

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



DISTRIBUCIÓN ACTUAL Y POTENCIAL DE *Taxodium mucronatum* Ten. BAJO  
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

**Tesis**

Que presenta GUADALUPE PONCE MARTÍNEZ

Como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila

Diciembre 2019

DISTRIBUCIÓN ACTUAL Y POTENCIAL DE *Taxodium mucronatum* Ten, BAJO  
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

**Tesis**

Elaborada por **GUADALUPE PONCE MARTÍNEZ** como requisito parcial para  
obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA DE  
SISTEMAS DE PRODUCCIÓN** con la supervisión y aprobación del Comité de  
Asesoría




Dr. Jorge Méndez González  
Asesor Principal



---

M. C. Librado Sosa Díaz  
Asesor



---

Dr. Alejandro Zermeño González  
Asesor



---

Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente  
Subdirector de Postgrado  
UAAAN

## AGRADECIMIENTOS

*A mis maestros*

*Quienes con pasión y dedicación impartieron su cátedra compartiendo tan valioso conocimiento.*

*A mi institución*

*Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro,  
porque una vez más abrió sus puertas para permitirme  
continuar con mi formación profesional y aprovechar  
lo mejor de ella.*

*A mi asesor de tesis*

*Dr. Jorge Méndez González, por su apoyo,  
tiempo, conocimientos y la confianza que  
me otorgo para concluir este proyecto.*

*A mis compañeros y amigos, por su apoyo, confianza y amistad incondicional.*

## DEDICATORIA

*A la memoria de quienes depositaron la confianza que todo ser humano desea recibir de sus allegados, pero que ya no pudieron ver este logro.*

*A mi familia, en especial a una mujer que me ha enseñado que rendirse jamás será una opción: mi hermana **Nancy** a quien espero la vida le recompense con creces todo lo que merece.*

*A quien jamás puso en tela de juicio mi capacidad para culminar esta meta **Alejandro Leija**, por tu motivación, compañerismo, consejos, respeto, cariño y admiración que has depositado en mi persona, gracias, porque sin ti esto no habría sido posible.*

## Índice General

AGRADECIMIENTOS .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
Índice General .....	v
Índice de Cuadros.....	vi
Índice de Figuras .....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT .....	x
INTRODUCCIÓN .....	1
REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
El ahuehuate en México .....	3
Problemática del ahuehuate.....	4
Cambio climático.....	4
Modelos de circulación acoplados océano-atmósfera .....	5
Escenarios de cambio climático .....	6
Distribución de especies .....	7
Modelos de distribución de especies .....	8
Diagrama de BAM .....	8
Evaluación de modelos de distribución.....	9
MATERIALES Y MÉTODOS .....	11
Área de estudio.....	11
Obtención registros y variables bioclimáticas .....	11
Áreas de calibración y selección de variables .....	11
Calibración, creación y transferencia del modelo .....	12
Modelos de idoneidad actual y futura .....	12
RESULTADOS.....	13
DISCUSIÓN .....	21
CONCLUSIONES .....	24
REFERENCIAS .....	25

## Lista de Cuadros

<b>Cuadro 1.</b> Estadísticas generales de los modelos candidatos de <i>Taxodium mucronatum</i> Ten.....	14
<b>Cuadro 2.</b> Áreas de distribución potencial y efectiva de <i>Taxodium mucronatum</i> Ten. y promedio de incremento de temperatura, en tres Modelos de Circulación General (MCG's) y dos trayectorias representativas de concentración (RCP's) 4.5 y 8.5.....	19
<b>Cuadro 3.</b> Contribución de variables acorde al análisis de componentes principales y perfil bioclimático de <i>Taxodium mucronatum</i> Ten. obtenido con tres Modelos de Circulación General (MCG's) y dos trayectorias representativas de concentración (RCP's) 4.5 y 8.5.....	20

