



Estaciones meteorológicas y estudios dendroclimáticos en México: ¿Cuál estación elegir?

Weather stations and dendroclimatic studies in Mexico: Which station to choose?

Erick Gutiérrez^{1*}, Irma Trejo², Carolina Bucio³, Jesús Luna³, Alejandra Miguel³, Minella Ramírez³ y Mónica Vázquez³

¹ Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado en Ciencias Biológicas. Ciudad de México, México.

² Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía. Ciudad de México, México.

³ Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. Ciudad de México, México.

* Autor de correspondencia.
erick_eduardo@ciencias.unam.mx

RESUMEN

Los anillos de crecimiento son un banco de datos que, interpretados a detalle, pueden ayudar a dilucidar eventos climáticos que ocurrieron en el pasado. Para realizar interpretaciones más asertivas es necesario utilizar información proveniente de estaciones meteorológicas cercanas a los sitios de estudio. El objetivo del presente trabajo fue determinar si existen diferencias en condiciones entre las estaciones meteorológicas y los sitios de muestreo que se utilizaron en los estudios dendroclimáticos realizados en México. Se realizó una revisión en diferentes bases de datos científicas y buscadores digitales para obtener todos los trabajos publicados referentes a dendroclimatología cuya zona de estudio fuera en México. Se obtuvieron los valores de las variables propuestas tanto para las estaciones meteorológicas como para los sitios de muestreo de los estudios, para calcular un índice de similitud de condiciones. Se registró un total de 81 estudios, pero solo se analizaron 39 (48%), ya que solo estos expresaban de manera precisa las estaciones utilizadas y las coordenadas geográficas de los sitios de muestreo. Solo 6% de los estudios dendroclimáticos presentaron una alta similitud de condiciones, 41% una similitud media-alta, 46% una similitud media-baja, y 7% una baja similitud de condiciones. Se considera importante realizar, en un futuro cercano, una comparación de condiciones entre las estaciones meteorológicas y los sitios de muestreo en todos los estudios dendrocronológicos; eso se podría realizar con índices de similitud de condiciones como el que se propone en este estudio.

PALABRAS CLAVE: anillo de crecimiento, condiciones ambientales, correlación espacial, dendroclimatología, dendrocronología, potencial dendrocronológico.

ABSTRACT

Tree-rings growth is a data bank that, if correctly interpreted in detail, can help elucidate climatic events of the past. To make more assertive interpretations it is necessary to use information from weather stations near the study sites. The objective of the present study was to determine if there are differences in conditions between the selected meteorological stations and the sampling sites used in the dendroclimatic studies carried out in Mexico. We reviewed different scientific databases and digital search engines to obtain all the published works related to dendroclimatology whose area of study is localized in Mexico. We obtained the values of each of the proposed variables, both the meteorological stations and the sampling sites used in the dendroclimatic studies to calculate an index of similarity of conditions proposed. We recorded 81 studies, but only 39 were analyzed (48%) since only they expressed in a precise way the stations used and the geographical coordinates of the sampling sites. We observed that only 6% of the dendroclimatic studies presented a high similarity, 41% of the studies showed a medium-high similarity, 46% showed a medium-low similarity, and the other 7% presented a low similarity of conditions. A comparison of conditions between meteorological stations and sampling sites should be made in all dendrochronological studies, which could be done with similarity indexes of conditions such as the one recommended in this study.

KEYWORDS: growth ring, environmental conditions, spatial correlation, dendroclimatology, dendrochronology, dendrochronological potential.

INTRODUCCIÓN

Una de las técnicas de datación más utilizada en términos de datos de observación es la dendrocronología, cuyo objetivo es el estudio de los anillos anuales de crecimiento de las plantas leñosas. Esta disciplina ha proporcionado información extremadamente valiosa relacionada con el cambio ambiental y climático de miles de años, proporcionando datos para periodos en los que la observación instrumental no está disponible (Beniston, 2002; Fritts, 1971). Un anillo de crecimiento radial es una capa de tejido secundario que puede ser xilema o floema, aunque este último no es siempre distinguible. No todas las especies forman anillos de crecimiento, las especies tropicales no exhiben un cambium vascular diferenciado, sino que se observa un crecimiento homogéneo (Raven *et al.*, 2005).

Existen factores que determinan el crecimiento arbóreo, entre los que se encuentran los climáticos (precipitación, temperatura, humedad), edáficos (drenaje, profundidad del suelo, cantidad de nutrientes), lumínicos (disponibilidad de luz), por mencionar algunos. Lo anterior se ve reflejado en los anillos de crecimiento, ya que los anillos serán más anchos en sitios con alta precipitación, suelo profundo, con buen drenaje y con mucha disponibilidad de luz (Fritts, 1976; Schweingruber, 1993).

Esta relación existente entre las condiciones ambientales y el crecimiento arbóreo permite realizar inferencias sobre variables ambientales donde no se cuenta con información directa, a partir de los aumentos o disminuciones abruptos en el crecimiento radial o en la producción excesiva de anillos de crecimiento. La dendroclimatología se basa en esa relación entre las condiciones ambientales y el crecimiento arbóreo, ya que a partir del estudio de los anillos de crecimiento se pueden reconstruir algunas de las variables climáticas (Fritts, 1971).

Cuando se trata de relacionar los anillos de crecimiento radial con las condiciones climáticas para reconstruir las variables meteorológicas, es necesario tener en cuenta

algunos criterios como la selección de los sitios de muestreo y la selección de plantas que son propicias para realizar los estudios. En cuanto a la selección de sitios de muestreo se recomienda que se seleccionen lugares que no tengan evidencia de disturbio (Astudillo-Sánchez *et al.*, 2017; Villanueva-Díaz *et al.*, 2007) y que presenten condiciones similares entre sí, por ejemplo, pendiente y orientación de la ladera, para que estas condiciones no sean un factor que influya en las diferencias entre el crecimiento radial de las diferentes muestras (Pompa-García y Jurado, 2014; Pompa-García y Venegas-González, 2016).

En la selección de los individuos de estudio se recomienda elegir árboles de apariencia más longeva, más altos y más grandes en términos de diámetro, evitando a su vez a todos aquellos individuos que tuvieran alguna deformidad o que estuvieran dañados o enfermos (Astudillo-Sánchez *et al.*, 2017; Marlès *et al.*, 2015). Es importante considerar aquellos individuos que proporcionan más información climática en cuanto a la variación en el crecimiento de los anillos, porque son los que están catalogados como sensibles, estos crecen cerca de su intervalo ecológico extremo, en este caso las variaciones climáticas influyen en gran medida. Los individuos catalogados como complacientes crecen en un ambiente más benigno, donde las variaciones climáticas influyen muy poco y proporcionarían poca información de variación climática (Beniston, 2002; Fritts, 1971).

La mayoría de los estudios dendroclimáticos en México únicamente han utilizado a la precipitación en sus análisis. Algunos se han enfocado en la reconstrucción de esa variable (Cleaveland *et al.*, 2003; Díaz-Ramírez *et al.*, 2016), mientras que otros se han enfocado en determinar la relación entre la precipitación y el crecimiento radial (Astudillo-Sánchez *et al.*, 2017; Therrell *et al.*, 2002), en detectar eventos de sequía (Arreola-Ortiz y Nívar-Cháidez, 2010; Bickford *et al.*, 2011), en la reconstrucción de la evaporación o correlacionando dicha variable climática con el crecimiento radial (Chacón-de la Cruz y Pompa-García, 2015; Pompa-García, Rodríguez-Flores *et al.*, 2013), o en la identificación de eventos de El Niño - Oscilación del



Sur, ENOS (Arreola-Ortiz y Návar-Cháidez, 2010; Cerano-Paredes et al., 2011).

México es considerado como un área de transición entre dos regiones biogeográficas, la neártica y la neotropical (Morrone, 2017); cuenta con una gran diversidad de tipos de climas, vegetación y suelos, producto de su heterogeneidad ambiental. Posee gran diversidad de especies arbóreas, se estima un total de 170, de las cuales 44% son endémicas para México (Ricker y Hernández, 2010). Al tener un número elevado de especies leñosas, tiene un alto potencial para realizar estudios dendroclimáticos, además una diversidad de condiciones donde se podrían aplicar.

