BIO16	0.11	0.099	3.14×10^{13} ***	0.179	0.092	0.272	2.87×10^3 ***	0.352	102.24 ***	10.02 **
BIO17	0.125	0.262	3.77×10^7 ***	0.287	0.182	0.215	0.079	0.422	0.136	0.094
BIO18	0.103	0.091	3.75×10^{16} ***	0.719	0.125	0.216	0.074	0.361	1.26	90.19 ***
BIO19	0.112	0.138	977.44 ***	0.228	0.37	0.313	9.29 *	0.262	0.202	1.15×10^4 ***

Note: Bayes factors are continuous measures of relative evidence. These Bayes factors provide evidence in favor of the alternative hypothesis over the null hypothesis. Pari: *Pinus arizonica* Engelm; Payá: *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltld.; Pcem: *Pinus cembroides* Zucc; Pdev: *Pinus devoniana* Lindl; Plei: *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltld. and Cham; Pmon: *Pinus montezumae* Lamb; Pooc: *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltld.; Ppat: *Pinus patula* Schiede and Cham; Ppse: *Pinus pseudostrobus* Lindl; Pteo: *Pinus teocote* Schiede ex Schltld. BIO1: Annual Mean Temperature; BIO2: Mean Diurnal Range; BIO3: Isothermality; BIO4: Temperature Seasonality; BIO5: Max Temperature of Warmest Month; BIO6: Min Temperature of Coldest Month; BIO7: Temperature Annual Range; BIO8: Mean Temperature of Wettest Quarter; BIO9: Mean Temperature of Driest Quarter; BIO10: Mean Temperature of Warmest Quarter; BIO11: Mean Temperature of Coldest Quarter; BIO12: Annual Precipitation; BIO13: Precipitation of Wettest Month; BIO14: Precipitation of Driest Month; BIO15: Precipitation Seasonality; BIO16: Precipitation of Wettest Quarter; BIO17: Precipitation of Driest Quarter; BIO18: Precipitation of Warmest Quarter; BIO19: Precipitation of Coldest Quarter. Significance of Bayes correlation: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

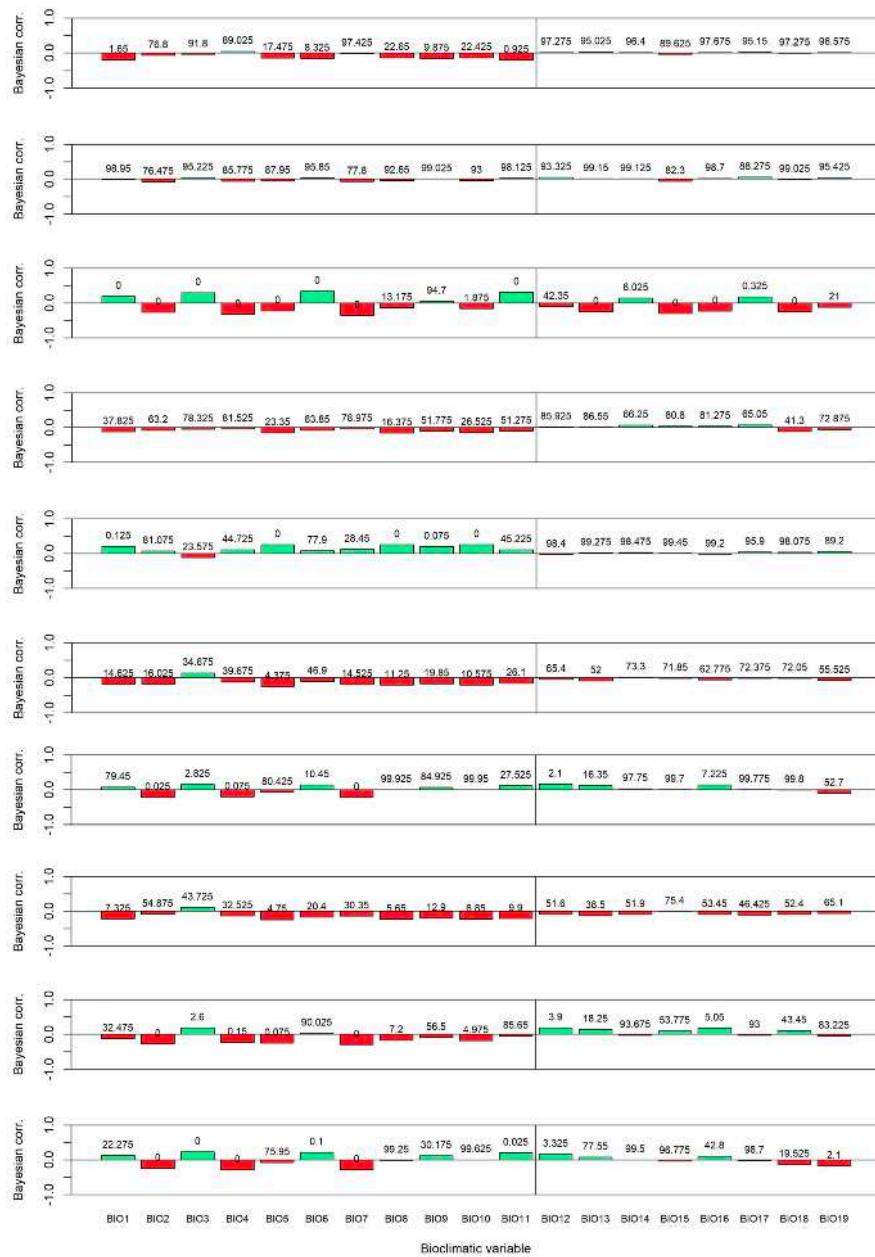


Figure 4. Bayesian correlation between aboveground biomass density of 10 conifer species in Mexico and 19 bioclimatic variables. The vertical line separates temperature BIOS on the left and precipitation BIOS on the right. Red boxes represent negative correlation, while green boxes represent positive correlation. The value above each box indicates the % in ROPE (Region of Practical Equivalence). This is the percentage of the correlation distribution that falls within a region of practical equivalence, where the effects are considered practically negligible. Top to bottom: *Pinus arizonica* Engelm.; *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schleidl.; *Pinus cembroides* Zucc.; *Pinus devoniana* Lind.; *Pinus leiophylla* Schiede ex Schleidl. and Cham.; *Pinus montezumae* Lamb.; *Pinus oocarpa* Schiede ex Schleidl.; *P. patula* Schiede and Cham.; *Pinus pseudostrobus* Lindl.; *P. teocote* Schiede ex Schleidl.

3.4. Quantile-Based Analysis of AGBd Response to Climate Variables

The Mann–Whitney U test results revealed highly significant differences ($p < 0.001$) in the values of the bioclimatic variables (with the strongest correlation between sites) within quantiles five and those in quantiles 1, 2, 3, and 4 under the following hypothesis: the medians of both groups are different. Specifically, AGB_d stores were inversely influenced by temperature (as indicated by the orange violins in Figure 5a,b,e,f). For example, in *Pinus arizonica*, the mean BIO1 in quantile 1 was 12.86 °C and 11.57 °C in quantile 5 (Appendix B). The opposite is true of the AGB_d and precipitation relationship (blue violins, Figure 5c,d); there was higher AGB_d accumulation with higher annual rainfall regimes in BIO12 (Appendix C). In addition, the number of trees significantly influences the amount of AGB_d (Figure 5g–l).

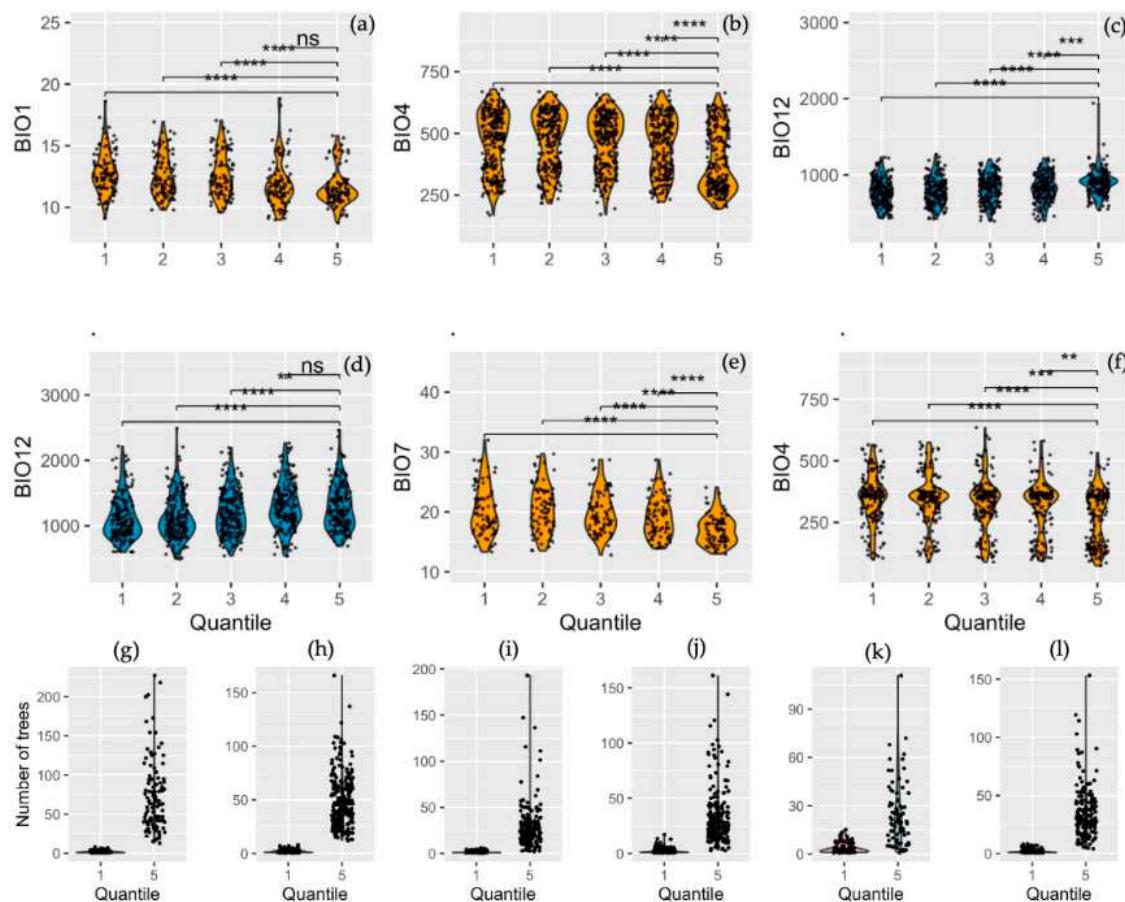


Figure 5. Comparison of the bioclimatic variable values that showed the highest correlation coefficients between sites corresponding to quantile 5 (80 to 100) of the aboveground biomass density and quantiles 1, 2, 3, and 4 using the Mann–Whitney U test. (a) *Pinus arizonica* Engelm (BIO1, °C); (b) *Pinus cembroides* Zucc (BIO4, standard deviation $\times 100$); (c) *Pinus leiophylla* Schiede ex Schldtl (BIO12, mm); (d) *Pinus oocarpa* Schiede ex Schldtl (BIO12, mm); (e) *Pinus pseudostrobus* Lindl (BIO5–BIO6); (f) *Pinus teocote* Schiede ex Schldtl (BIO4, standard deviation $\times 100$). Comparison of the number of trees in quantiles one and five: (g) *Pinus arizonica* Engelm; (h) *Pinus cembroides* Zucc; (i) *Pinus leiophylla* Schiede ex Schldtl; (j) *Pinus oocarpa* Schiede ex Schldtl; (k) *Pinus pseudostrobus* Lindl; (l) *Pinus teocote* Schiede ex Schldtl. Significance of the comparisons; ns: no significant, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$, **** $p < 0.0001$.