## Lista de Figuras

- Figura 1.** (A) Modelo de nicho realizado de *Taxodium mucronatum* Ten., construido con análisis de componentes principales, 15 variables bioclimáticas y 1 267 registros, con elipsoide al 99 %. (B) Modelo de nicho realizado, construido con tres variables bioclimáticas y 1 267 registros con elipsoide al 95 %.....13
- Figura 2.** Áreas de idoneidad actual de *Taxodium mucronatum* Ten. estratificadas en tres niveles (alto, medio y bajo), en tres enfoques de modelación: con clamping (A), extrapolación (B), sin extrapolación c) y coeficiente de variación de modelación con clamping (D). .....15
- Figura 3.** Superficie de idoneidad actual por entidad federativa y estratificada (baja, media y alta) de *Taxodium mucronatum* Ten. ....15
- Figura 4.** Histograma de frecuencia de tres variables ambientales de mayor contribución Bio 6 (A - C), Bio 4 (D - F) y Bio 16 (G - I), elaborado con 1 267 registros de *Taxodium mucronatum* Ten. en el periodo actual (barras) y en tres Modelos de Circulación General (MCG's) (líneas) en dos trayectorias de concentración (RCP's) 4.5 y 8.5 al 2050.....16
- Figura 5.** Idoneidad de *Taxodium mucronatum* Ten. (A - F) y paridad orientada a la movilidad (MOP) (G - L) para el año 2050 en tres Modelos de Circulación General (MCG's): CCSM4 (arriba), HadGEM2\_AO (media) y MIROC5 (abajo), en dos trayectorias de concentración representativas (RCP's) 4.5 y 8.5. ....17
- Figura 6.** Áreas de distribución potencial y efectiva de *Taxodium mucronatum* Ten. para el año 2050 en los Modelos de Circulación General: CCSM4 (A - D), HadGEM2\_AO (E - H) y MIROC5 (I - L), en dos trayectorias de concentración representativas (RCP's) 4.5 y 8.5. ...17
- Figura 7.** Distribución altitudinal actual y futura en áreas efectivas de *Taxodium mucronatum* Ten. en tres Modelos de Circulación General (MCG's) y dos trayectorias representativas de concentración (RCP's) 4.5 y 8.5. ....19

## RESUMEN

DISTRIBUCIÓN ACTUAL Y POTENCIAL DE *Taxodium mucronatum* Ten. BAJO  
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Por

GUADALUPE PONCE MARTÍNEZ

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERIA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. JORGE MÉNDEZ GONZÁLEZ-ASESOR-

SALTILLO, COAHUILA

DICIEMBRE 2019



Los cambios registrados en el clima durante las últimas décadas están afectando la distribución y dinámica poblacional de las especies a una escala global. Los modelos climáticos han evolucionado notablemente y han permitido predecir la evolución del cambio climático y la distribución actual y futura de las especies. El objetivo de este estudio fue evaluar posibles cambios actuales y futuros en la distribución geográfica de *Taxodium mucronatum* Ten., bajo los escenarios “vías de concentración representativa” (RCP’s) 4.5 y 8.5 y en tres Modelos de Circulación General (MCG’s) para el año 2050. La calibración, selección, evaluación y transferencia del modelo de idoneidad, fueron llevados a cabo en kuenm, un paquete de R que usa como algoritmo de modelación a Maxent. Los tres MCG’s examinados mostraron un buen ajuste; ROC parcial de 0.0 y tasa de omisión de 0.264 %, pero predicciones de idoneidad contrastantes. En México, se predicen pérdidas de áreas de idoneidad para *T. mucronatum* de 100 y 165 mil km<sup>2</sup> en los RCP’s 4.5 y 8.5 al 2050 y un incremento de 0.11 y 0.02 °C respectivamente en las nuevas áreas de idoneidad de la especie. No existen una tendencia clara de migración latitudinal ni altitudinal de esta especie.

Las variables bioclimáticas que mejor explicaron la distribución de *T. mucronatum* fueron: temperatura mínima del mes más frío (39.1 %), estacionalidad de temperatura (33.5 %) y precipitación del trimestre más húmedo (13.9 %). Los resultados muestran pérdidas de más del 50 % de áreas idóneas (más de 100 mil km<sup>2</sup> en ambos RCP’s) en comparación a la ganancia de nuevas áreas aptas (5 mil km<sup>2</sup> aproximadamente).