De acuerdo con la hipótesis de correlación espacial que establece que dos puntos en el espacio geográfico que están a corta distancia son más similares en condiciones que si estuvieran alejados, para realizar un buen estudio dendroclimático, los sitios seleccionados para la obtención de muestras de plantas leñosas deben de estar lo suficientemente cercanos a las estaciones meteorológicas para tener datos climáticos comparables con los anillos de crecimiento, para que de esta manera se puedan realizar inferencias más asertivas (Chen et al., 2017; Wang et al., 2020; Yang et al., 2017). Una mayor cantidad de diferencias en condiciones significaría que las estaciones meteorológicas seleccionadas no fueron las idóneas para realizar los estudios dendroclimáticos, por el contrario, una menor cantidad de diferencias en condiciones sería el reflejo de una buena elección. Para hacer la determinación objetivo de este estudio, se propone un índice de similitud de condiciones ambientales (%) entre las estaciones meteorológicas y los sitios de muestreo, que podría aplicarse en la selección de estaciones meteorológicas en los estudios dendroclimáticos.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio fue determinar, con base en 14 variables, si existen diferencias en condiciones entre las estaciones meteorológicas seleccionadas y los sitios de muestreo en los estudios dendroclimáticos realizados en México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La zona de trabajo donde se enfocó este estudio fue todo el territorio de México, cuyas coordenadas extremas son: al norte 32° 43' 06" y al sur 14° 32' 27" de latitud norte; al este 86° 42' 36" y al oeste 118° 27' 24" de longitud oeste. México cuenta con una superficie continental de 1 959 248 km², tiene fronteras con Estados Unidos de América, Guatemala y Belice, y se encuentra rodeado principalmente por el océano Pacífico al oeste y por el Golfo de México al este (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi], 2020).

Selección de estudios dendroclimáticos

Para cumplir con el objetivo del trabajo, se realizó una revisión exhaustiva en diferentes bases de datos científicas y buscadores digitales (*Web of Science*, *BIOONE*, *EBSCOHOST*, *JSTOR*, *PlusOne*, *ScienceDirect*, *Scopus*, *Springer*, *WILEY* y *Google Scholar*) de los cuales se recopilaron estudios publicados referentes a dendroclimatología cuya zona de estudio se localiza en México. Para los análisis solo se trabajó con los artículos que usaron datos climáticos provenientes de estaciones meteorológicas y que expresaran de manera precisa las estaciones utilizadas y las coordenadas geográficas de los sitios de muestreo.

Similitud de condiciones ambientales

A partir de los estudios seleccionados, se elaboró una base de datos que contemplaba las coordenadas geográficas de los sitios de muestreo y de las estaciones meteorológicas que utilizaron. Las coordenadas de las estaciones se obtuvieron de la información disponible en el sitio del Servicio Meteorológico Nacional [SMN] (2020).

Se trabajó con 14 variables tanto categóricas como continuas (Tabla 1): cuenca, subcuenca, tipo de vegetación, tipo de clima, provincia fisiográfica, subprovincia fisiográfica, topoforma, orientación de la ladera, distancia entre la estación meteorológica-sitio de muestreo (km),

distancia a los cuerpos de agua más cercanos (mar y lagos, km), así como las diferencias entre la estación-sitio en altitud (m), en temperatura media anual (°C) y en precipitación anual (mm).

Para cada sitio de muestreo y estación meteorológica, se obtuvo la información de cada variable con base en la cartografía disponible mediante un sistema de información geográfica (SIG). La capa de orientación de la ladera se generó por medio de un SIG a partir del mapa de altitud. Las distancias a los cuerpos de agua (mar y lagos) de las estaciones y los sitios de muestreo también se calcularon por medio de un SIG. Posteriormente se calcularon las

diferencias entre las estaciones-sitios de muestreo para la altitud, temperatura y precipitación. Finalmente, para el cálculo de la distancia entre las estaciones meteorológicas-sitios de muestreo se utilizó el lenguaje de programación Python para obtener la información proveniente de la página oficial del SMN, en específico, se obtuvieron latitud, longitud, altitud y nombre de las estaciones; posteriormente con el método “distance” del paquete “geopy”, se calcularon las distancias entre cada punto de muestreo, utilizando las coordenadas de los sitios y de las estaciones correspondientes.

TABLA 1. Variables utilizadas en el presente estudio.

<i>Variable</i>	<i>Tipo</i>	<i>Escala o resolución</i>	<i>Fuente</i>
Cuenca	Categoría	1:250 000	Inegi (2006)
Subcuenca	Categoría	1:250 000	Inegi (2006)
Tipo de vegetación	Categoría	1:250 000	Inegi (1992)
Tipo de clima	Categoría	1:1 000 000	Inegi (2000)
Provincia fisiográfica	Categoría	1:1 000 000	Inegi (2001a)
Subprovincia fisiográfica	Categoría	1:1 000 000	Inegi (2001c)
Topografía	Categoría	1:1 000 000	Inegi (2001b)
Orientación de la ladera	Categoría	15 m	Presente estudio
Distancia entre estación-sitio	Continua	N/A	Presente estudio
Altitud	Continua	15 m	Inegi (2013)
Temperatura media anual	Continua	1 km	(Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, 2021)
Precipitación anual	Continua	1 km	(Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, 2021)
Cuerpos de agua (lagos)	Continua	1:50 000	Inegi (2009)
Línea de costa (mar)	Continua	1:1 000 000	Inegi (2019)



Para la obtención del índice de similitud en condiciones entre las estaciones y los sitios de muestreo, primero se calculó el porcentaje de similitud (PS) para cada variable utilizada. En ese sentido, en las variables categóricas (cuenca, subcuenca, tipo de vegetación, tipo de clima, provincia fisiográfica, subprovincia fisiográfica, topografía, orientación de la ladera) el porcentaje de similitud solamente podía tener dos opciones, 0% o 100%. El 0% (categoría 1) indica que la estación meteorológica y el sitio de muestreo a comparar presentan diferentes tipos de categoría, mientras que el valor de 100% (categoría 2) corresponde al caso en que tanto la estación como el sitio de muestreo se encuentran bajo la misma condición.

En las variables continuas (distancia entre la estación meteorológica-sitio de muestreo, distancia a los cuerpos de agua más cercanos, diferencias entre la estación-sitio en altitud, en temperatura media anual y en precipitación anual), el porcentaje se calculó con base en seis categorías (Tabla 2) y el valor del porcentaje dependió de las diferencias y las distancias observadas entre las estaciones meteorológicas y los sitios de muestreo.

El índice de similitud se calculó utilizando la ecuación 1.

$$\text{Índice de similitud} = \frac{\sum PS \cdot 100}{V_{max}} \quad (1)$$

donde:

$\sum PS$: sumatoria de los porcentajes de similitud de todas las variables utilizadas

V_{max} : valor máximo posible que puede obtenerse de la sumatoria de los porcentajes de similitud

En este caso, el valor máximo fue 1400, ya que se utilizaron 14 variables en total.

De esta manera, el índice puede obtener valores entre 0% y 100%, siendo los valores cercanos a 0% los que representarían una baja similitud de condiciones entre la estación meteorológica y el sitio de muestreo; mientras que los valores cercanos a 100% representarían una alta similitud de condiciones. El presente estudio estableció cuatro categorías del índice de similitud que podría emplearse en los estudios dendroclimáticos: similitud baja (< 25%), similitud media baja (25% - 50%), similitud media alta (50% - 75%) y similitud alta (> 75%).

RESULTADOS

Estudios dendroclimáticos en México

Se registró un total de 81 estudios, de los cuales solo 39 (48%) fueron considerados para el presente análisis (Tabla 3). Esto se debió a que los trabajos restantes no utilizaron datos provenientes de estaciones meteorológicas, sino que utilizaron cartografía climática (14%) o no fueron precisos en las estaciones meteorológicas que utilizaron o en las coordenadas de los sitios de muestreo que utilizaron (38%).

TABLA 2. Porcentajes de similitud para las variables continuas.

Categoría	Porcentaje de similitud (%)	Diferencia altitudinal (m)	Diferencia en temperatura (°C)	Diferencia en precipitación (mm)	Distancia entre la estación-sitio (km)	Distancia a los lagos (km)	Distancia al mar (km)
1	100	<100	<2	<50	<10	<10	<10
2	75	100-200	2-4	50-100	10-20	10-20	10-20
3	50	200-500	4-6	100-200	20-40	20-40	20-40
4	25	500-1000	6-8	200-500	40-80	40-80	40-80
5	10	1000-2000	8-10	500-1000	80-160	80-160	80-160
6	0	>2000	>10	>1000	>160	>160	>160

TABLA 3. Estudios dendroclimáticos utilizados en el presente trabajo.