The bioclimatic conditions (low temperature) in the quantile 5 sites are different and potentially more favorable for the accumulation of AGB_d than in the other quantiles; this shows that high temperatures inhibit the production of AGB. Similarly, the higher precipitation in quantile 5 suggests the availability of the necessary moisture for photosynthesis and growth, thereby favoring biomass accumulation in these species. This observation aligns with the positive relationship observed between AGB_d and precipitation. Additionally, the research found a direct correlation between the number of trees and AGB_d accumulation (Figure 5g–l), further emphasizing the role of vegetation in AGB_d storage.

4. Discussion

Biomass Distribution

The geographical distribution of AGB_d in the present study did not reveal any pattern associated with a specific region in any of the ten species studied, suggesting that the influence of environmental (temperature and precipitation), edaphic (soil structure and pH), topographic (altitude), and biotic (species diversity and forest structure) conditions at the regional level interact and regulate forest dynamics, as already found [12,22,60] in tropical, boreal and temperate forests. The influence of climatic factors such as temperature and precipitation on vegetation is indirect but essential, as it interferes with trees' metabolic and growth processes, regulating their AGB productivity [12,21,23] and even their geographical distribution [62,63]. In this regard, we agree with the findings of [64], where the lack of a directional trend in the abundance patterns of pines in Mexico reflects a complex mix of forest relationships that different disturbances locally drive.

In the present study, the temperature variable showed more correlations with AGB_d (76%), indicating that temperature is the most influential variable in the dynamics of AGB_d in the pine species studied; this is contrary to tropical species, where precipitation is the determining factor [65]. On a global scale, it was observed [66] that the biomass of mature forests is greater in mid-latitudes; this relationship is positive when the temperature is below 8 °C, but begins to decline as temperatures exceed 10 °C and approach the equator. Several studies have addressed the relationship between AGB and BIO1 [12,15,22,67,68], but the evidence reveals that these relationships are complex and dependent on many factors, including forest type, scale, geography, species, and others.

Some studies have reported that BIO1 can positively influence pine growth rates. For example, an increase in temperature within the optimal growth range can accelerate photosynthetic processes and evapotranspiration, leading to more significant growth and, consequently, an increase in biomass [23,67–70]. In the present study, a positive association was found in *P. oocarpa*, which is a species widely distributed in the subtropical forests of Mexico, where tree density is higher and its temperature tolerance range is better suited to high temperatures (Figure 1). Also observed in forests of Iran [69] found that biomass is influenced by BIO1, specifically in taller trees, trees with larger crowns, and higher DBH values.

Furthermore, in a global study [23] found a strong positive correlation between AGB and BIO1 ($r = 0.262$, $p < 0.01$). Similarly, in plantations [71] reported that the biomass growth rates of *Pinus massoniana* Lamb, in populations distributed in China, responded positively to BIO1. This is important, as it suggests that temperature, particularly BIO1, plays a crucial role in the growth of pine species. However, it is worth noting that cold and humid winters also favor the growth of this species [72], a tendency consistent with the pine species studied in our research (Figure 4).

On the other hand, researchers have determined that extreme temperature variables (minimum and maximum) are 'limiting' as they interfere with biomass productivity by influencing tree growth [22]. Studies have observed that maximum temperatures negatively influence the growth of young *Pinus cooperi* Blanco ex Martinez [73], showing a significant negative correlation ($r = -0.31$, $p < 0.05$). Other authors [74] reported that maximum temperatures influence the growth in *P. oocarpa* ($r = -0.7$), while [72] again report a negative correlation ($p < 0.05$) with *P. leiophylla* (-0.39) and *P. teocote* (-0.39). These findings align

with the present study, where we observed a negative correlation between AGB_d and $BIO5$ in *P. arizonica*, *P. cembroides*, *P. leiophylla*, and *P. pseudostrobus* (Figure 3).

In the present study, it was observed that $BIO2$, $BIO4$, and $BIO7$ showed negative correlations with the AGB_d of the species *P. cembroides*, *P. oocarpa*, *P. leiophylla*, *P. pseudostrobus*, and *P. teocote*, demonstrating that temperature variations significantly influence tree growth and, consequently, AGB productivity. The authors [75] identified, in a pantropical study, that tree height decreases with temperature seasonality. Similarly, in a study [76] documented a reduction in tree height correlated with increasing temperatures across three forest types in Madagascar. This occurs because, when significant thermal oscillations are present during the growth period, pine species tend to reduce the duration of their growing seasons and have slower metabolic processes [8,77], highlighting the importance of using these variables in determining the presence of these species in the future, as mentioned in [77]. They reported that 72% of the species present in tropical forests in Bolivia are highly sensitive to temperature variation, concluding that even a minimal change of less than 4 °C could drastically modify distribution patterns and, in turn, affect AGB productivity in tropical species. It has also been observed that in temperate forests, an increase of 2.5 °C can modify biomass distribution in the tree [78].

In the current study, robust correlations were identified between AGB_d and precipitation variables (e.g., $BIO12$) across select species (Table 3). This was also observed by [79], in their continental-scale analysis, noted indistinct direct relationships between AGB and $BIO12$ at the ecosystem level. We posit that this discrepancy is attributable to the scale of the study, as these correlations are more pronounced at local scales and even at the species level. In subtropical ecosystems in China, the authors [80] reported that $BIO12$ governs biomass allocation, which is contingent upon precipitation gradients. We advocate for further investigation at multiple scales and species-specific levels to enhance understanding of climate influences on forest productivity.

Conifer forests are in areas with abundant moisture and temperate climates, where trees allocate more aboveground biomass, which promotes rapid growth [81]. In the present study, it was observed that the AGB_d of *P. leiophylla*, *P. oocarpa*, *P. pseudostrobus*, and *P. teocote* showed positive correlation values with $BIO12$ (Figure 3), suggesting that this variable has a positive association with biomass productivity in these pine species. This is consistent with studies on tropical forests in China [81], rainfall gradient experiments across the United States [82], and Borneo forests [65], all of which found that $BIO12$ favors tree growth and biotic attributes involved in AGB productivity.

For their part, the authors of [17] reported that precipitation positively affects biomass in Mexico, and this relationship is more significant compared to temperature variables estimated in coniferous forests. Our study also observed this positive relationship with $BIO12$ in *P. leiophylla*, *P. oocarpa*, *P. pseudostrobus*, and *P. teocote*. They explained that this relationship might be due to the dominance of the genus *Abies*, *Pseudotsuga*, and *Picea* in coniferous forests, which are distributed in high mountains and receive more precipitation. However, we excluded these species from our study, yet we still observed positive correlations with $BIO12$ within a precipitation range of 542–2462 mm (Appendix C) in the sites with the highest AGB_d .

In previous studies worldwide, a meta-analysis [83] reported that the biomass of some tree species under high temperature conditions was not shown to be influenced by annual precipitation, suggesting that precipitation patterns should be better studied in these species. Periods of precipitation play an important role in forests, as low variability in precipitation has been found to promote large biomass reserves in the forest biomass of the Amazon [84], completely consistent with what was found in this study.

According to [85], global temperature increase trends will remain around 1.5 °C in low scenarios (SSP1-1.9), increasing extreme weather events, which is of great concern. Researchers have found that changes in climatic conditions affect the growth rates and AGB in temperate forests [86]. For example, the authors of [87] reported that there is a strong relationship between tree mortality in nine biome types and climatic anomalies (prolonged droughts and

exacerbated high temperatures), as tree mortality increased when climatic factors (BIO1 and BIO12) were exacerbated. They also projected that under climate scenarios that contemplate an increase of +2 °C and +4 °C, the frequencies of climate anomalies related to tree mortality would increase by 22% and 140% per year and decade, respectively.

In México, the authors of [88] reported that the effects of climate change are inconsistent in regions converging in Mexico, where a greater impact is predicted in some regions, such as the eastern Sierra Madre (the region with the world's richest coniferous tree forests). However, it is important to take into account local conditions and seasonal variations in temperature and precipitation [88,89], as the responses to forest microclimates contrast with those of external ecosystems. This suggests that many studies based on BIO1 do not explain much of the global variation in AGB.

Although for Mexico, studies have been carried out analyzing the potential distribution under future scenarios for at least 20 pine species [26,65,66,90], studies aimed at determining how the productivity of AGB_d could be visualized in future scenarios have not yet been explored in Mexico. Thus, studies such as the present one, which prioritize the behavior of these populations through another point of analysis (in this case, AGB_d), would help in carrying out conservation and management projects that are well-directed toward species that show disadvantages compared to those that benefit from the effects of climate change.

5. Conclusions

The present study provides significant insights into the geographic distribution of AGB_d . No clear geographic pattern of AGB_d was observed, indicating complex interactions between bioclimatic variables and each species. Several statistically significant correlations ($p < 0.05$) were observed with temperature variables and AGB_d , suggesting that they play a role in determining the distribution and productivity of these species. In addition, both mean annual temperature and temperature extremes have important effects on tree AGB_d , with specific responses depending on the species. Precipitation is positively associated with AGB_d in 66% of the species studied. The variables BIO14 (precipitation of the driest month), BIO15 (precipitation seasonality), and BIO17 (precipitation of the driest quarter) do not correlate with AGB_d .