**Palabras clave:** Ahuehuete, biogeografía, calentamiento global, kuenm, nichos.

**ABSTRACT**

ACTUAL AND POTENTIAL DISTRIBUTION OF *Taxodium mucronatum* Ten.  
UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS

BY

GUADALUPE PONCE MARTÍNEZ  
MASTER OF SCIENCE PRODUCTION SYSTEMS ENGINEERING

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DR. JORGE MÉNDEZ GONZÁLEZ-ADVISOR-

SALTILLO, COAHUILA

DECEMBER 2019

Changes in climate registered during the last decades are affecting the distribution and population dynamics of plant species at a global scale. Climate models have evolved considerably and have made it possible to predict the evolution of climate change and actual and future species distribution. The objective of this study was evaluate possible actual and future changes in the geographic distribution of *Taxodium mucronatum* Ten., under the Representative Concentration Pathways (RCP) scenarios 4.5 and 8.5 in three General Circulation Models (MCG's) by 2050. Calibration, selection, evaluation and transfer of the suitability model, were carried out in kuenm, an R package that uses Maxent as the modeling algorithm. The three GCM's examined showed a good fit; partial ROC of 0.0 and omission rate of 0.264 %, but contrasting predictions of suitability. In Mexico, loss of suitability area for *T. mucronatum* of 100 and 165 thousand km<sup>2</sup> are predicted at RCP's 4.5 and 8.5 by 2050, with an increase of 0.11 and 0.02 °C respectively in the new areas of suitability of the species. There is not a clear a latitudinal and altitudinal shift of this specie. The bioclimatic variables that best explained the distribution of *T. mucronatum* were: minimum temperature of the coldest month (39.1 %), seasonality of temperature (33.5 %) and precipitation of the wettest quarter (13.9 %). The results show losses of more than 50 % of suitable areas (more than 100 thousand km<sup>2</sup> in both RCP's) compared to the gain of new suitable areas (approximately 5 thousand km<sup>2</sup>).

**Key words:** Ahuehuete, biogeography, global warming, kuenm, niches.

## INTRODUCCIÓN

El calentamiento global se está acelerando, la temperatura podría superar los 1.5 °C antes del 2030 (Allen *et al.*, 2018) debido a tres tendencias: i) al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero; para el 2017 se reportaron 37 Gton de CO<sub>2</sub> (Le Quéré *et al.*, 2018), es decir que los próximos 25 años podría calentarse de 0.25 - 0.32 °C por década (Smith *et al.*, 2018), ii) aceleración en la disminución de la contaminación del aire; Karplus *et al.*, (2018) reportan que China redujo las emisiones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) de sus centrales eléctricas entre un 7 y 14 % entre 2014 y 2016, por lo que se está perdiendo el escudo de aerosoles que ha mantenido el planeta más frío, 0.7 °C (Salzmann, 2016), iii) hay indicios de que el Océano Pacífico parece estarse calentando de acuerdo con un ciclo climático natural lento conocido como la Oscilación Interdecadal del Pacífico (Henley y King, 2017).

Los efectos del cambio climático sobre los seres vivos se clasifican en cuatro categorías: fisiológicos, distribución geográfica, fenológicos y adaptación, lo que se supone que muchas especies podrían modificar su distribución y las endémicas incrementar su riesgo de extinción (Hughes, 2000), de aquí la necesidad de profundizar en la ecología distribucional de las especies.