Año de publicación	Título	Referencia
2003	Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico	(Cleaveland et al., 2003)
2005	Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: A 1681–2001 rain reconstruction	(González-Elizondo et al., 2005)
2005	Hydroclimatic variability of the upper Nazas basin: Water management implications for the irrigated area of the Comarca Lagunera, Mexico	(Villanueva-Díaz et al., 2005)
2007	Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico	(Villanueva-Díaz et al., 2007)
2009	The potential of tree rings for the study of forest succession in Southern Mexico	(Brienen et al., 2009)
2009	Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México	(Cerano-Paredes et al., 2009)
2009	Dendrocronología de <i>Pinus cembroides</i> Zucc. y reconstrucción de la precipitación estacional para el sureste de Coahuila	(Constante-García et al., 2009)
2009	Variabilidad hidroclimática histórica de la sierra de Zapalinamé y disponibilidad de recursos hídricos para Saltillo, Coahuila	(Villanueva-Díaz et al., 2009)
2010	Análisis de sequías y productividad con cronologías de <i>Pseudotsuga menziesii</i> Rob. & Fern., y su asociación con El Niño en el nordeste de México	(Arreola-Ortiz y Návar-Cháidez, 2010)
2011	El Niño Oscilacion del Sur y sus efectos en la precipitación en la parte alta de la cuenca del Río Nazas	(Cerano-Paredes et al., 2011)
2012	Precipitación reconstruida para la parte alta de la Cuenca de Río Nazas, Durango	(Cerano-Paredes et al., 2012)
2012	Variabilidad hidroclimática reconstruida con anillos de árboles para la cuenca Lerma Chapala en Guanajuato, México	(Villanueva-Díaz et al., 2012)
2013	Reconstrucción de precipitación invierno-primavera con anillos anuales de <i>Pinus douglasiana</i> en la reserva de la biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco	(Cerano-Paredes et al., 2013)
2013	Influencia de la evaporación en el crecimiento forestal	(Pompa-García et al., 2013)
2013	Variation in radial growth of <i>Pinus cooperi</i> in response to climatic signals across an elevational gradient	(Pompa-García et al., 2013)
2014	Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancitaro, Michoacán	(Cerano-Paredes et al., 2014)
2014	Características anatómicas de la madera de <i>Bursera lancifolia</i> (Schltdl.) Engl. con potencial dendrocronológico	(Durán-Guerra et al., 2014)
2014	Sensibilidad climática de tres versiones dendrocronológicas para una conífera mexicana	(Pompa-García et al., 2014)
2015	Response of tree radial growth to evaporation, as indicated by earlywood and latewood	(Chacón-de la Cruz y Pompa-García, 2015)
2015	Tree growth response to ENSO in Durango, Mexico	(Pompa-García et al., 2015)
2015	Reconstructing evaporation from pine tree rings in Northern Mexico	(Pompa-García y Camarero, 2015)
2015	Cuatro siglos de variabilidad hidroclimática en el noroeste de Chihuahua, México, reconstruida con anillos de árboles	(Villanueva-Díaz, Cerano-Paredes et al., 2015)
2015	Crecimiento radial anual del fresno (<i>Fraxinus udhei</i> (Wenz.) Lingelsh.) en dos parques de la Comarca Lagunera	(Villanueva-Díaz, Pérez-Evangelista et al., 2015)
2016	Climatic responses of <i>Pinus pseudostrobus</i> and <i>Abies religiosa</i> in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Central Mexico	(Carlón-Allende et al., 2016)
2016	Reconstrucción de la precipitación estacional con anillos de crecimiento para la región hidrológica Presidio-San Pedro	(Díaz-Ramírez et al., 2016)



TABLA 3. Estudios dendroclimáticos utilizados en el presente trabajo (continuación y final).

Año de publicación	Título	Referencia
2016	Sensitivity of pines in Mexico to temperature varies with age	(Pompa-García y Hadad, 2016)
2016	Temporal variation of wood density and carbon in two elevational sites of <i>Pinus cooperi</i> in relation to climate response in Northern Mexico	(Pompa-García y Venegas-González, 2016)
2017	Earlywood and latewood widths of <i>Picea chihuahuana</i> show contrasting sensitivity to seasonal climate	(Cabral-Alemán et al., 2017)
2017	Evaluación del potencial dendroclimático de <i>Pinus lumholtzii</i> B.L. Rob. & Fernald	(González-Elizondo et al., 2017)
2018	Climatic signal in earlywood and latewood in conifer forests in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico	(Carlón-Allende et al., 2018)
2018	Respuesta del crecimiento de <i>Pinus oocarpa</i> a variables climáticas en Chiapas, México	(López-Hernández et al., 2018)
2018	Reconstruction of historical precipitation (1877-2014) for the southwest of the Sierra Gorda Biosphere Reserve, Querétaro, Mexico	(Mendoza-Villa et al., 2018)
2018	Tree-ring research of Mexican beech (<i>Fagus grandifolia</i> subsp. <i>mexicana</i>) a relict tree endemic to eastern Mexico	(Rodríguez-Ramírez et al., 2018)
2018	Red dendrocronológica de pino triste (<i>Pinus lumholtzii</i> B.L. Rob. & Fernald) en la Sierra Madre Occidental para reconstrucción de lluvia estacional	(Villanueva-Díaz, González-Elizondo et al., 2018)
2018	Respuesta climática de <i>Pinus oocarpa</i> Schiede Ex Schetol en el Bosque La Primavera, Jalisco	(Villanueva-Díaz, Rubio-Camacho, et al., 2018)
2018	Comportamiento hidroclimático de coníferas en el Cerro Potosí, Nuevo León, México	(Villanueva Díaz, Vázquez-Selem et al., 2018)
2019	Influencia del clima en el crecimiento radial en cuatro especies de coníferas en la sierra de San Antonio Peña Nevada (Nuevo León, México)	(Gutiérrez-García y Ricker, 2019)
2020	The climatic response of baldcypress (<i>Taxodium mucronatum</i> Ten.) in San Luis Potosí, Mexico	(Villanueva-Díaz et al., 2020)

De los estudios con los que se trabajó, se registraron 46 especies pertenecientes a 16 familias, siendo Pinaceae la de mayor número de especies (17), seguida de Fabaceae con 10 especies (Tabla 4). De todas las especies registradas solo en cuatro se concentraron 33% de los estudios dendroclimáticos, siendo *Pseudotsuga menziesii* la especie más estudiada (15%, 11 estudios), seguida de *Pinus cooperi* con 10% (7 estudios), *Abies religiosa* (4%) y *Pinus cembroides* (4%) con 3 estudios cada una (Fig. 1).

En cuanto a la localización de los sitios de muestreo utilizados en los estudios dendroclimáticos, se observó una tendencia hacia el norte del país, siendo el estado de Durango el que presentó una mayor concentración de sitios, seguido del estado de Nuevo León. Para la parte sur

de México, solo se registraron dos sitios, uno en el estado de Oaxaca y otro en Chiapas (Fig. 2).

Similitud de condiciones

Como se observa en la figura 3, se obtuvieron porcentajes altos de diferencias en condiciones entre las estaciones meteorológicas y los sitios de muestreo utilizados en los estudios dendroclimáticos. De las variables categóricas (Fig. 3a), la que registró el menor porcentaje de similitud fue la subcuenca ya que en solo 10% de los estudios las estaciones meteorológicas y los sitios de muestreo se encuentran en la misma subcuenca (categoría 1), le siguen las topoformas con 18%, la orientación de la ladera con 25%, la cuenca con 41%, la subprovincia fisiográfica con 54% y el tipo de

TABLA 4. Especies utilizadas en los estudios dendroclimáticos en México.