Finally, projected temperature increases in the region highlight the importance of future studies exploring how these pine populations will respond to climate change, emphasizing effective communication, adaptive conservation, and sustainable management strategies. Therefore, selecting pine species whose biomass production shows less dependence on specific climatic factors can enhance their ability to thrive amidst climate variability and change. This approach leverages their inherent adaptive capacity and ecological plasticity, providing a more robust strategy for sustainable forestry management in a changing climate context.

With regard to applicability, it is important not only to estimate the carbon stocks of aboveground biomass but also to highlight the production potential of some forest areas in Mexico. In conclusion, climate is an important driver of aboveground biomass density variation in the majority of the species studied.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at <https://www.mdpi.com/article/10.3390/f15071160/s1>: Table S1: General description of the selected species for the study where; T: range of temperature, °C; PP: range of precipitation annual, mm; N: number of trees; N.sites: number of sites with register of species.

Author Contributions: Conceptualization, D.G.-G., J.M.-G., T.G.O.-S., J.C.-P., J.C.S.-C., and V.H.C.-S.; Data curation, D.G.-G. and J.M.-G.; Investigation, D.G.-G. and T.G.O.-S.; Methodology, D.G.-G. and J.M.-G.; Software, D.G.-G. and J.M.-G.; Supervision, T.G.O.-S., J.C.-P., J.C.S.-C., and V.H.C.-S.; Visualization, T.G.O.-S., J.C.-P., J.C.S.-C., and V.H.C.-S.; Writing—original draft, D.G.-G., J.M.-G., and V.H.C.-S.; Writing—review and editing, D.G.-G., J.M.-G., J.C.-P., and V.H.C.-S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available upon reasonable request from the author team.

Acknowledgments: We are grateful to National Council of Humanities, Sciences and Technologies (CONAHCYT) for funding the first author's doctorate.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

Appendix A

Bioclimatic variables used for correlation analysis with a spatial resolution of 30 s (~1 km²), obtained using Worldclim version 2.

Variable Code	Description
BIO1	Annual Mean Temperature (°C)
BIO2	Mean Diurnal Range (Mean of Monthly (°C))
BIO3	Isothermality (BIO2/BIO7) (×100)
BIO4	Temperature Seasonality (SD × 100)
BIO5	Max Temperature of Warmest Month (°C)
BIO6	Min Temperature of Coldest Month (°C)
BIO7	Temperature Annual Range (BIO5-BIO6)
BIO8	Mean Temperature of Wettest Quarter (°C)
BIO9	Mean Temperature of Driest Quarter (°C)
BIO10	Mean Temperature of Warmest Quarter (°C)
BIO11	Mean Temperature of Coldest Quarter (°C)
BIO12	Annual Precipitation (mm)
BIO13	Precipitation of Wettest Month (mm)
BIO14	Precipitation of Driest Month (mm)
BIO15	Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation)
BIO16	Precipitation of Wettest Quarter (mm)
BIO17	Precipitation of Driest Quarter (mm)
BIO18	Precipitation of Warmest Quarter (mm)
BIO19	Precipitation of Coldest Quarter (mm)

Appendix B

Results of the correlations between biomass and the 19 bioclimatic variables in the species that showed correlation.

Specie	Bioclimatic Variable	Rho	Specie	Bioclimatic Variable	Rho
<i>P. arizonica</i>	BIO1	-0.3 ***	<i>P. oocarpa</i>	BIO1	0.11 *
	BIO5	-0.21 ***		BIO2	-0.22 ***
	BIO6	-0.27 ***		BIO3	0.16 ***
	BIO8	-0.21 ***		BIO4	-0.19 ***
	BIO9	-0.23 ***		BIO6	0.16 ***
	BIO10	-0.21 ***		BIO7	-0.22 ***
	BIO11	-0.25 ***		BIO9	0.11 *
<i>P. cembroides</i>	BIO2	-0.15 ***	<i>P. pseudostrobus</i>	BIO11	0.14 ***
	BIO3	0.19 ***		BIO12	0.22 ***
	BIO4	-0.23 ***		BIO13	0.18 ***
	BIO5	-0.16 ***		BIO16	0.21 ***
	BIO6	0.18 ***		BIO1	0.11 *
	BIO7	-0.22 ***		BIO2	-0.27 ***
	BIO8	-0.12 ***		BIO3	0.19 **
	BIO10	-0.13 ***		BIO4	-0.24 ***
	BIO11	0.18 ***		BIO5	-0.17 *
	BIO13	-0.15 ***		BIO7	-0.3 ***
<i>P. leiophylla</i>	BIO16	-0.13 ***	<i>P. teocote</i>	BIO12	0.22 ***
	BIO18	-0.15 ***		BIO16	0.2 ***
	BIO19	-0.14 ***		BIO2	-0.12 *
	BIO3	0.22 ***		BIO3	0.21 ***
	BIO4	-0.20 ***		BIO4	-0.22 ***
	BIO5	-0.18 ***		BIO7	-0.19 ***
	BIO7	-0.18 ***		BIO11	0.13 **
	BIO8	-0.15 ***		BIO12	0.14 **
	BIO10	-0.16 ***		BIO1	0.13 **
	BIO12	0.24 ***		BIO2	-0.12 *

Note: Significance of Spearman's correlation; * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

Appendix C

Descriptive analysis by quantile of the bioclimatic variables that obtained the highest correlation values with aboveground biomass density in *Pinus arizonica*, *Pinus cembroides*, *Pinus oocarpa*, *Pinus leiophylla*, and *Pinus teocote*. BIO1: annual mean temperature (°C); BIO4: temperature seasonality (standard deviation × 100); BIO7: temperature annual range (BIO5–BIO6); BIO12: annual precipitation (mm).

QUANTILE 1					
	<i>P. arizonica</i>	<i>P. cembroides</i>	<i>P. leiophylla</i>	<i>P. oocarpa</i>	<i>P. pseudostrobilus</i>
Bioclimatic variable	BIO1	BIO4	BIO12	BIO12	BIO7
Min	9.10	168.80	431.00	600.00	13.30
Max	18.60	678.78	1230.00	2216.00	32.00
Mean	12.86	458.46	778.01	1121.35	20.22
Mediana	12.67	490.94	774.00	1050.50	19.20
SD	1.67	120.52	171.03	317.93	4.10
QUANTILE 2					
	<i>P. arizonica</i>	<i>P. cembroides</i>	<i>P. leiophylla</i>	<i>P. oocarpa</i>	<i>P. pseudostrobilus</i>
Bioclimatic variable	BIO1	BIO4	BIO12	BIO12	BIO7
Min	9.80	216.53	422.00	494.00	13.50
Max	16.95	669.43	1269.00	2490.00	29.70
Mean	12.55	472.08	784.34	1130.05	20.55
Mediana	12.20	496.24	771.00	1062.00	20.40
SD	1.66	114.29	176.30	331.83	3.85
QUANTILE 3					
	<i>P. arizonica</i>	<i>P. cembroides</i>	<i>P. leiophylla</i>	<i>P. oocarpa</i>	<i>P. pseudostrobilus</i>
Bioclimatic variable	BIO1	BIO4	BIO12	BIO12	BIO7
Min	9.60	170.86	394.00	544.00	12.80
Max	17.05	658.56	1206.00	2195.00	28.70
Mean	12.50	468.18	814.92	1195.24	19.86
Mediana	12.17	494.95	829.00	1165.00	19.10
SD	1.72	108.17	178.56	329.96	3.37
QUANTILE 4					
	<i>P. arizonica</i>	<i>P. cembroides</i>	<i>P. leiophylla</i>	<i>P. oocarpa</i>	<i>P. pseudostrobilus</i>
Bioclimatic variable	BIO1	BIO4	BIO12	BIO12	BIO7
Min	8.99	222.35	394.00	538.00	13.90
Max	18.84	672.84	1219.00	2265.00	28.70
Mean	11.93	454.05	830.28	1300.00	19.06
Mediana	11.65	476.88	828.00	1273.00	18.70
SD	1.84	113.42	171.85	344.91	3.35
QUANTILE 5					
	<i>P. arizonica</i>	<i>P. cembroides</i>	<i>P. leiophylla</i>	<i>P. oocarpa</i>	<i>P. pseudostrobilus</i>
Bioclimatic variable	BIO1	BIO4	BIO12	BIO12	BIO7
Min	8.74	195.01	542.00	692.00	13.00
Max	15.82	664.21	1940.00	2462.00	24.10
Mean	11.57	387.17	898.22	1288.27	16.97
Mediana	11.23	350.06	904.50	1235.00	16.90
SD	1.47	124.36	162.16	338.90	2.36

References

1. SEMARNAT. *Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2017–2018*; SEMARNAT: Mexico City, Mexico, 2021.
2. Galicia, L.; Chávez-Vergara, B.M.; Kolb, M.; Jasso-Flores, R.I.; Rodríguez-Bustos, L.A.; Solís, L.E.; de la Cruz, V.G.; Pérez-Campuzano, E.; Villanueva, Y.A. Perspectives of the socioecological approach in the preservation, utilization and the payment of environmental services of the temperate forests of Mexico. *Madera Bosques* **2018**, *24*, e2421443. [[CrossRef](#)]
3. Perry, J. *The Pines of Mexico and Central America*; Timber Press: Portland, OR, USA, 1991.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32

Table S1. General description of the selected species for the study where; T: range of temperature, °C; PP: range of precipitation annual, mm; N: number of trees; N. sites: number of sites with register of species.