Uno de los patrimonios más importantes de un país se centra en sus recursos naturales y México posee una de las diversidades biológicas más importantes del planeta (Rzedowski, 1978; Lot *et al.*, 1998). Aunado al cambio climático, la destrucción de ecosistemas con especímenes centenarios, afecta la estabilidad ecológica que se ha construido a través de los siglos (Villanueva *et al.*, 2010). Un digno ejemplar de longevidad (hasta de 1600 años) es el ahuehuete, *Taxodium mucronatum* Ten. (Stahle *et al.*, 2000; Villanueva *et al.*, 2005) nativo de México, considerado el Árbol Nacional desde 1921 por su esplendor, belleza y dimensiones colosales, asumiendo fuerte vinculación cultural con el país (Martínez, 2009). Los mexicanos lo llamaron ahuehuete (del Náhuatl “Atl”, agua y “Huehue”, viejo) por lo que su nombre significa “Viejo del Agua” (Luque, 1921). Existen ahuehuetes históricos (Carranza, 1992) tales como el “Árbol de la Noche Triste” en Tacuba en el estado de México (Martínez, 1999), el “Árbol Sagrado” en el estado de México (Vargas, 1997) y el “Árbol del Tule” en Oaxaca (Debreczy y Rácz, 1997).

*T. mucronatum*, al ser una especie no maderable, ha sido estudiada principalmente por su potencial dendrocronológico (Villanueva *et al.*, 2006; Stahle *et al.*, 2011; Correa *et*

*al.*, 2014), por su sensibilidad al ataque de plagas (Kobayashi. 1980), por su importancia en ecosistemas riparios (Suzán *et al.*, 2007), por su similitud con registros fósiles de hojas descubiertas en otros países (Vickulin *et al.*, 2003), por su viabilidad y comportamiento germinativo de las semillas (Enríquez *et al.*, 2004) y por sus propiedades medicinales en numerosas enfermedades, incluidas la artritis y el cáncer (Zhang *et al.*, 2005). No se encuentra entre las especies consideradas en riesgo en la NOM-059-SEMARNAT-2010, sin embargo, se han establecido Áreas Naturales Protegidas, para su conservación (CONANP, 2016).

En la categoría de distribución geográfica, una herramienta muy empleada es la generación de modelos para predecir la distribución potencial de las especies a través de los modelos de nicho ecológico (Peterson, 2001). La distribución de una especie, depende de muchos factores, el diagrama BAM (Hutchinson 1978; Soberón y Peterson, 2005) indica que: i) deben existir las condiciones abióticas necesarias («A»), ii) condiciones bióticas favorables («B») (McGill *et al.*, 2006) y iii) hayan estado accesibles a la dispersión de la especie desde la región de su origen histórico («M») (Svenning y Skov, 2004). Por lo anterior, se han desarrollado y mejorado distintos algoritmos de modelación (Cobos *et al.*, 2019) tales como: BIOCLIM (Busby, 1991), GARP (Stockwell y Peters, 1999), MaxEnt (Phillips, Dudík y Schapire, 2004) entre otros, así como nuevos Modelos de Circulación General (MCG's) (Karger *et al.*, 2017). Es por ello que resulta relevante generar estudios sobre la distribución de *T. mucronatum* dado su nulo estudio en esta área de investigación y su importancia para el país.

**Objetivo.** Evaluar los efectos del cambio climático sobre la distribución geográfica actual y futura (2050) de *Taxodium mucronatum* Ten., así como determinar las variables climáticas que se asocian a su presencia, a través de la modelación de nichos, bajo dos rutas de concentración de CO<sub>2</sub> (4.5 y 8.5) para el año 2050, usando tres MCG's: CCSM4, HadGEM2\_AO y MIROC5.

**Hipótesis.** La distribución actual de *Taxodium mucronatum* Ten., podría tener cambios substanciales para el 2050 a causa del cambio en el clima.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### El ahuehuete en México

El sabino o ahuehuete (*Taxodium mucronatum* Ten.) es una de las especies más interesantes dentro del territorio nacional por su larga vida y belleza escénica, son los árboles más corpulentos y longevos que existen en el país (Luque, 1921).