Grupo	Familia	Especie
Gimnosperma	Cupressaceae	<i>Taxodium huegelii</i> C.Lawson
		<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. & Cham
		<i>Abies vejarii</i> Martínez
		<i>Picea chihuahuana</i> Martínez
		<i>Pinus cembroides</i> Zucc.
		<i>Pinus cooperi</i> C.E.Blanco
		<i>Pinus culminicola</i> Andresen & Beaman
		<i>Pinus douglasiana</i> Martínez
		<i>Pinus durangensis</i> Martínez
		<i>Pinus greggii</i> Engelm. ex Parl.
		<i>Pinus hartwegii</i> Lindl.
		<i>Pinus lumholtzii</i> B.L.Rob. & Fernald
		<i>Pinus montezumae</i> Lamb.
		<i>Pinus oocarpa</i> Schiede
		<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.
<i>Pinus strobiformis</i> Engelm.		
<i>Pinus teocote</i> Schied. ex Schltdl. & Cham.		
	<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco	
Angiosperma	Annonaceae	<i>Rollinia mucosa</i> (Jacq.) Baill.
	Apocynaceae	<i>Thevetia ahouai</i> (L.) A.DC.
	Bignoniaceae	<i>Tabebuia heterophylla</i> (DC.) Britton
		<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. ex DC.) Mattos
	Boraginaceae	<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken
	Burseraceae	<i>Bursera lancifolia</i> (Schltdl.) Engl
	Euphorbiaceae	<i>Euphorbia schlechtendalii</i> Boiss
		<i>Acacia cochliacantha</i> Willd.
		<i>Dalbergia brownei</i> (Jacq.) Urb.
		<i>Dialium guianense</i> (Aubl.) Sandwith
		<i>Lonchocarpus sericeus</i> (Poir.) DC.
		<i>Lonchocarpus emarginatus</i> Pittier
		<i>Lonchocarpus torresiorum</i> M. Sousa
		<i>Mimosa acantholoba</i> (Willd.) Poir.
		<i>Pterocarpus rohrii</i> Vahl
		<i>Schizolobium parahyba</i> (Vell.) S.F. Blake
	<i>Senna atomaria</i> (L.) H.S.Irwin & Barneby	
	Fagaceae	<i>Fagus grandifolia</i> subsp. <i>Mexicana</i> (Martínez) A.E. Murray
	Hypericaceae	<i>Vismia camparaguey</i> Sprague & L. Riley
	Malvaceae	<i>Ceiba aesculifolia</i> subsp. <i>Parvifolia</i> (Rose) P.E. Gibbs & Semir
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam		
Melastomataceae	<i>Miconia glaberrima</i> (Schltdl.) Naudin	
	<i>Miconia trinervia</i> (Sw.) D. Don ex Loudon	
Moraceae	<i>Castilla elastica</i> Cerv.	
	<i>Ficus maxima</i> Mill.	
Oleaceae	<i>Fraxinus uhdei</i> (Wenz.) Lingelsh	
Rutaceae	<i>Zanthoxylum caribaeum</i> Lam.	
	<i>Zanthoxylum riedelianum</i> subsp. <i>Kellermanii</i> (P. Wilson) Reynel ex C. Nelson	

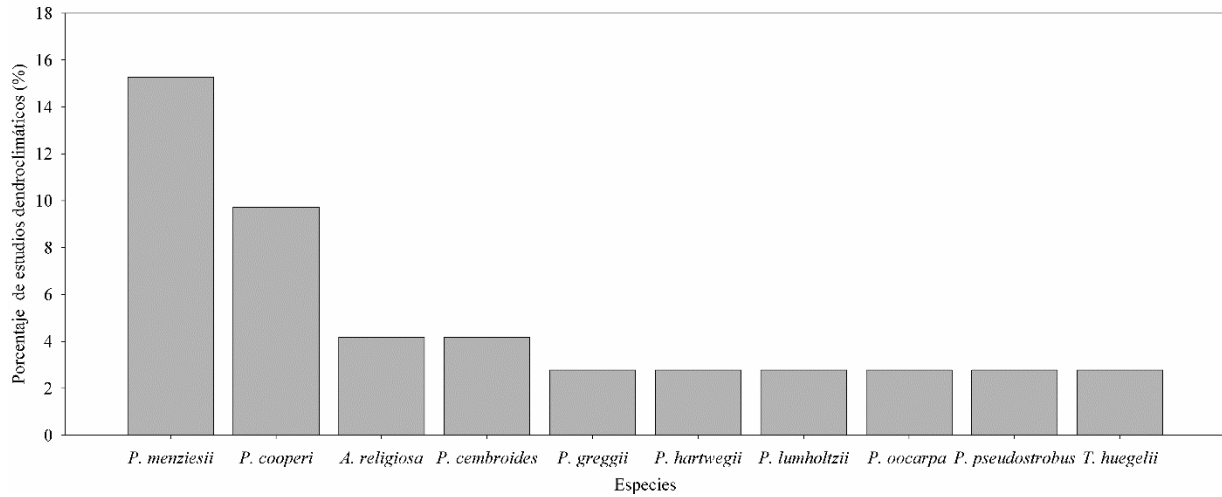


FIGURA 1. Porcentaje de estudios dendroclimáticos en México por especie. Se muestran solo las especies que fueron utilizadas en más de dos trabajos.

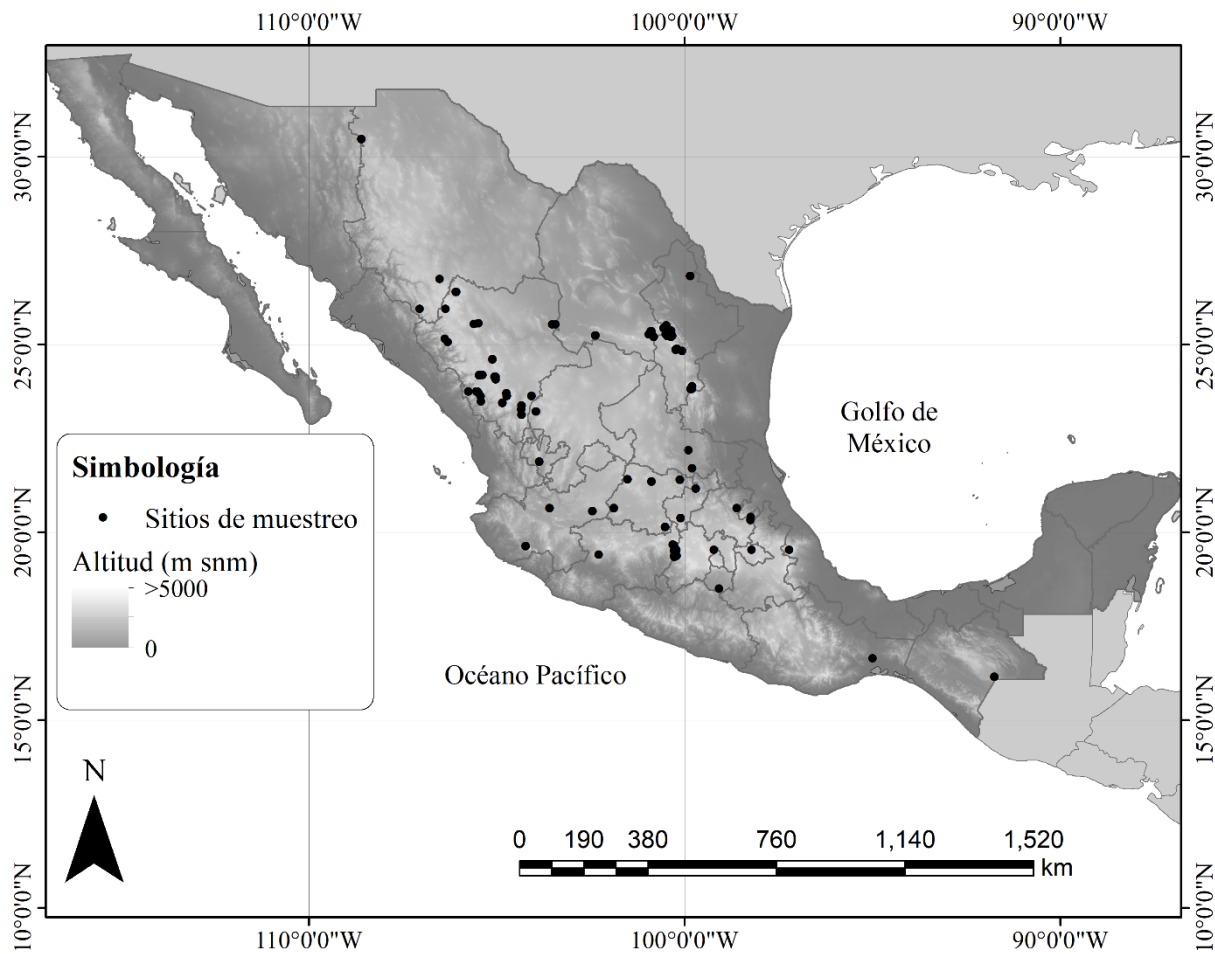


FIGURA 2. Localización de los sitios de muestreo de los estudios dendroclimáticos realizados en México analizados en el presente trabajo.