Sspecie	T	P.P	Elevation m.s.n.m.	Economic activity	N.Tree	N.Sites	Description
<i>P. arizonica</i>	-23 - 40	500 - 1000	2000-2800	-Wood	14 095	529	It is native to the Sierra Madre Occidental. This tree reaches a height of 30-35 meters and a diameter greater than 1 meter in mature trees. The crown is rounded in mature trees and pyramidal in young ones. Its leaves are evergreen. The cones are resinous and indehiscent. It is found in coniferous forests and oak forests, inhabiting the northern part of the country, from Durango to Chihuahua.
<i>P. ayacahuite</i>	-8 - 35	1000 - 1200	2000-3200	-Resin -Wood -Reforestation	5 337	710	Native from central Mexico to Central America, this tree reaches a height of 35-40 meters and a DBH of up to 2 meters with a conical crown. It is found in coniferous and oak forests, and can mix with other pines and firs in the mountains of Mexico. It extends to the central part of the country, with considerable groups in the mountains of Chiapas, Oaxaca, and Guerrero, as well as a small group in Puebla and Tlaxcala.
<i>P. cembroides</i>	-7 - 42	365 - 800	1350-3750	-Resin, -Wood -Reforestation -Seed (piñón)	21 494	1238	It is a species very suitable for decorating parks due to its low height. This species is native to Mexico and extends to the southern United States. The tree grows from 5 to 10 meters and up to 15 meters in height, with a DBH of 30 cm and up to 70 cm. It has a short trunk with thin, well-distributed branches, and it typically grows slowly. It is found in coniferous and oak forests

							and is the most widely distributed species in Mexico.
<i>P. devoniana</i>	-7 - 45	600 - 1600	1200 -3000	-Wood -Resin	2 256	231	It is a tree native to Mexico, growing 20 to 30 meters tall with a height and DBH of 1 meter. It establishes itself on slopes in pine and pine-oak forests and extends from central Mexico to central Guatemala.
<i>P. leiophylla</i>	-15 - 38	1600- 3000	700- 1500	-Wood -Reforestation	9 121	1762	It is endemic to Mexico, growing 20 to 30 meters tall with a DBH of 35 to 80 cm. It begins flowering at five to six years of age. It is found in pine and pine-oak forests and is distributed in Chihuahua, Durango, Zacatecas, Jalisco, Sinaloa, Nayarit, Colima, Michoacán, Mexico, Tlaxcala, Puebla, Morelos, Veracruz, and Oaxaca.
<i>P. montezumae</i>	8 - 14	800 - 1000	1150 - 3200	-Wood -Resina	1 475	119	It is known as the royal pine, native to Mexico and extending to Guatemala. This tree grows 25 to 30 meters tall with a DBH of 50 to 90 cm, with growth ranging from fast to moderate. It is found in oak and coniferous forests. In Mexico, it has a wide distribution, extending from the Sierra Madre Oriental, Sierra Madre del Sur, and Sierra Madre de Chiapas.
<i>P. oocarpa</i>	0 - 45	1000 -3000	1500-1200	-Wood -Firewood -Resin	14 309	999	It is known as the resinous pine, native to Mexico and Central America. This medium-sized tree grows 12 to 18 meters tall with a DBH of 40 to 75 cm. It is found in oak and coniferous forests and is distributed from northeastern Mexico in Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Zacatecas, Durango, Nayarit, Michoacán, to southeastern Guerrero, Oaxaca, Chiapas, and in the central part of the country in Mexico.

<i>P. patula</i>	-14 - 40	1000- 2500	1600 - 3100	-Wood -Paper production	2 985	128	It is known as the weeping pine. This tree grows 30 to 35 meters tall with a DBH of 50 to 90 cm. It has an open, rounded crown. The trunk is straight and branch-free up to a height of 20 meters, and it exhibits rapid growth. It is found in pine forests and pine-oak forests, and is naturally distributed across the mountainous formations of the Sierra Madre Oriental, the Trans-Mexican Volcanic Belt, and the Sierra Madre de Oaxaca
<i>P. pseudostrobus</i>	-9 - 40	500 - 2500	1600- 3200	-Resin - Commercial plantation	6 029	414	It is also known as the ortiguillo pine. It is native to Mexico, Guatemala, and Honduras. This tree grows 30 to 40 meters tall, occasionally reaching up to 45 meters, with a DBH of 40 to 80 cm. The trunk is straight and branch-free. It is found in coniferous forests and pine-oak forests. In Mexico, it is found in the states of Jalisco, Michoacán, State of Mexico, Morelos, Puebla, Hidalgo, Tlaxcala, Oaxaca, Guerrero, and Chiapas, and it is sparsely distributed in northern Mexico
<i>P. teocote</i>	-14 - 38	600-1500	1500- 3100	-Wood -Resin	11 840	810	It is known as the red pine, native to Mexico. This medium-sized tree grows to 8.25 meters in height in mature trees. The crown is rounded in mature trees and dense with a pyramidal shape in young trees. It is found in coniferous forests and has a wide distribution. It extends along the Sierra Madre Occidental from southern Chihuahua to Chiapas, in the Sierra Madre Oriental from Coahuila and Nuevo León to Hidalgo, and in the State of Mexico, Puebla

Note: The data were obtained from the descriptive sheets of each species published by <http://www.conafor.gob.mx> accessed on June 20, 2024.

4. Sánchez-González, A. Una visión actual de la diversidad y distribución actual de los pinos de México. *Madera Bosques* **2008**, *14*, 107–120. [[CrossRef](#)]
5. Pan, Y.; Birdsey, R.A.; Phillips, O.L.; Jackson, R.B. The structure, Distribution, and Biomass of the World's forests. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* **2013**, *44*, 593–622. [[CrossRef](#)]
6. Martin, A.R.; Doraisami, M.; Thomas, S.C. Global patterns in wood carbon concentration across the world's trees and forests. *Nat. Geosci.* **2018**, *11*, 915–920. [[CrossRef](#)]
7. IPCC. Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. In *Resumen para Responsables de Políticas*; IPCC: Valencia, Spain, 2000; Volume 24.
8. Ullah, F.; Gilani, H.; Sanaei, A.; Hussain, K.; Ali, A. Stand structure determines aboveground biomass across temperate forest types and species mixture along a local-scale elevational gradient. *For. Ecol. Manag.* **2021**, *486*, 118984. [[CrossRef](#)]
9. Pan, Y.; Birdsey, R.A.; Fang, J.; Houghton, R.; Kauppi, P.E.; Kurz, W.A.; Phillips, O.L.; Shvidenko, A.; Lewis, S.L.; Canadell, J.G.; et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* **2011**, *333*, 988–993. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
10. Rodríguez-Veiga, P.; Saatchi, S.; Tansey, K.; Balzter, H. Magnitude, spatial distribution and uncertainty of forest biomass stocks in Mexico. *Remote Sens. Environ.* **2016**, *183*, 265–281. [[CrossRef](#)]
11. Coomes, D.; Simonson, W.; Burslem, D. *Forests and Global Change*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2014; ISBN 9781107041851.
12. Ali, A.; Lin, S.L.; He, J.K.; Kong, F.M.; Yu, J.H.; Jiang, H.S. Climatic water availability is the main limiting factor of biotic attributes across large-scale elevational gradients in tropical forests. *Sci. Total Environ.* **2019**, *647*, 1211–1221. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
13. Li, Q.; Liu, Z.; Jin, C. Impacts of stand density on tree crown structure and biomass: A global meta-analysis. *Agric. For. Meteorol.* **2022**, *326*, 109181. [[CrossRef](#)]
14. Fotis, A.T.; Murphy, S.J.; Ricart, R.D.; Krishnadas, M.; Whitacre, J.; Wenzel, J.W.; Queenborough, S.A.; Comita, L.S. Above-ground biomass is driven by mass-ratio effects and stand structural attributes in a temperate deciduous forest. *J. Ecol.* **2018**, *106*, 561–570. [[CrossRef](#)]
15. Balima, L.H.; Kouamé, F.N.G.; Bayen, P.; Ganamé, M.; Nacoulma, B.M.I.; Thiombiano, A.; Soro, D. Influence of climate and forest attributes on aboveground carbon storage in Burkina Faso, West Africa. *Environ. Chall.* **2021**, *4*, 100123. [[CrossRef](#)]
16. Arasa-Gisbert, R.; Vayreda, J.; Román-Cuesta, R.M.; Villega, S.A.; Mayorga, R.; Retana, J. Forest diversity plays a key role in determining the stand carbon stocks of Mexican forests. *For. Ecol. Manag.* **2018**, *415–416*, 160–171. [[CrossRef](#)]
17. Álvarez-Dávila, E.; Cayuela, L.; González-Caro, S.; Aldana, A.M.; Stevenson, P.R.; Phillips, O.; Cogollo, Á.; Penuela, M.C.; Von Hildebrand, P.; Jiménez, E.; et al. Forest biomass density across large climate gradients in northern South America is related to water availability but not with temperature. *PLoS ONE* **2017**, *12*, e0171072. [[CrossRef](#)]
18. Jia, B.; Guo, W.; He, J.; Sun, M.; Chai, L.; Liu, J.; Wang, X. Topography, Diversity, and Forest Structure Attributes Drive Aboveground Carbon Storage in Different Forest Types in Northeast China. *Forests* **2022**, *13*, 455. [[CrossRef](#)]
19. Usuga, J.C.L.; Toro, J.A.R.; Alzate, M.V.R.; de Jesús Lema Tapia, Á. Estimation of biomass and carbon stocks in plants, soil and forest floor in different tropical forests. *For. Ecol. Manag.* **2010**, *260*, 1906–1913. [[CrossRef](#)]
20. Chen, X.; Luo, M.; Larjavaara, M. Effects of climate and plant functional types on forest above-ground biomass accumulation. *Carbon Balance Manag.* **2023**, *18*, 5. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
21. Reich, P.B.; Luo, Y.; Bradford, J.B.; Poorter, H.; Perry, C.H.; Oleksyn, J. Temperature drives global patterns in forest biomass distribution in leaves, stems, and roots. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2014**, *111*, 13721–13726. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
22. Bennett, A.C.; Penman, T.D.; Arndt, S.K.; Roxburgh, S.H.; Bennett, L.T. Climate more important than soils for predicting forest biomass at the continental scale. *Ecography* **2020**, *43*, 1692–1705. [[CrossRef](#)]
23. Ma, Y.; Eziz, A.; Halik, Ü.; Abliz, A.; Kurban, A. Precipitation and Temperature Influence the Relationship between Stand Structural Characteristics and Aboveground Biomass of Forests—A Meta-Analysis. *Forests* **2023**, *14*, 896. [[CrossRef](#)]
24. IPCC. *Summary for Policy Makers: Climate Change 2023: Synthesis Report*; IPCC: Geneva, Switzerland, 2023.
25. Harvey, J.E.; Smiljanic, M.; Scharnweber, T.; Buras, A.; Cedro, A.; Cruz-García, R.; Drobyshev, I.; Janecka, K.; Jansons, A.; Kaczka, R.; et al. Tree growth influenced by warming winter climate and summer moisture availability in northern temperate forests. *Glob. Change Biol.* **2020**, *26*, 2505–2518. [[CrossRef](#)]
26. Alfaro-Ramírez, U.; Ramírez-Albores, E.; Vargas-Hernández, J.; Franco-Maass, S.; Pérez-Suárez, M. Potential reduction of Hartweg's Pine (*Pinus hartwegii* Lindl.) geographic distribution. *PLoS ONE* **2020**, *15*, e0229178. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
27. Villers-Ruiz, L.; Trejo-Vázquez, I. Assessment of the vulnerability of forest ecosystems to climate change in Mexico. *Clim. Res.* **1997**, *9*, 87–93. [[CrossRef](#)]
28. Rodríguez-Zúñiga, J.; Flores-Ortiz, C.M.; González-Guillén, M.D.J.; Lira-Saade, R.; Rodríguez-Arévalo, N.I.; Dávila-Aranda, P.D.; Ulian, T. Cost Analysis of Seed Conservation of Commercial Pine Species Vulnerable to Climate Change in Mexico. *Forests* **2022**, *13*, 539. [[CrossRef](#)]
29. INEGI. México en Cifras. Available online: <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/#collapse-Res> (accessed on 13 March 2024).
30. DOF. *NORMA Oficial Mexicana de Emergencia NOM, EM 001-SARH3-1994*; Diario Oficial de la Federación: Mexico City, Mexico, 1994; pp. 5–7.
31. SEMARNAT; CONAFOR. *La Producción de Resina de Pino en México*; Comisión Nacional Forestal: Zapopan, Mexico, 2012.