Es una especie de hábitat riveroño o bien se encuentra arraigado a sitios con abundante agua, generalmente viven en corrientes permanentes o semipermanentes y ocasionalmente se le encuentra en sitios sin el contacto directo con el agua, pero con un manto freático superficial, donde tiene acceso directo al vital líquido (Villanueva *et al.*, 2014)

Son típicos de México, aunque también se les encuentra en algunas zonas del sur de Texas y norte de Guatemala (Brown y Montz, 1986), son nombrados según la lengua indígena local; por ejemplo, “yagaguichiciña” en zapoteco, “penhamu” en tarasco o “tuyuku” en mixteco (Torres, 2016). Los mexicas lo llamaron ahuehuatl (del Náhuatl “Atl”, Agua y “Huehue”, Viejo), por lo que su nombre significa “Viejo del Agua” (Luque, 1921).

Para los aztecas era un árbol sagrado y ceremonial relacionado con el agua, por lo que aún existen vestigios de algunos ejemplares emblemáticos, entre ellos esta: “El Centinela”, ubicado entre la Fuente de la Templanza y la Tribuna Monumental dedicada al Escuadrón 201. Vivió aproximadamente 500 años, desde tiempos prehispánicos (Carranza, 1992). El “Árbol de la noche triste” es el ahuehuete donde se dice que Cortés lloró su derrota el 10 de julio de 1520. Se encuentra en la Ciudad de México (Martínez, 1999). “El árbol del Tule”, ubicado en Santa María del Tule, Oaxaca, es de los árboles más longevos del mundo, pues cuenta con más de 2 000 años. Con un monumental diámetro de 40 m, es el más ancho de su especie (Debreczy y Rácz, 1997). El “Ahuehuete de Chalma” se encuentra en el Estado de México. Para muchos es un árbol sagrado, a sus pies nace un arroyo, a cuyas aguas se les atribuye cualidades curativas (Torres, 2016).

*T. mucronatum*, al ser una especie no maderable, ha sido estudiada principalmente por su potencial dendrocronológico (Villanueva *et al.*, 2006; Stahle *et al.*, 2011; Correa *et al.*, 2014), por su sensibilidad al ataque de plagas (Kobayashi, 1980), por su importancia en ecosistemas riparios (Suzán *et al.*, 2007), por su similitud con registros fósiles de hojas descubiertas en otros países (Vickulin *et al.*, 2003), por su uniformidad

genética en forma individual, que lo reivindica como el árbol con la circunferencia del tronco más grande del mundo (Dorado *et al.*, 1996), se han realizado estudios anatómicos para diferenciarlo de *Taxodium distichum* (Tiwari *et al.*, 2012), por su viabilidad y comportamiento germinativo de las semillas (Enríquez *et al.*, 2004) y por sus propiedades medicinales en numerosas enfermedades, incluidas la artritis y el cáncer (Zhang *et al.*, 2005).

### **Problemática del ahuehuete**

Las diversas actividades humanas alteran el comportamiento hidrológico, modificar el curso de los ríos mediante la extracción de material pétreo, favorecer la contaminación por desechos industriales de las actividades mineras, vertido de desechos sólidos y aguas residuales, sin ningún tratamiento previo, el sobrepastoreo, daños directos al arbolado mediante el corte de ramas y heridas provocadas al fuste e incendios intencionales. Estas acciones combinadas, aunada a la presencia de una sequía extrema ocurrida en la última década han diezmando notablemente las poblaciones de esta especie, al favorecer la presencia de plagas, situación que demanda urgentemente acciones de conservación y de restauración en ciertas áreas donde la especie aún está presente (Villanueva, 2014).

### **Cambio climático**

De acuerdo con el IPCC, el cambio climático se define como Cualquier cambio en el clima a lo largo del tiempo, ya sea debido a las variaciones naturales o como resultado de la actividad humana.

El calentamiento global se está acelerando, la temperatura podría superar los 1.5 °C antes del 2030 (Allen *et al.*, 2018) debido a tres tendencias: i) al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero; para el 2017 se reportaron 37 Gton de CO<sub>2</sub> (Le Quéré *et al.*, 2018), es decir que los próximos 25 años podría calentarse de 0.25 - 0.32 °C por década (Smith *et al.*, 2018), ii) aceleración en la disminución de la contaminación del aire; Karplus *et al.*, (2018) reportan que China redujo las emisiones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) de sus centrales eléctricas entre un 7 y 14 % entre 2014 y 2016, por lo que se está perdiendo el escudo de aerosoles que ha mantenido el planeta más frío, 0.7 °C (Salzmann, 2016), iii) hay indicios de que el Océano Pacífico parece estarse calentando de acuerdo con un ciclo climático natural lento conocido como la Oscilación Interdecadal del Pacífico (Henley y King, 2017).