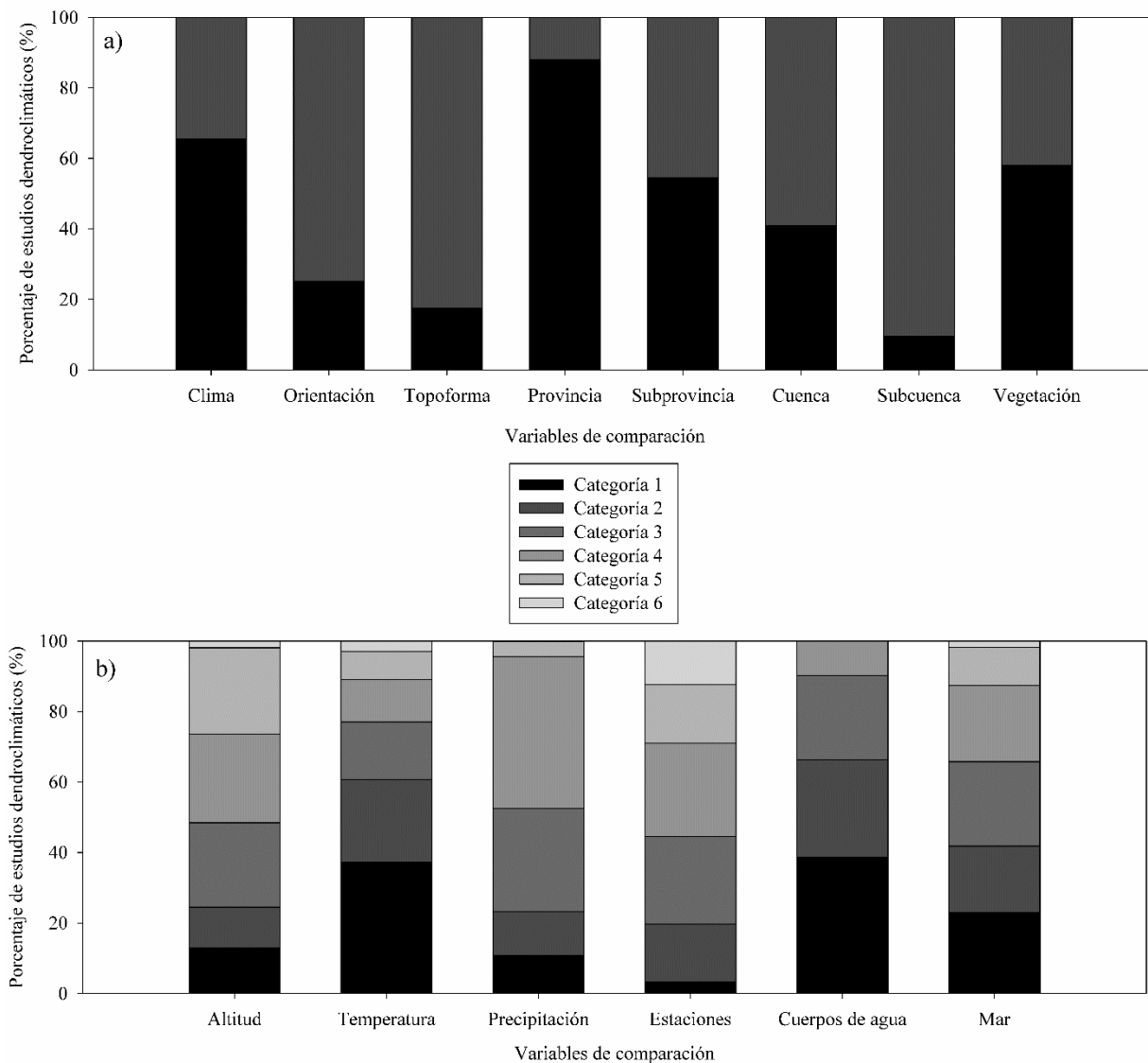


FIGURA 3. Porcentaje de estudios dendroclimáticos para cada categoría de las variables categóricas (a) y las variables continuas (b).

vegetación con 58%. Otras variables, como el tipo de clima o las provincias fisiográficas, presentaron mayores similitudes: 66% de los estudios presentan el mismo tipo de clima para las estaciones meteorológicas y para los sitios de muestreo y, para 88% de los estudios, las estaciones y los sitios de muestreo se encuentran en la misma provincia.

En cuanto a las variables continuas (Fig. 3b), solo 3% de los estudios presentaron distancias menores a 10 km entre las estaciones meteorológicas y los sitios de muestreo (categoría 1), y 16% presentaron diferencias de distancia entre 10 km y 20 km (categoría 2). Para distancia a los

cuerpos de agua (lagos) y al mar, solo 39% (cuerpos de agua) y 23% (mar) de los estudios presentaron distancias de menos de 10 km a los cuerpos de agua y al mar (categoría 1). Con respecto a las diferencias altitudinales entre las estaciones y los sitios de muestreo, 52% de los estudios presentan diferencias mayores a los 1000 m (categoría 4, 5, 6) y solo 13% presentaron diferencias altitudinales de menos de 100 m (categoría 1). En cuanto a temperatura, 37% de los estudios presentan diferencias de menos de 2 °C (categoría 1) y 24% de los estudios se registraron diferencias de temperatura entre 2 °C y 4 °C (categoría 2). Para



precipitación, 43% de los estudios presentaron diferencias entre 200 mm y 500 mm (categoría 4) entre las estaciones y los sitios de muestreo, y solo 11% de los estudios exhibieron diferencias en precipitación de menos de 50 mm (categoría 1).

Se observó que 46% de los estudios dendroclimáticos presentaron similitudes medias-bajas (25% - 50% de similitud) entre las estaciones meteorológicas y los sitios de muestreo que utilizaron; 41% presentaron categorías medias-altas (50% - 75% de similitud). Es importante señalar que solo 6% de los estudios dendroclimáticos presentaron una similitud de condiciones de más de 75% (categoría alta) y que el resto (7%) presentaron similitud de condiciones baja, es decir, de menos de 25% (Fig. 4).

DISCUSIÓN

Partiendo de la idea central de la hipótesis de correlación espacial ya expuesta, los sitios seleccionados para la obtención de muestras en los estudios dendroclimáticos deben de estar lo suficientemente cercanos de las estaciones meteorológicas para obtener reconstrucciones climáticas con menor incertidumbre (Chen et al., 2017; Wang et al., 2020; Yang et al., 2017). Pero esto no ocurre en la mayoría de los estudios que se han realizado en México; como se logra observar en el presente trabajo, pocos son los estudios

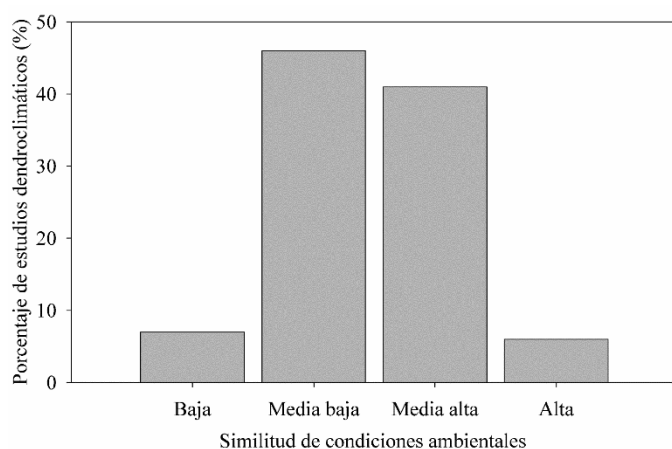


FIGURA 4. Porcentaje de estudios dendroclimáticos para cada categoría (baja, media baja, media alta, alta) del índice de similitud de condiciones ambientales calculado.

Dendroclimáticos que consideraron estaciones meteorológicas con una cercanía menor a 10 kilómetros (3%). Si bien se pueden detectar eventos climáticos regionales al utilizar estaciones meteorológicas lejanas, hay que tener en cuenta que los procesos locales también son importantes, por lo que faltaría realizar estudios dendroclimáticos, pero bajo una perspectiva local, para la información que se obtenga pueda ser aplicada en lugares específicos.