32. CONAFOR; CONABIO. *Pinus montezumae* Lamb. Available online: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/971Pinus%20montezumae.pdf> (accessed on 21 June 2024).
33. CONAFOR; CONABIO. *Pinus oocarpa* Shiede. Available online: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/974Pinus%20oocarpa.pdf> (accessed on 21 June 2024).
34. Sáenz-Romero, C.; Guzmán-Reyna, R.R.; Rehfeldt, G.E. Altitudinal genetic variation among *Pinus oocarpa* populations in Michoacán, Mexico. Implications for seed zoning, conservation, tree breeding and global warming. *For. Ecol. Manag.* **2006**, *229*, 340–350. [\[CrossRef\]](#)
35. CONAFOR; CONABIO. *Pinus devoniana* Lindley. Available online: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/957Pinus%20devoniana.pdf> (accessed on 21 June 2024).
36. Gómez-Romero, M.; Soto-Correa, J.; Blanco-García, J.A.; Sáenz-Romero, C.; Villegas, J.; Linding-Cisneros, R. Estudio de especies de pino para restauración de sitios degradados. *Agrociencia* **2012**, *46*, 795–807.
37. CONAFOR; CONABIO. *Pinus cembroides* Zucc. Available online: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/955Pinus%20cembroides.pdf> (accessed on 21 June 2024).
38. SEMARNAT; CONAFOR; CONACYT. *Catálogo de Recursos Forestales Maderables y no Maderables Árido, Tropical y Templado*; CONAFOR: Zapopan, Mexico, 2008.
39. Constante García, V.; Villanueva Díaz, J.; Cerano Paredes, J.; Cornejo Oviedo, E.H.; Valencia Manzo, S. Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el Sureste de Coahuila. *Cienc. For. México* **2009**, *34*, 17–39.
40. CONAFOR; CONABIO. *Pinus patula* Schl. et Cham. Available online: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/975Pinus%20patula.pdf> (accessed on 21 June 2024).
41. CONAFOR; CONABIO. *Pinus ayacahuite* Ehren. Available online: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/953Pinus%20ayacahuite.pdf> (accessed on 21 June 2024).
42. CONAFOR; CONABIO. *Pinus arizonica* Engelm. Available online: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/952Pinus%20arizonica.pdf> (accessed on 21 June 2024).
43. CONAFOR. *Procedimientos de Muestreo Version 19.0*; SEMARNAT-CONAFOR: Guadalajara, Mexico, 2017.
44. Fick, S.E.; Hijmans, R.J. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* **2017**, *37*, 4302–4315. [\[CrossRef\]](#)
45. Lé, S.; Josse, J.; Husson, F. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *J. Stat. Softw.* **2008**, *25*, 1–18. [\[CrossRef\]](#)
46. Rzedowski, J. *Vegetación de México*; Edición Digital; Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad: Mexico City, Mexico, 2006.
47. Návar, J. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *For. Ecol. Manag.* **2009**, *257*, 427–434. [\[CrossRef\]](#)
48. Guerrero, L. Cuantificación de Biomasa, Carbono y Producción de Oxígeno de *Pinus cembroides* Zucc. Bachelor's Thesis, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, En Mazapil, Zacatecas, Mexico, 2013.
49. Méndez-González, J.; Luckie-Navarrete, S.L.; Capó-Arteaga, M.A.; Nájera-Luna, J.A. Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *Pinus pseudostrobus* Lindl. En Guanajuato, México. *Agrociencia* **2011**, *45*, 479–491.
50. Carrillo-Anzúres, F.; Acosta-Mireles, M.; Flores-Ayala, E.; Juárez-Bravo, J.E.; Bonilla-Padilla, E. Estimación de biomasa y carbono en dos especies arbóreas en La Sierra Nevada, México. *Rev. Mex. Cienc. Agrícolas* **2018**, *5*, 779–793. [\[CrossRef\]](#)
51. Navarro-Martínez, J.; Godínez-Jaimes, F.; López-López, M.Á.; Rosas-Acevedo, J.L.; Juárez-López, A.L.; Reyes-Umaña, M. Ajuste de ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en *Pinus oocarpa* y *Quercus resinosa* en Guerrero, México. *Madera Bosques* **2020**, *26*, e2611964. [\[CrossRef\]](#)
52. Díaz-Franco, R.; Acosta-Mireles, M.; Carrillo-Anzúres, F.; Buendía-Rodríguez, E.; Flores-Ayala, E.; Etchevers-Barra, J.D. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera Bosques* **2007**, *13*, 25–34. [\[CrossRef\]](#)
53. Moyroud, N.; Portet, F. Introduction to QGIS. In *QGIS and Generic Tools*; John Wiley & Sons Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 2018; Chapter 1; pp. 1–17.
54. Revelle, W. *Psych: Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research*; R Core Team: Vienna, Austria, 2023.
55. De Mendiburo, F. *Una Herramienta de Análisis Estadístico para la Investigación Agrícola*; Universidad Nacional de Ingeniería: Rimac, Peru, 2009.
56. Kassambara, A. *rstatix: Pipe-Friendly Framework for Basic Statistical Tests*; R Core Team: Vienna, Austria, 2023.
57. Makowski, D.; Ben-Shachar, M.S.; Lüdecke, D. *bayestestR: Describing Effects and their Uncertainty, Existence and Significance within the Bayesian Framework*. *J. Open Source Softw.* **2019**, *4*, 1541. [\[CrossRef\]](#)
58. Kassambara, A. *ggpubr: "ggplot2" Based Publication Ready Plots*; R Core Team: Vienna, Austria, 2023.
59. Wang, L.Q.; Ali, A. Climate regulates the functional traits—Aboveground biomass relationships at a community-level in forests: A global meta-analysis. *Sci. Total Environ.* **2021**, *761*, 143238. [\[CrossRef\]](#)
60. Wang, L.-Q.; Ali, A.; Wang, L.-Q.; Ali, A. Functional identity regulates aboveground biomass better than trait diversity along abiotic conditions in global forest metacommunities. *Ecography* **2021**, *2022*, e05854. [\[CrossRef\]](#)