Los retos que plantea el cambio climático antropogénico hacen necesaria una valoración correcta de sus impactos para poder establecer las mejores estrategias de adaptación y definir las medidas de mitigación más adecuadas. Las decisiones a tomar deben estar basadas en el mejor conocimiento posible de las condiciones climáticas actuales y una estimación adecuada de las proyecciones climáticas (Hughes, 2000). Las proyecciones climáticas son un elemento crucial en el proceso de toma de decisiones, que debe ser consistente con el marco general proporcionado por el informe especial sobre escenarios de emisiones elaborado por el IPCC y con los informes de evaluación mismos del IPCC

### **Modelos de circulación acoplados océano-atmósfera**

La herramienta básica para realizar estimaciones de proyecciones climáticas son los modelos de circulación general acoplados océano-atmósfera (AOGCM, por sus siglas en inglés) (calle y calzado, 2013).

Estos modelos proporcionan las características de gran escala de las proyecciones climáticas. Los escenarios describen líneas evolutivas plausibles de las condiciones climáticas y otros aspectos del futuro, principalmente relacionadas con aspectos socio-económicos y las emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles asociadas (calle y calzado, 2013).

CCM4 (Community Climate System Model version 4). El Modelo del Sistema Climático Comunitario (CCSM) fue creado por NCAR en 1983 como un modelo de atmósfera global disponible gratuitamente para uso de la comunidad más amplia de investigación climática. Es un modelo climático acoplado para simular el sistema climático de la Tierra. Compuesto por cinco modelos separados que simulan simultáneamente la atmósfera, el océano, la tierra, el hielo terrestre y el hielo marino de la Tierra, más un componente acoplador central (Danabasoglu *et al.*, 2012).

El modelo HadGEM2-AO es una configuración del modelo HadGEM2, el modelo fue creado por UK Met Office Hadley Centre. Es una simulación de sólo atmósfera con otras interfaces de componentes sustituidas por la entrada de archivos auxiliares. Los componentes del sistema terrestre incluidos son el ciclo del carbono terrestre y oceánico y la química troposférica. La vegetación terrestre y el carbono están representados por el modelo dinámico de vegetación global, TRIFFID, que simula la cobertura y el balance de carbono de 5 tipos de vegetación (árbol de hoja ancha, árbol de hoja de aguja, pasto C3, pasto C4 y arbusto) (Collins *et al.*, 2011).



MIROC5 se desarrolló en base a MIROC3.2. El Modelo de Investigación Interdisciplinaria sobre el Clima (MIROC), fue desarrollado conjuntamente en el Centro de Investigación del Sistema Climático (CCSR), Universidad de Tokio; Instituto Nacional de Estudios Ambientales (NIES); y la Agencia de Japón para la Ciencia y Tecnología de la Tierra Marina. acopla los siguientes modelos de componentes. La atmósfera es el modelo CCSR-NIES-Frontier Research Center for Global Change, que se basa en una dinámica espectral global e incluye un paquete estándar de física. El océano es el Modelo de Componentes Oceánicos del CCSR que incluye un modelo de hielo marino y la tierra que incluye un módulo de río (Watanabe *et al.*, 2010).

### **Escenarios de cambio climático**

Estos escenarios de emisiones son descripciones futuras que afectan el balance de la radiación de la Tierra, provocado por sustancias vertidas a la atmósfera, tales como Gases de Efecto Invernadero (GEI) y aerosoles, junto con otras condiciones relacionadas con el uso del suelo y la cubierta de la Tierra (Moss *et al.*, 2010).