Existe un número considerable de estudios dendroclimáticos que ni siquiera mencionan las estaciones que ocuparon y por ende no se conoce la distancia a la que se encuentran las estaciones de donde se obtuvo la información climática (38% de los estudios). También se identificaron estudios en los que no se hizo uso de datos de estaciones meteorológicas directamente, ya que utilizaron técnicas de interpolación para realizar cartografía climática para después obtener la información climática de esos modelos (14% de los estudios). Lo anterior se registró para especies como *Abies concolor* utilizando insumos cartográficos a una resolución de aproximadamente 55 km de tamaño de pixel (Meko et al., 2013) y para *Pseudotsuga menziesii* utilizando cartografía con una resolución espacial de aproximadamente 277 km × 416 km (Díaz et al., 2002).

De acuerdo con el SMN, México cuenta con cerca de 5500 estaciones meteorológicas distribuidas en todo el país, de ellas, solo 188 son automatizadas (SMN, 2020). Considerando la superficie total de México, son pocas las estaciones meteorológicas con que se cuenta (Trejo et al., 2008) y se deberían invertir más recursos para robustecer la red. La cantidad actual de estaciones representa aproximadamente una por cada 35 623 ha, que es una proporción baja si se considera que el área representativa de cada estación es de aproximadamente 5 km de radio en terreno plano, es decir, 7850 ha (Inegi, 2020; SMN, 2020).

Una parte fundamental de la dendrocronología es la selección del área de estudio, ya que existen regiones en el espacio donde no es posible realizar estudios dendrocronológicos, ya sea porque las especies presentes en esos lugares no presentan anillos de crecimiento anuales (características propias de cada especie), porque no existe

gran variabilidad entre los anillos que permita diferenciarlos debido a los factores ambientales, o por el hecho de que no se cuenta con individuos arbóreos suficientes para poder realizar un estudio que sea estadísticamente sólido (Cook y Kairiukstis, 1989; Fritts, 1976).

De los estudios dendroclimáticos en México, 15% se han centrado en analizar a *Pseudotsuga menziesii*, un número alto de trabajos tomando en cuenta que México es considerado como uno de los centros de origen de otras especies coníferas, como es el caso del género *Pinus*, que cuenta con aproximadamente 40% de todas las especies de pino del mundo (Gernandt y Pérez-de la Rosa, 2014). La abundancia y variedad de especies de *Pinus* en México, y la capacidad de estas para formar anillos de crecimiento, ofrecen la oportunidad de ampliar los conocimientos acerca de su potencial dendroclimático; sería conveniente aprovechar esta condición y realizar más estudios en este sentido.

De acuerdo con los estudios revisados, se identificaron dos posibles respuestas de las especies a las condiciones climáticas, las cuales pueden ser aumentos o disminuciones en el crecimiento radial. En cuanto a los aumentos en el crecimiento, lo que se observa es que la precipitación de invierno-primavera o las bajas temperaturas favorecen el crecimiento en especies como *Abies religiosa* (Cerano-Paredes et al., 2014), *Pinus hartwegii* (Astudillo-Sánchez et al., 2017) o *Pinus cooperi* (Pompa-García y Camarero, 2015; Pompa-García y Hadad, 2016). Caso contrario son las disminuciones en el crecimiento radial debido a las altas temperaturas que es lo que se indica para especies como *Pinus pseudostrobus* (Marlès et al., 2015) o *Pinus cooperi* (Pompa-García y Camarero, 2015; Pompa-García y Hadad, 2016). Esto sucede pues las altas temperaturas provocan un aumento en la evaporación que tiende a reducir la disponibilidad de agua y, por ende, el crecimiento.

Como se mencionó anteriormente, muchos aspectos son esenciales en la selección de los sitios de muestreo, se logró identificar es que es recomendable seleccionar las áreas de óptimo crecimiento arbóreo (Cook y Kairiukstis, 1989). Se puede dar por hecho que las condiciones ideales de crecimiento para una especie corresponden a lugares donde existe un mayor número de individuos; por el

contrario, sitios con pocos individuos, en donde los árboles están bajo estrés, representan áreas poco idóneas (Pompa-García, Cerano-Paredes et al., 2013). Pero para saber cuáles son las condiciones ideales para las especies se deben de realizar estudios específicos, ya sea de germinación, de establecimiento, de sobrevivencia, de reproducción o de dispersión, por mencionar algunos.

Actualmente no se cuenta con la información de las condiciones óptimas para todas las especies, si bien hay varios estudios donde se consideran las condiciones óptimas de algunas, mucha de esa información se refiere a condiciones de invernadero, de vivero o de laboratorio y no precisamente a las condiciones de campo. Existen pocos estudios que consideran las condiciones óptimas de las especies arbóreas a partir de datos de campo y en muchos sitios de muestreo (Gómez Díaz et al., 2011; Gutiérrez y Trejo, 2014). De los estudios dendroclimáticos analizados, se logró observar que uno de los principales factores limitantes en el crecimiento arbóreo es la precipitación. Hay especies que, al existir periodos de poca lluvia, se encuentran bajo estrés hídrico y en consecuencia no crecen lo suficiente, esto fue lo observado para *Pinus hartwegii* (Astudillo-Sánchez et al., 2017) y *Pseudotsuga menziesii* (Castruita-Esparza et al., 2016). Sin embargo, para especies como *Pinus devoniana* la disminución en el crecimiento se presenta al aumentar los niveles de precipitación (Marlès et al., 2015).

En cuanto a la localización de los sitios de muestreo de los estudios dendroclimáticos, se observa una tendencia hacia el norte y centro de México, siendo más frecuentes en el norte, lo cual muestra que falta un mayor esfuerzo de muestreo al sur del país. Como se observó en el presente estudio, la mayoría de las especies con las que se ha trabajado son coníferas, a pesar de que estados al sur del país como Guerrero, Oaxaca y Chiapas, que hasta la fecha cuentan con pocos estudios, también presentan la existencia de diversas especies de coníferas con las que se podrían realizar estudios dendrocronológicos.

Los estudios dendrocronológicos que ocupen estaciones meteorológicas para reconstruir condiciones climáticas o para datar las edades de los árboles deberían



realizar comparaciones de condiciones entre las estaciones y sus sitios de muestreo para seleccionar estaciones de una forma mucho más atinada, por lo que la aplicación del índice propuesto sería conveniente si se considera que solo 6% de los estudios dendroclimáticos presentan una similitud de condiciones alta entre los sitios de muestreo y las estaciones meteorológicas empleadas (similitud de más del 75%). Además, el índice que se propone se basa en insumos cartográficos disponibles que pueden ser aplicados en cualquier SIG.

CONCLUSIONES

Son importantes todos los estudios dendroclimáticos que se han realizado en México en cuanto a la reconstrucción climática del pasado, y más si toman en cuenta todas las limitantes que se tienen, tales como la falta de información climática o el poco conocimiento sobre las especies. Para realizar estudios dendroclimáticos bajo una perspectiva local en lugares que no cuentan con registros dendrocronológicos es necesario tener un mayor número de estaciones meteorológicas, sobre todo si se considera que México es un país que presenta una gran diversidad climática. También es fundamental tener un mayor conocimiento sobre el potencial de las especies para formar anillos de crecimiento, así como información sobre sus condiciones óptimas.

Realizar una comparación de condiciones entre las estaciones meteorológicas y los sitios de muestreo es algo primordial que se debería aplicar en todos los estudios dendrocronológicos que llegasen a utilizar la información climática para datar los anillos de crecimiento. Esta comparación se podría realizar con índices de similitud de condiciones como el que se propone en este estudio.

RECONOCIMIENTOS

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca escolar para sus estudios de doctorado. Esta investigación formó parte del proyecto PAPIIT (IN302721).