61. Cañas, R.A.; Canales, J.; Muñoz-Hernández, C.; Granados, J.M.; Ávila, C.; García-Martín, M.L.; Cánovas, F.M. Understanding developmental and adaptive cues in pine through metabolite profiling and co-expression network analysis. *J. Exp. Bot.* **2015**, *66*, 3113. [\[CrossRef\]](#)
62. Gómez-Mendoza, L.G.; Arriaga, L. Modeling the Effect of Climate Change on the Distribution of Oak and Pine Species of Mexico. *Conserv. Biol.* **2007**, *21*, 1545–1555. [\[CrossRef\]](#)
63. Aceves-Rangel, L.; Méndez-González, J.; García-Aranda, M.A.; Nájera-Luna, J.A. Distribución potencial de 20 especies de pinos en México. *Agrociencia* **2018**, *52*, 1043–1057.
64. Alfaro-Reyna, T.; Retana, J.; Arasa-Gisbert, R.; Vayreda, J.; Martínez-Vilalta, J. Recent dynamics of pine and oak forests in Mexico. *Eur. J. For. Res.* **2020**, *139*, 179–187. [\[CrossRef\]](#)
65. Slik, J.W.F.; Aiba, S.I.; Brearley, F.Q.; Cannon, C.H.; Forshed, O.; Kitayama, K.; Nagamasu, H.; Nilus, R.; Payne, J.; Paoli, G.; et al. Environmental correlates of tree biomass, basal area, wood specific gravity and stem density gradients in Borneo's tropical forests. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **2010**, *19*, 50–60. [\[CrossRef\]](#)
66. Liu, Y.; Yu, G.; Wang, Q.; Zhang, Y. How temperature, precipitation and stand age control the biomass carbon density of global mature forests. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **2014**, *23*, 323–333. [\[CrossRef\]](#)
67. Escobar-Alonso, S.; Rodríguez-Trejo, D.A.; Escobar-Alonso, S.; Rodríguez Trejo, D.A. Estado del arte en la investigación sobre calidad de planta del género *Pinus* en México. *Rev. Mex. Cienc. For.* **2019**, *10*, 4–38. [\[CrossRef\]](#)
68. De Frenne, P.; Lenoir, J.; Luoto, M.; Scheffers, B.R.; Zellweger, F.; Aalto, J.; Ashcroft, M.B.; Christiansen, D.M.; Decocq, G.; De Pauw, K.; et al. Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research agenda. *Glob. Change Biol.* **2021**, *27*, 2279–2297. [\[CrossRef\]](#)
69. Ali, A.; Sanei, A.; Li, M.; Nalivan, O.A.; Ahmadaali, K.; Pour, M.J.; Valipour, A.; Karami, J.; Aminpour, M.; Kaboli, H.; et al. Impacts of climatic and edaphic factors on the diversity, structure and biomass of species-poor and structurally-complex forests. *Sci. Total Environ.* **2020**, *706*, 135719. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
70. Bar-On, Y.M.; Phillips, R.; Milo, R. The biomass distribution on Earth. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2018**, *115*, 6506–6511. [\[CrossRef\]](#)
71. Ni, Y.; Jian, Z.; Zeng, L.; Liu, J.; Lei, L.; Zhu, J.; Xu, J.; Xiao, W. Climate, soil nutrients, and stand characteristics jointly determine large-scale patterns of biomass growth rates and allocation in *Pinus massoniana* plantations. *For. Ecol. Manag.* **2022**, *504*, 119839. [\[CrossRef\]](#)
72. González-Cáceres, M.; Acosta-Hernández, A.C.; Zúñiga-Vazquez, J.M.; Herrera-Soto, G.; Camarero, J.J. Responses of Growth to Climate and Drought in Two Sympatric Mexican Pine Species Marcos. In *Latin American Dendroecology*; Pompa-García, M., Camarero, J.J., Eds.; Springer Nature: Cham, Switzerland, 2020; pp. 61–77. ISBN 9783030369293.
73. Pompa-García, M.; Hadad, M.A. Sensitivity of pines in Mexico to temperature varies with age. *Atmósfera* **2016**, *29*, 209–219. [\[CrossRef\]](#)
74. Vivar-Vivar, E.D.; Pompa-García, M.; Camarero, J.J. Tree Rings Elucidate Differential Drought Responses in Stands of Three Mexican Pines. *Forests* **2024**, *15*, 994. [\[CrossRef\]](#)
75. Chave, J.; Réjou-Méchain, M.; Bürquez, A.; Chidumayo, E.; Colgan, M.S.; Delitti, W.B.C.; Duque, A.; Eid, T.; Fearnside, P.M.; Goodman, R.C.; et al. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Glob. Change Biol.* **2014**, *20*, 3177–3190. [\[CrossRef\]](#)
76. Vieilledent, G.; Gardi, O.; Grinand, C.; Burren, C.; Andriamanjato, M.; Camara, C.; Gardner, C.J.; Glass, L.; Rasolohery, A.; Rakoto Ratsimba, H.; et al. Bioclimatic envelope models predict a decrease in tropical forest carbon stocks with climate change in Madagascar. *J. Ecol.* **2016**, *104*, 703–715. [\[CrossRef\]](#)
77. Rosas-Chavoya, M.; López-Serrano, P.M.; Vega-Nieva, D.J.; Hernández-Díaz, J.C.; Wehenkel, C.; Corral-Rivas, J.J. Estimating Above-Ground Biomass from Land Surface Temperature and Evapotranspiration Data at the Temperate Forests of Durango, Mexico. *Forests* **2023**, *14*, 299. [\[CrossRef\]](#)
78. Toledo, M.; Peña-Claros, M.; Bongers, F.; Alarcón, A.; Balcázar, J.; Chuviña, J.; Leaño, C.; Licona, J.C.; Poorter, L. Distribution patterns of tropical woody species in response to climatic and edaphic gradients. *J. Ecol.* **2012**, *100*, 253–263. [\[CrossRef\]](#)
79. Zhang, X.; Zhou, Y.; Ji, Y.; Yu, M.; Li, X.; Duan, J.; Wang, Y.; Gao, J.; Guo, X. Climate Factors Affect Above–Belowground Biomass Allocation in Broad-Leaved and Coniferous Forests by Regulating Soil Nutrients. *Plants* **2023**, *12*, 3926. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
80. Stegen, J.C.; Swenson, N.G.; Enquist, B.J.; White, E.P.; Phillips, O.L.; Jørgensen, P.M.; Weiser, M.D.; Monteaudo Mendoza, A.; Núñez Vargas, P. Variation in above-ground forest biomass across broad climatic gradients. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **2011**, *20*, 744–754. [\[CrossRef\]](#)
81. Lie, Z.; Xue, L.; Jacobs, D.F. Allocation of forest biomass across broad precipitation gradients in China's forests. *Sci. Rep.* **2018**, *8*, 10536. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
82. Sandel, B.; Goldstein, L.J.; Kraft, N.J.B.; Okie, J.G.; Shulman, M.I.; Ackerly, D.D.; Cleland, E.E.; Suding, K.N. Contrasting trait responses in plant communities to experimental and geographic variation in precipitation. *New Phytol.* **2010**, *188*, 565–575. [\[CrossRef\]](#)
83. Lin, D.; Xia, J.; Wan, S. Climate warming and biomass accumulation of terrestrial plants: A meta-analysis. *New Phytol.* **2010**, *188*, 187–198. [\[CrossRef\]](#)
84. Saatchi, S.; Houghton, R.A.; Dos Santos Alvalá, R.C.; Soares, J.V.; Yu, Y. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. *Glob. Change Biol.* **2007**, *13*, 816–837. [\[CrossRef\]](#)

85. IPCC. Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In *Climate Change 2023*; Lee, H., Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, Switzerland, 2023; pp. 35–115.
86. McKenney, D.W.; Pedlar, J.H.; Lawrence, K.; Campbell, K.; Hutchinson, M.F. Potential Impacts of Climate Change on the Distribution of North American Trees. *Bioscience* **2007**, *57*, 939–948. [\[CrossRef\]](#)
87. Hammond, W.M.; Williams, A.P.; Abatzoglou, J.T.; Adams, H.D.; Klein, T.; López, R.; Sáenz-Romero, C.; Hartmann, H.; Breshears, D.D.; Allen, C.D. Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth’s forests. *Nat. Commun.* **2022**, *13*, 1761. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
88. Cuervo-Robayo, A.P.; Ureta, C.; Gómez-Albores, M.A.; Meneses-Mosquera, A.K.; Téllez-Valdés, O.; Martínez-Meyer, E. One hundred years of climate change in Mexico. *PLoS ONE* **2020**, *15*, e0209808. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
89. Larjavaara, M.; Lu, X.; Chen, X.; Vastaranta, M. Impact of rising temperatures on the biomass of humid old-growth forests of the world. *Carbon Balance Manag.* **2021**, *16*, 31. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
90. Gutiérrez, E.; Trejo, I. Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Rev. Mex. Biodivers.* **2014**, *85*, 179–188. [\[CrossRef\]](#)

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Conclusión

Este estudio identificó la relación entre variables bioclimáticas y la biomasa aérea de diez especies de *Pinus* con distribución principalmente en México, resaltando la influencia de la temperatura y la precipitación como factores determinantes en su distribución y productividad. Los resultados evidenciaron patrones diferenciados entre especies, lo que refleja la diversidad de estrategias adaptativas presentes en el género y la necesidad de abordajes específicos para cada caso.

La identificación de regiones prioritarias como la Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre del Sur y el Eje Volcánico Transversal permite reconocer áreas clave para la conservación y el manejo forestal sustentable. Estos territorios no sólo concentran altos valores de biomasa, sino que también representan espacios estratégicos para la programas de captura de carbono, mitigación del cambio climático y el mantenimiento de servicios ecosistémicos fundamentales.

El estudio confirma que el clima es un motor primario en la dinámica de la biomasa, lo que refuerza la vulnerabilidad de los bosques templados mexicanos frente a escenarios futuros de aumento térmico y reducción en la precipitación. Aún así, también resalta la resiliencia potencial de ciertas especies, cuya selección adecuada puede orientar programas de reforestación y restauración ecológica con mayor probabilidad de éxito.

Metodológicamente, la integración de inventarios forestales con variables bioclimáticas demuestra ser una herramienta eficaz para analizar patrones de biomasa a nivel nacional. No obstante, se recomienda complementar este enfoque con datos edáficos, estructurales y de manejo para fortalecer la robustez de los modelos predictivos.

Finalmente, la investigación contribuye significativamente al conocimiento científico sobre los bosques de pino en México, proporcionando bases para la toma de

decisiones en materia de manejo forestal, conservación y políticas públicas frente al cambio climático. Asimismo, establece un marco de referencia para futuras investigaciones que busquen profundizar en la relación entre clima, biomasa y resiliencia forestal en ecosistemas templados.

Literatura citada

- Aceves-Rangel, L. D., Méndez-González, J., García-Aranda, M. A., & Nájera-Luna, J. A. (2018). Distribución potencial de 20 especies de pinos en México. *Agrociencia*, 52(7), 1043–1057. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952018000701043&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Ali, A., Lin, S. L., He, J. K., Kong, F. M., Yu, J. H., & Jiang, H. S. (2019). Climatic water availability is the main limiting factor of biotic attributes across large-scale elevational gradients in tropical forests. *Science of the Total Environment*, 647, 1211–1221. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.072>
- Álvarez-Dávila, E., Cayuela, L., González-Caro, S., Aldana, A. M., Stevenson, P. R., Phillips, O., Cogollo, Á., Peñuela, M. C., Von Hildebrand, P., Jiménez, E., Melo, O., Londoño-Vega, A. C., Mendoza, I., Velásquez, O., Fernández, F., Serna, M., Velázquez-Rua, C., Benítez, D., & Rey-Benayas, J. M. (2017). Forest biomass density across large climate gradients in northern South America is related to water availability but not with temperature. *PLoS ONE*, 12(3), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171072>
- Arasa-Gisbert, R., Vayreda, J., Román-Cuesta, R. M., Villela, S. A., Mayorga, R., & Retana, J. (2018). Forest diversity plays a key role in determining the stand carbon stocks of Mexican forests. *Forest Ecology and Management*, 415–416(8701), 160–171. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.02.023>
- Balima, L. H., Kouamé, F. N. G., Bayen, P., Ganamé, M., Nacoulma, B. M. I., Thiombiano, A., & Soro, D. (2021). Influence of climate and forest attributes on aboveground carbon storage in Burkina Faso, West Africa. *Environmental Challenges*, 4, 100123. <https://doi.org/10.1016/J.ENVC.2021.100123>
- Bennett, A. C., Penman, T. D., Arndt, S. K., Roxburgh, S. H., & Bennett, L. T. (2020). Climate more important than soils for predicting forest biomass at the continental scale. *Ecography*, 43(11), 1692–1705. <https://doi.org/10.1111/ecog.05180>
- Brown, S., Iverson, L. R., Prasad, A., & Liu, D. (1993). Geographical distributions of carbon in biomass and soils of tropical asian forests. *Geocarto International*, 8(4), 45–59. <https://doi.org/10.1080/10106049309354429>
- Carlón Allende, T., Mendoza, M. E., Villanueva Díaz, J., & Li, Y. (2018). Climatic response of *Pinus cembroides* Zucc. radial growth in Sierra del Cubo, Guanajuato, Mexico. *Trees - Structure and Function*, 32(5), 1387–1399. <https://doi.org/10.1007/S00468-018-1720-1/METRICS>
- Carrillo-Anzúres, F., Acosta-Mireles, M., Flores-Ayala, E., Juárez-Bravo, J. E., & Bonilla-Padilla, E. (2018). Estimación de biomasa y carbono en dos especies arbóreas en La Sierra Nevada, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(5), 779–793. <https://doi.org/10.29312/remexca.v5i5.901>
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Bürquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Henry, M., Martínez-Yrízar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., ... Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground

- biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Chávez-García, A. S., Hernández-Ramos, J., Muñoz-Flores, H. J., García-Magaña, J. J., Gómez-Cárdenas, M., Gutiérrez-Contreras, M., Chávez-García, A. S., Hernández-Ramos, J., Muñoz-Flores, H. J., García-Magaña, J. J., Gómez-Cárdenas, M., & Gutiérrez-Contreras, M. (2022). Plasticidad fenotípica de progenies de árboles de *Pinus pseudostrobus* Lindl. superiores en producción de resina en vivero. *Madera y Bosques*, 28(1). <https://doi.org/10.21829/MYB.2022.2812381>
- Chen, X., Luo, M., & Larjavaara, M. (2023). Effects of climate and plant functional types on forest above-ground biomass accumulation. *Carbon Balance and Management*, 18(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/s13021-023-00225-1>
- CONAFOR. (2017a). Procedimientos de muestreo Version 19.0. In CONAFOR. SEMARNAT-CONAFOR.
- CONAFOR. (2017b). Procedimientos de muestreo Version 19.0. In CONAFOR. SEMARNAT-CONAFOR. https://www.conafor.gob.mx/apoyos/docs/externos/2022/DocumentosMetodológicos/2019/ANEXO_Procedimientos_de_muestreo_2019.pdf
- CONAFOR. (2021). *Producción y Productividad*.
- CONAFOR. (2023). *¿Cuánto carbono secuestran los ecosistemas forestales?* | Comisión Nacional Forestal | Gobierno | gob.mx. <https://www.gob.mx/conafor/articulos/cuanto-carbono-secuestran-los-ecosistemas-forestales>
- CONAFOR, & CONABIO. (n.d.-a). *Pinus ayacahuite* Ehren. SIRE- Paquetes Tecnológicos. Retrieved June 20, 2024, from http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/953Pinus_ayacahuite.pdf
- CONAFOR, & CONABIO. (n.d.-b). *Pinus cembroides* Zucc. SIRE- Paquetes Tecnológicos. Retrieved June 20, 2024, from http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/955Pinus_cembroides.pdf
- CONAFOR, & CONABIO. (n.d.-c). *Pinus devoniana* Lindley. SIRE- Paquetes Tecnológicos. Retrieved June 20, 2024, from <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/957Pinus devoniana.pdf>
- CONAFOR, & CONABIO. (n.d.-d). *Pinus leiophylla* Schl. & Cham. SIRE- Paquetes Tecnológicos. Retrieved June 20, 2024, from <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/967Pinus leiophylla.pdf>
- CONAFOR, & CONABIO. (n.d.-e). *Pinus montezumae* Lamb. SIRE- Paquetes Tecnológicos. Retrieved June 27, 2024, from http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/971Pinus_montezumae.pdf
- CONAFOR, & CONABIO. (n.d.-f). *Pinus oocarpa* Shiede. SIRE-Paquetes Tecnológicos. Retrieved June 20, 2024, from <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/974Pinus oocarpa.pdf>
- CONAFOR, & CONABIO. (n.d.-g). *Pinus patula* Schl. et Cham. SIRE-Paquetes Tecnológicos. Retrieved June 20, 2024, from <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/975Pinus patula.pdf>

- CONAFOR, & CONABIO. (n.d.-h). *Pinus pseudostrobus Lindl.* SIRE-Paquetes Tecnológicos. Retrieved June 20, 2024, from http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/981Pinus_pseudostrobus.pdf
- CONAFOR, & CONABIO. (n.d.-i). *Pinus teocote Schiede ex Schltdl.* SIRE-Paquetes Tecnológicos. Retrieved June 20, 2024, from http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/983Pinus_teocote.pdf
- CONAFOR-CONABIO. (n.d.). *Pinus arizonica Engelm.* SIRE- Paquetes Tecnológicos. Retrieved June 19, 2024, from http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/952Pinus_arizonica.pdf
- Dauber, E., Terán, J., & Guzmán, R. (2003). Estimaciones de biomasa y carbono en bosques naturales de Bolivia. *Revista Forestal Iberoamericana*, 1, 1–10.
- De Mendiburo, F. (2009). *Una herramienta de Análisis Estadístico para la investigación Agrícola* [Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/14814>
- Díaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., Buendía-Rodríguez, E., Flores-Ayala, E., Etchevers-Barra, J. D., Díaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., Buendía-Rodríguez, E., Flores-Ayala, E., & Etchevers-Barra, J. D. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques*, 13(1), 25–34. <https://doi.org/10.21829/MYB.2007.1311233>
- FAO. (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010 Informe principal.* <http://www.fao.org/docrep/013/i1757s/i1757s.pdf>
- Farjon, A. (1996). Biodiversity of *Pinus*(Pinaceae) in Mexico: speciation and palaeo-endemism. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 121(4), 365–384. <https://doi.org/10.1006/bojl.1996.0041>
- Fehse, J., Hofstede, R., Aguirre, N., Paladines, C., Kooijman, A., & Sevink, J. (2002). High altitude tropical secondary forests: a competitive carbon sink? *Forest Ecology and Management*, 163(1), 9–25.
- Fotis, A. T., Murphy, S. J., Ricart, R. D., Krishnadas, M., Whitacre, J., Wenzel, J. W., Queenborough, S. A., & Comita, L. S. (2018). Above-ground biomass is driven by mass-ratio effects and stand structural attributes in a temperate deciduous forest. *Journal of Ecology*, 106(2), 561–570. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12847>
- Fritts, H. C. (1976). *Tree Rings and Climate*. Academic Press.
- Galicia, L., Chávez-Vergara, B. M., Kolb, M., Jasso-Flores, R. I., Rodríguez-Bustos, L. A., Solís, L. E., de la Cruz, V. G., Pérez-Campuzano, E., & Villanueva, Y. A. (2018). Perspectives of the socioecological approach in the preservation, utilization and the payment of environmental services of the temperate forests of Mexico. *Madera y Bosques*, 24(2), 1–18. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421443>
- García Martínez, R., Hernández Soto, F. N., Emeterio Moreno, J., Colín Velázquez, M. K., García Martínez, R., Hernández Soto, F. N., Emeterio Moreno, J., & Colín Velázquez, M. K. (2024). Differences in soil fertility in four commercial pine forest plantations in Amanalco, State of Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(85), 150–170. <https://doi.org/10.29298/RMCF.V15I85.1462>

- García-Aranda, M. A., Méndez-González, J., Hernández-Arizmendi, J. Y., García-Aranda, M. A., Méndez-González, J., & Hernández-Arizmendi, J. Y. (2018). Distribución potencial de *Pinus cembroides*, *Pinus nelsonii* y *Pinus culminicola* en el Noreste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(13), 3–13. <https://doi.org/10.19136/ERA.A5N13.1396>
- Gil de María y Campos, J. E. (2014). *ICONOGRAFIA DE LOS PINOS DEL CENTRO DE MEXICO*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gómez-Romero, M., Blanco-García, J. A., Sáenz-Romero, C., Villegas, J., Lindig-Cisneros, R., & Soto-Correa, J. C. (2012). Estudio de especies de pino para restauración de sitios degradados. *Agrociencia*, 46(8), 795–807. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000800005&lng=es&tlng=es
- González-Cásares, M., Acosta-Hernández, A. C., Zúñiga-Vazquez, J. M., Herrera-Soto, G., & Camarero, J. J. (2020). Responses of Growth to Climate and Drought in Two Sympatric Mexican Pine Species Marcos. In M. Pompa-García & J. J. Camarero (Eds.), *Latin American Dendroecology* (pp. 61–77). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36930-9_6
- Guerrero, L. (2013). *Cuantificación de biomasa, carbono y producción de oxígeno de Pinus cembroides Zucc.* En Mazapil, Zacatecas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Hernández Stefanoni, J. L., Castillo Santiago, M. Á., Mauricio, J. A., François Mas, J., Tun Dzul, F., & Dupuy Rada, J. M. (2021). Mapeo de la biomasa área mediante datos de sensores remotos y R. In *El Colegio de la Frontera Sur y Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C.* (Issue January). https://ecosur.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1017/2119/3/60535_Documento.pdf
- Hernández-Salas, J., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., González-Tagle, M. A., Luján-Álvarez, C., Olivas-García, J. M., & Domínguez-Pereda, L. A. (2013). Efecto del manejo forestal en la diversidad y composición arbórea de un bosque templado del noroeste de México. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 19(2), 189–199. <https://doi.org/10.5154/R.RCHSCFA.2012.08.052>
- IPCC. (2000). Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. *Resumen Para Responsables de Políticas*, 24. <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srl-sp.pdf>
- IPCC. (2000). *Summary for Policymakers IPCC SPECIAL REPORT EMISSIONS SCENARIOS Summary for Policymakers Emissions Scenarios*. <https://ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>
- Jia, B., Guo, W., He, J., Sun, M., Chai, L., Liu, J., & Wang, X. (2022). Topography, Diversity, and Forest Structure Attributes Drive Aboveground Carbon Storage in Different Forest Types in Northeast China. *Forests* 2022, Vol. 13, Page 455, 13(3), 455. <https://doi.org/10.3390/F13030455>
- Kassambara, A. (2023). *rstatix:Pipe-Friendly Framework for Basic Statical Tests* (0.7.2). <https://cran.r-project.org/package=rstatix%3E>.
- Lal, R. (2016). Soil health and carbon management | Enhanced Reader. *Food and Energy Security*, 4(5), 212–222. <https://doi.org/10.1002/fes3.96>