REFERENCIAS

- Arreola-Ortiz, M., & Nívar-Cháidez, J. (2010). Análisis de sequías y productividad con cronologías de *Pseudotsuga menziesii* Rob. & Fern., y su asociación con El Niño en el nordeste de México. *Investigaciones geográficas*, 71, 7-20.
- Astudillo-Sánchez, C., Villanueva-Díaz, J., Endara-Agramont, A., Nava-Bernal, G., & Gómez-Albores, M. (2017). Climatic variability at the treeline of Monte Tlaloc, Mexico: a dendrochronological approach. *Trees*, 31(2), 441-453. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1460-z>
- Beniston, M. (2002). Climate modeling at various spatial and temporal scales: where can dendrochronology help?. *Dendrochronologia*, 20(1-2), 117-131. <https://doi.org/10.1078/1125-7865-00012>
- Bickford, I., Fulé, P., & Kolb, T. E. (2011). Growth sensitivity to drought of co-occurring *Pinus* spp. Along an elevation gradient in northern Mexico. *Western North American Naturalist*, 71(3), 338-348. <https://doi.org/10.3398/064.071.0302>
- Brienen, R., Lebrija-Trejos, E., Van Breugel, M., Pérez-García, E., Bongers, F., Meave, J., & Martínez-Ramos, M. (2009). The potential of tree rings for the study of forest succession in southern Mexico. *Biotropica*, 41(2), 186-195. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2008.00462.x>
- Cabral-Alemán, C., Pompa-García, M., Acosta-Hernández, A., Zúñiga-Vásquez, J., & Camarero, J. (2017). Earlywood and latewood widths of *Picea chihuahuana* show contrasting sensitivity to seasonal climate. *Forests*, 8(5), 173. <https://doi.org/10.3390/f8050173>
- Carlón-Allende, T., Mendoza, M., Pérez-Salicrup, D., Villanueva-Díaz, J., & Lara, A. (2016). Climatic responses of *Pinus pseudostrobus* and *Abies religiosa* in the monarch butterfly biosphere reserve, central Mexico. *Dendrochronologia*, 38, 103-116. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2016.04.002>
- Carlón-Allende, T., Villanueva-Díaz, J., Mendoza, M., & Pérez-Salicrup, D. R. (2018). Climatic signal in earlywood and latewood in conifer forests in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico. *Tree-Ring Research*, 74(1), 63-75. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-74.1.63>
- Castruita-Esparza, L., Correa-Díaz, A., Gómez-Guerrero, A., Villanueva-Díaz, J., Ramírez-Guzmán, M., Velázquez-Martínez, A., & Ángeles-Pérez, G. (2016). Basal area increment series of dominant trees of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco show periodicity according to global climate patterns. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(3), 379-397. <http://10.5154/r.rchscfa.2015.10.048>

- Cerano-Paredes, J., Méndez-González, J., Amaro-Sánchez, A., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., & Rubio-Camacho, E. (2013). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera con anillos anuales de *Pinus douglasiana* en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(3), 413-423. <http://10.5154/r.rchscfa.2013.02.007>
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., Vázquez-Selem, L., Cacicano, R., & Guerra de la Cruz, V. (2014). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancitaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas*, 83, 41-54. <https://doi.org/10.14350/rig.35190>
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Fulé, P., Arreola-Ávila, J., Sánchez-Cohen, I., & Valdez-Cepeda, R. (2009). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 15(2), 27-44. <https://doi.org/10.21829/myb.2009.1521189>
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez-Cepeda, R., Arreola-Ávila, J., & Constante-García, V. (2011). El Niño Oscilación del Sur y sus efectos en la precipitación en la parte alta de la cuenca del río Nazas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(Esp), 207-215. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.09.076>
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez-Cepeda, R., Constante-García, V., González-Barrios, J., & Estrada-Ávalos, J. (2012). Precipitación reconstruida para la parte alta de la Cuenca de Río Nazas, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(10), 07-23. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i10.525>
- Cleaveland, M., Stahle, D., Therrell, M., Villanueva-Díaz, J., & Burns, B. T. (2003). Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico. *Climatic Change*, 59(3), 369-388. <https://doi.org/10.1023/A:1024835630188>
- Constante-García, V., Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Cornejo Oviedo, E., & Valencia Manzo, S. (2009). Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. Y reconstrucción de precipitación estacional para el Sureste de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 34(106), 17-39.
- Cook, E., & Kairiukstis, L. (1989). *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*. Springer Science & Business Media.
- Chacón-de la Cruz, J., & Pompa-García, M. (2015). Response of tree radial growth to evaporation, as indicated by earlywood and latewood. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 21(1), 57-65. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.10.050>
- Chen, L., Wang, T., & Zhu, H. (2017). Subpixel Mapping Algorithms Based on Block Structural Self-Similarity Learning. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 5254024 <https://doi.org/10.1155/2017/5254024>
- Díaz-Ramírez, B., Villanueva-Díaz, J., & Cerano-Paredes, J. (2016). Reconstrucción de la precipitación estacional con anillos de crecimiento para la región hidrológica Presidio-San Pedro. *Madera y Bosques*, 22(1), 111-123. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.221480>
- Díaz, S., Therrell, M., Stahle, D., & Cleaveland, M. K. (2002). Chihuahua (Mexico) winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647–1992. *Climate Research*, 22(3), 237-244. <http://dx.doi.org/10.3354/cr022237>
- Durán-Guerra, O., Quintanar-Isaías, A., Villanueva-Díaz, J., Jaramillo-Pérez, A., & Cerano-Paredes, J. (2014). Características anatómicas de la madera de *Bursera lancifolia* (Schltdl.) Engl. Con potencial dendrocronológico. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(26), 76-89. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v5i26.291>
- Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (2021). *Atlas climático digital de México*. UNAM. <https://uniatmos.atmosfera.unam.mx/>
- Fritts, H. (1971). Dendroclimatology and dendroecology. *Quaternary Research*, 1(4), 419-449. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(71\)90057-3](https://doi.org/10.1016/0033-5894(71)90057-3)
- Fritts, H. (1976). *Tree rings and climate* (1a ed.). Elsevier.
- Gernandt, D., & Pérez-de la Rosa, J. A. (2014). Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 126-133. <https://doi.org/10.7550/rmb.32195>
- Gómez Díaz, J. D., Monterroso Rivas, A. I., Tinoco Rueda, J. A., Toledo Medrano, M., Conde Álvarez, C., & Gay García, C. (2011). Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in México. *Atmósfera*, 24(1), 31-52.
- González-Elizondo, M., González-Elizondo, M. S., Villanueva-Díaz, J., & Cerano-Paredes, J. (2017). Evaluación del potencial dendroclimático de *Pinus lumboltzii* BL Rob. & Fernald. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(42), 28-54. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i42.18>
- González-Elizondo, M., Jurado, E., Nívar, J., González-Elizondo, M. S., Villanueva, J., Aguirre, O., & Jiménez, J. (2005). Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: a 1681–2001 rain reconstruction. *Forest Ecology and Management*, 213(1-3), 39-53. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.012>
- Gutiérrez-García, G., & Ricker, M. (2019). Influencia del clima en el crecimiento radial en cuatro especies de coníferas en la sierra de San Antonio Peña Nevada (Nuevo León, México).



- Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90, e902676. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2676>
- Gutiérrez, E., & Trejo, I. (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(1), 179-188. <http://dx.doi.org/10.7550/rmb.37737>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi]. (1992). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del suelo y vegetación*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825007020>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi]. (2000). *Mapa Raster de Climas*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825292775>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi]. (2001a). *Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos, provincias fisiográficas*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi]. (2001b). *Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos, sistema topoformas*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267582>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi]. (2001c). *Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos, subprovincias fisiográficas*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267599>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi]. (2006). *Red hidrográfica digital de México*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463598428>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi]. (2009). *Cuerpos de Agua*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463598435>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi]. (2013). *Continuo de Elevaciones Mexicano*. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi]. (2019). *Marco Geoestadístico*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463776079>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi]. (2020). *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática*. <https://www.inegi.org.mx/default.html>
- López-Hernández, M., Cerano-Paredes, J., Valencia-Manzo, S., Cornejo-Oviedo, E., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., & Esquivel-Arriaga, G. (2018). Respuesta del crecimiento de *Pinus oocarpa* a variables climáticas en Chiapas, México. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1580-1596. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v66i4.32663>
- Marlès, J., Valor, T., López, B., Pérez-Salicip, D., Maneja, R., Sánchez, S., & Boada, M. (2015). Análisis dendroclimático de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus devoniana* en los municipios de Áporo y Zitácuaro (Michoacán), Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca. *Investigaciones Geográficas*, 88, 19-32. <http://dx.doi.org/10.14350/rig.43338>
- Meko, D., Touchan, R., Villanueva-Díaz, J., Griffin, D., Woodhouse, C., Castro, C., Carillo, C., & Leavitt, S. (2013). Sierra San Pedro Mártir, Baja California, cool-season precipitation reconstructed from earlywood width of *Abies concolor* tree rings. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118(4), 1660-1673. <https://doi.org/10.1002/2013JG002408>
- Mendoza-Villa, O., Cambrón-Sandoval, V., Cerano-Paredes, J., Cervantes-Martínez, R., & Soto-Correa, J. (2018). Reconstruction of historical precipitation (1877-2014) for the southwest of the Sierra Gorda Biosphere Reserve, Querétaro, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales*, 24(3), 371-386. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.01.008>
- Morrone, J. (2017). *Neotropical Biogeography: Regionalization and Evolution* (1a ed.). CRC Press.
- Pompa-García, M., & Camarero, J. J. (2015). Reconstructing evaporation from pine tree rings in northern Mexico. *Tree-Ring Research*, 71(2), 95-105. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-71.2.95>
- Pompa-García, M., Cerano-Paredes, J., & Fulé, P. (2013). Variation in radial growth of *Pinus cooperi* in response to climatic signals across an elevational gradient. *Dendrochronologia*, 31(3), 198-204. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2013.05.003>
- Pompa-García, M., Dávalos-Sotelo, R., Rodríguez-Téllez, E., Aguirre-Calderón, O., & Treviño-Garza, E. J. (2014). Sensibilidad climática de tres versiones dendrocronológicas para una conífera mexicana. *Madera y Bosques*, 20(3), 139-151. <https://doi.org/10.21829/myb.2014.203158>
- Pompa-García, M., & Hadad, M. (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., & Jurado, E. (2014). Seasonal precipitation reconstruction and teleconnections with ENSO based on tree ring analysis of *Pinus cooperi*. *Theoretical and applied climatology*, 117, 495-500. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1018-6>

- Pompa-García, M., Miranda-Aragón, L., & Aguirre-Salado, C. A. (2015). Tree growth response to ENSO in Durango, Mexico. *International Journal of Biometeorology*, *59*, 89-97. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0828-2>
- Pompa-García, M., Rodríguez-Flores, F. J., Aguirre-Salado, C., & Miranda-Aragón, L. (2013). Influencia de la evaporación en el crecimiento forestal. *Agrociencia*, *47*(8), 829-836.
- Pompa-García, M., & Venegas-González, A. (2016). Temporal variation of wood density and carbon in two elevational sites of *Pinus cooperi* in relation to climate response in northern Mexico. *PLoS One*, *11*(6), e0156782. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156782>
- Raven, P., Evert, R., & Eichhorn, S. E. (2005). *Biology of plants*. Macmillan.
- Ricker, M., & Hernández, H. M. (2010). Tree and tree-like species of Mexico: gymnosperms, monocotyledons, and tree ferns. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *81*(1), 27-38.
- Rodríguez-Ramírez, E., Luna-Vega, I., & Rozas, V. (2018). Tree-ring research of Mexican beech (*Fagus grandifolia* subsp. *mexicana*) a relict tree endemic to eastern Mexico. *Tree-Ring Research*, *74*(1), 94-107. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-74.1.94>
- Schweingruber, F. (1993). *Trees and wood in dendrochronology: morphological, anatomical, and tree-ring analytical characteristics of trees frequently used in dendrochronology*. Springer Science & Business Media.
- Servicio Meteorológico Nacional [SMN] (2020). <https://smn.conagua.gob.mx/es/>
- Therrell, M., Stahle, D., Cleaveland, M., & Villanueva-Díaz, J. (2002). Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *107*(D14), ACL 6-1-ACL 6-8. <https://doi.org/10.1029/2001JD000851>
- Trejo, D., Maldonado, H., Tchikoué, H., & Pérez, J. (2008). Factores que inciden en la siniestralidad de los incendios forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *33*(104), 37-58.
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Constante García, V., Fulé, P., & Cornejo Oviedo, E. (2009). Variabilidad hidroclimática histórica de la sierra de Zapalinamé y disponibilidad de recursos hídricos para Saltillo, Coahuila. *Madera y Bosques*, *15*(3), 45-64. <https://doi.org/10.21829/myb.2009.1531185>
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Estrada-Ávalos, J., Constante-García, V., & Cortés-Barrera, E. (2012). Variabilidad hidroclimática reconstruida con anillos de árboles para la cuenca Lerma Chapala en Guanajuato, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *3*(4), 05-26.
- Villanueva-Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Fulé, P., Cortés-Montaña, C., Vázquez-Selem, L., Yocom, L., & Ruiz-Corral, J. (2015). Cuatro siglos de variabilidad hidroclimática en el noroeste de Chihuahua, México, reconstruida con anillos de árboles. *Investigaciones geográficas*, *87*, 141-153. <http://dx.doi.org/10.14350/ig.44485>
- Villanueva-Díaz, J., González-Elizondo, M., Cerano-Paredes, J., Estrada-Ávalos, J., Martínez Sifuentes, A., & Rosales-Mata, S. (2018). Red dendrocronológica de pino triste (*Pinus lamboltzii* BL Rob. & Fernald) en la Sierra Madre Occidental para reconstrucción de lluvia estacional. *Madera y Bosques*, *24*(2), 1-14. <http://dx.doi.org/10.21829/myb.2018.2421530>
- Villanueva-Díaz, J., Luckman, B., Stahle, D., Therrell, M., Cleaveland, M., Cerano-Paredes, J., Gutierrez-Garcia, G., Estrada-Avalos, J., & Jasso-Ibarra, R. (2005). Hydroclimatic variability of the upper Nazas basin: Water management implications for the irrigated area of the Comarca Lagunera, Mexico. *Dendrochronologia*, *22*(3), 215-223. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2005.04.005>
- Villanueva-Díaz, J., Pérez-Evangelista, E., Beramendi-Orozco, L., & Cerano-Paredes, J. (2015). Crecimiento radial anual del Fresno (*Fraxinus udbei* (Wenz.) Lingelsh.) en dos parques de la Comarca Lagunera. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *6*(31), 40-57. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i31.194>
- Villanueva-Díaz, J., Rubio-Camacho, E., Chávez-Durán, Á., Zavala-Aguirre, J., Cerano-Paredes, J., & Martínez-Sifuentes, A. (2018). Respuesta climática de *Pinus oocarpa* Schiede Ex Schetol en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Madera y Bosques*, *24*(1), e2411464. <http://dx.doi.org/10.21829/myb.2018.2411464>
- Villanueva-Díaz, J., Stahle, D., Luckman, B., Cerano-Paredes, J., Therrell, M., Cleaveland, M., & Cornejo-Oviedo, E. (2007). Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change*, *83*, 117-131. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9144-0>
- Villanueva-Díaz, J., Stahle, D., Therrell, M., Beramendi-Orosco, L., Estrada-Ávalos, J., Martínez-Sifuentes, A., Astudillo-Sánchez, C., Rosalinda Cervantes-Martínez, R., & Cerano-Paredes, J. (2020). The climatic response of baldcypress (*Taxodium mucronatum* Ten.) in San Luis Potosi, Mexico. *Trees*, *34*, 623-635. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01944-0>
- Villanueva-Díaz, J., Vázquez-Selem, L., Estrada-Ávalos, J., Martínez-Sifuentes, A., Cerano-Paredes, J., Canizales-Velázquez, P., Franco-Ramos, O., & Reyes-Camarillo, F. (2018). Comportamiento hidroclimático de coníferas en el Cerro Potosí, Nuevo León, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *9*(49), 165-186. <http://dx.doi.org/10.29298/rmcf.v9i49.128>
- Wang, Q., Zhang, C., & Atkinson, P. (2020). Sub-pixel mapping with point constraints. *Remote Sensing of Environment*, *244*, 111817. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111817>



Yang, D., Xu, C., Wang, J., & Zhao, Y. (2017). Spatiotemporal epidemic characteristics and risk factor analysis of malaria in Yunnan Province, China. *BMC Public Health*, 17(1), 66. <https://doi.org/10.1186/s12889-016-3994-9>

Este documento se debe citar como:

Gutiérrez, E., Trejo, I., Bucio, C., Luna, J., Miguel, A., Ramírez, M., & Vázquez, M. (2022). Estaciones meteorológicas y estudios dendroclimáticos en México: ¿Cuál estación elegir? *Madera y Bosques*, 28(2), e2822450. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2822450>

Manuscrito recibido el 03 de diciembre de 2021

Aceptado el 28 de junio de 2022

Publicado el 08 de diciembre de 2022



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.