- Larjavaara, M., Lu, X., Chen, X., & Vastaranta, M. (2021). Impact of rising temperatures on the biomass of humid old-growth forests of the world. *Carbon Balance and Management*, 16(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/s13021-021-00194-3>
- Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1–18. <https://doi.org/10.18637/JSS.V025.I01>
- Lee, H. I., Seo, Y. O., Kim, H., Ali, A., Lee, C., & Chung, Y. (2022). Species evenness declines but specific functional strategy enhances aboveground biomass across strata in subtropical – Warm-temperate forests of South Korea. *Forest Ecology and Management*, 512, 120179. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2022.120179>
- Lee, H., & Lautenbach, S. (2016). A quantitative review of relationships between ecosystem services. *Ecological Indicators*, 66, 340–351. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2016.02.004>
- Levitt, J. (1980). *2nd Edition RESPONSES OF PLANTS TO ENVIRONMENTAL STRESSES VOLUME I Chilling, Freezing, and High Temperature Stresses* (T. T. Kozlowski, Ed.; 2nd ed., Vol. 1). Academic Press.
- Li, Q., Liu, Z., & Jin, G. (2022). Impacts of stand density on tree crown structure and biomass: A global meta-analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 326, 109181. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMAT.2022.109181>
- Liu, Y., Yu, G., Wang, Q., & Zhang, Y. (2014). How temperature, precipitation and stand age control the biomass carbon density of global mature forests. *Global Ecology and Biogeography*, 23(3), 323–333. <https://doi.org/10.1111/geb.12113>
- Loock, E. M. (1950). The Pines of México and British Honduras. *Department of Forestry Bulletin*, 35, 262.
- Ma, Y., Eziz, A., Halik, Ü., Abliz, A., & Kurban, A. (2023). Precipitation and Temperature Influence the Relationship between Stand Structural Characteristics and Aboveground Biomass of Forests—A Meta-Analysis. *Forests*, 14(5), 1–15. <https://doi.org/10.3390/f14050896>
- Martin, A. R., Doraisami, M., & Thomas, S. C. (2018). Global patterns in wood carbon concentration across the world's trees and forests. *Nature Geoscience* 2018 11:12, 11(12), 915–920. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0246-x>
- Martínez, M. (1948). *Los Pinos Mexicanos* (Ediciones Botas, Ed.; Segunda Edición).
- McDowell, N., Pockman, W.T., Allen, C.D., Breshears, D.D., Cobb, N., Kolb, T., Sperry, J., West, A., Williams, D., & Yepez, E.A. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *Tansley Review. New Phytologist*, 178, 719–739.
- Méndez-González, J., Luckie-Navarrete, S. L., Capó-Arteaga, M. A., & Nájera-Luna, J. A. (2011). Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl., En Guanajuato, México. *Agrociencia*, 45(4), 479–491.
- Moyroud, N., & Portet, F. (2018). Introduction to QGIS. *QGIS and Generic Tools*, 1, 1–17. <https://doi.org/10.1002/9781119457091.CH1>
- Návar, J. (2009). Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 257(2), 427–434. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2008.09.028>

- Navarro-Martínez, J., Godínez-Jaimes, F., López-López, M. Á., Rosas-Acevedo, J. L., Juárez-López, A. L., Reyes-Umaña, M., Navarro-Martínez, J., Godínez-Jaimes, F., López-López, M. Á., Rosas-Acevedo, J. L., Juárez-López, A. L., & Reyes-Umaña, M. (2020). Ajuste de ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en *Pinus oocarpa* y *Quercus resinosa* en Guerrero, México. *Madera y Bosques*, 26(1). <https://doi.org/10.21829/MYB.2020.2611964>
- O'Donnell, M. S., & Ignizio, D. A. (2012). Bioclimatic Predictors for Supporting Ecological Applications in the Conterminous United States. *U.S Geological Survey Data Series* 691, 10.
- Ordóñez, B., & Masera, J. A. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático. In *Madera y Bosques* (Vol. 7, Issue 1).
- Ordoñez-Díaz, J. A., Galicia-Naranjo, A., Venegas-Mancera, N. J., Hernandez-Tejeda, T., Ordóñez-Díaz J.A.B, & Dávalos-Sotelo, R. (2015). Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y Boques*, 21, 11–126.
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Phillips, O. L., & Jackson, R. B. (2013). The structure, Distribution, and Biomass of the World's forests. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 44(1), 593–622.
- Pavon, N. P., Moreno, C. E., & Ramirez-Bautista, A. (2012). Biomasa de raíces en un bosque templado con y sin manejo forestal en hidalgo, Mexico. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 18(3), 303–312. <https://doi.org/10.5154/R.RCHSCFA.2011.07.052>
- Perry, J. P. (1991). *The Pines of Mexico and Central America*. Timber Press.
- Pompa-García, M., & Hadad, M. A. (2016). Sensitivity of pines in Mexico to temperature varies with age. *Atmósfera*, 29(3), 209–219. <https://doi.org/10.20937/ATM.2016.29.03.03>
- Pompa-García, M., Sigala-Rodríguez, J. Á., Pompa-García, M., & Sigala-Rodríguez, J. Á. (2017). Variation of carbon uptake from forest species in Mexico: a review. *Madera y Bosques*, 23(2), 225–235. <https://doi.org/10.21829/MYB.2017.2321512>
- Poorter, L., Bongers, F., Aide, T. M., Almeyda Zambrano, A. M., Balvanera, P., Becknell, J. M., Boukili, V., Brancalion, P. H. S., Broadbent, E. N., Chazdon, R. L., Craven, D., De Almeida-Cortez, J. S., Cabral, G. A. L., De Jong, B. H. J., Denslow, J. S., Dent, D. H., DeWalt, S. J., Dupuy, J. M., Durán, S. M., ... Rozendaal, D. M. A. (2016). Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature*, 530(7589), 211–214. <https://doi.org/10.1038/nature16512>
- Reich, P. B., Luo, Y., Bradford, J. B., Poorter, H., Perry, C. H., & Oleksyn, J. (2014). Temperature drives global patterns in forest biomass distribution in leaves, stems, and roots. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(38), 13721–13726. <https://doi.org/10.1073/pnas.1216053111>
- Rodríguez-Veiga, P., Saatchi, S., Tansey, K., & Balzter, H. (2016). Magnitude, spatial distribution and uncertainty of forest biomass stocks in Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 183, 265–281. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2016.06.004>
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México* (C. N. para el C. y uso de la Biodiversidad., Ed.).

- Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Joyce, D. G., Beaulieu, J., St. Clair, J. B., Jaquish, B. C., Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., Joyce, D. G., Beaulieu, J., St. Clair, J. B., & Jaquish, B. C. (2016). Migración asistida de las poblaciones forestales para la adaptación de árboles ante el cambio climático. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 22(3), 303–323. <https://doi.org/10.5154/R.RCHSCFA.2014.10.052>
- Sáenz-Romero, C., Ricardo Guzmán-Reyna, R., & Rehfeldt, G. E. (2006). Altitudinal genetic variation among *Pinus oocarpa* populations in Michoacán, Mexico Implications for seed zoning, conservation, tree breeding and global warming. *Forest Ecology and Management*, 229, 340–350. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.04.014>
- Salinas-Moreno, Y., Mendoza, M., Barrios, M., Cisneros, R., Macias-Samano, J., & Zuniga, G. (2004). Aerography of the genus *Dendroctonus* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in Mexico. *Salinas-Moreno, Y., Mendoza, M., Barrios, M., Cisneros, R., Macias-Samano, J., & Zuniga, G. (2004). Aerography of the genus *Dendroctonus* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in Mexico. *Biogeography*, 31, 1163–1177.*
- Salisbury, F. B. ., Ross, C. W. ., & Alonso, J. Manuel. (2000). *Fisiología de las plantas*. https://books.google.com/books/about/Fisiolog%C3%ADa_de_las_plantas_to_mo_2_Bioqu.html?hl=es&id=8vQ5PgAACAAJ
- Sánchez-González, A. (2008). Diversity and distribution of Mexican pines, an overview. *Madera y Bosques*, 14(1), 107–120. <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1411222>
- Sánchez-Velasquez, L. R., Galindo- González, J., & Díaz-Fleisher, F. (2008). *Ecología, Manejo y Conservación de los Ecosistemas de Montaña en México*. (CONABIO, Universidad Veracruzana, & S. A. de C. V. Mundi Prensa México, Eds.).
- Segura, M., & Kanninen, M. (2005). Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. *Biotropica*, 37(1), 2–8. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2005.02027.x>
- SEMARNAT. (2021). *Anuario estadístico de la Producción Forestal 2017-2018*. <https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2021/2018.pdf>
- Shaw, G. R. (1909). The pines of Mexico. In *The pines of Mexico*. J.R. Ruiter. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.28493>
- Solano, D. J., Mora-Delgado, J., & Duque, G. (2019). Ecuaciones alométricas para la estimación de la captura de carbono almacenado en árboles. *Revista Agroforestería Neotropical*, 1(9), 5–24. <https://revistas.ut.edu.co/index.php/agroforesteria/article/view/2332>
- Standley, P. C. (1920). Trees and shrubs of Mexico. In *Trees and shrubs of Mexico*. Govt. Print. Off. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.15726>
- Usuga, J. C. L., Toro, J. A. R., Alzate, M. V. R., & de Jesús Lema Tapias, Á. (2010). Estimation of biomass and carbon stocks in plants, soil and forest floor in different tropical forests. *Forest Ecology and Management*, 260(10), 1906–1913. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2010.08.040>
- Vieilledent, G., Gardi, O., Grinand, C., Burren, C., Andriamananjato, M., Camara, C., Gardner, C. J., Glass, L., Rasolohery, A., Rakoto Ratsimba, H., Gond, V., &

- Rakotoarijaona, J. R. (2016). Bioclimatic envelope models predict a decrease in tropical forest carbon stocks with climate change in Madagascar. *Journal of Ecology*, 104(3), 703–715. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12548>
- Villanueva-Díaz, J., Rubio-Camacho, E. A., Chávez-Durán, Á. A., Zavala-Aguirre, J. L., Cerano-Paredes, J., Martínez-Sifuentes, A. R., Villanueva-Díaz, J., Rubio-Camacho, E. A., Chávez-Durán, Á. A., Zavala-Aguirre, J. L., Cerano-Paredes, J., & Martínez-Sifuentes, A. R. (2018). Respuesta climática de *Pinus oocarpa* Schiede Ex Schetol en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Madera y Bosques*, 24(1). <https://doi.org/10.21829/MYB.2018.2411464>
- Wang, L. Q., & Ali, A. (2021). Climate regulates the functional traits – aboveground biomass relationships at a community-level in forests: A global meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 761, 143238. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143238>
- Way, D. A., & Oren, R. (2010). Differential responses to changes in growth temperature between trees from different functional groups and biomes: a review and synthesis of data. *Tree Physiology Review*, 30, 669–688. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq015>
- Yao, Z., Xin, Y., Yang, L., Zhao, L., & Ali, A. (2022). Precipitation and temperature regulate species diversity, plant coverage and aboveground biomass through opposing mechanisms in large-scale grasslands. *Frontiers in Plant Science*, 13(December), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.999636>
- Yeaton, R. I. (1982). The altitudinal distribution of the genus *Pinus* in the western United States and Mexico. *Boletín de La Sociedad Botánica de México*, 42, 55–71.