Los primeros escenarios eran bastante sencillos y se basaban en modelos que eran representaciones estilizadas de incrementos en la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Los escenarios actuales representan los forzamientos más importantes, los procesos asociados, los posibles impactos (físicos, ecológicos y económicos) y las posibles respuestas recomendadas a tomadores de decisión y formuladores de política. Fueron desarrollados por la “Integrated Assessment Modelling Community” (IAMC). Actualmente incluyen submodelos de vegetación interactiva, ciclo de carbono y una mejor representación de química atmosférica. (Moss *et al.*, 2010)

Para el estudio del cambio climático se tiene en cuenta el forzamiento radiativo, que es el cambio en el flujo neto de energía radiativa hacia la superficie de la Tierra, medido en el borde superior de la troposfera (a unos 12.000 metros sobre el nivel del mar) como resultado de cambios internos en la composición de la atmósfera, o cambios en el aporte externo de energía solar. Se expresa en vatios/metro cuadrado (W/m<sup>2</sup>). En el clima lo anterior significa cualquier cambio en la radiación (calor) entrante o saliente de un sistema climático. Puede deberse a cambios en la radiación solar incidente, o a diferentes cantidades de gases activos radiativos (Rodríguez, 2013).

Los escenarios de emisiones presentan las siguientes características, son cuatro y son nombrados de acuerdo al forzamiento radiativo que producen al año 2100. El nuevo

escenario RCP 2.6 tiene concentraciones mucho más bajas que cualquiera de los escenarios SRES utilizados en el cuarto informe, y el escenario RCP 8.5 llega a fines de siglo con concentraciones de CO<sub>2</sub> más altas que los otros escenarios (Church *et al.*, 2013).

El forzamiento positivo tiende a calentar el sistema (más energía recibida que emitida), mientras que uno negativo lo enfría (más energía perdida que recibida). Considerando el sistema climático de la Tierra, las posibles causas de forzamiento radiativo son: un cambio en la radiación solar incidente o los efectos de los cambios en las cantidades emitidas de gases de efecto invernadero a la atmósfera, por lo que:

El RCP 2.6 asume que las emisiones globales anuales de GEI generarán un forzamiento radiativo de  $\sim 3 \text{ W/m}^2$  y éstas llegarán a valores máximos entre los años 2010 y 2020, y a partir de entonces las emisiones tenderán a disminuir sustancialmente (Moss *et al.*, 2010).

El RCP 4.5 el forzamiento radiativo será de  $\sim 4,5 \text{ W/m}^2$  y las emisiones llegarán a valores máximos alrededor del año 2040 para después disminuir (Moss *et al.*, 2010).

El RCP 6.0 asume un forzamiento radiativo de  $\sim 6 \text{ W/m}^2$ , estas emisiones llegarán a valores máximos el año 2080 y a partir de entonces habrá una reducción (Moss *et al.*, 2010).

El RCP 8.5 el forzamiento radiativo considerado es de  $\sim 8.5 \text{ W/m}^2$  con emisiones que seguirán aumentando durante el próximo siglo (Moss *et al.*, 2010).

### **Distribución de especies**

La distribución de especies obedece a procesos complejos donde las relaciones bióticas tienen una influencia importante (Mateo *et al.*, 2011). La base conceptual de este campo, que podría denominarse “ecología distribucional”, está en los trabajos clásicos de ecología y biogeografía (Andrewartha y Birch 1954; Udvardy 1969). El gran valor de este tipo de información relacionada con la distribución geográfica de las especies incrementó recientemente debido a la popularidad de un tipo de métodos generados a finales de los años 70 y principios de los 80 (Soto *et al.*, 1984) y que se han desarrollado intensamente en los últimos 20 años (Peterson *et al.* 1999; Guisan y Zimmermann, 2000; Elith *et al.*, 2006).

### **Modelos de distribución de especies**

Existen dos alternativas para estimar los patrones de distribución geográfica de las especies, intuitivamente o al relacionar las localidades de los registros con variables mediante el uso de modelos empíricos predictivos de distribución potencial, ejemplo de ello son: BIOCLIM (Envolventes Bioclimáticas) (Busby, 1991), MLJ (Modelado Lineal Generalizado), Domain (Domain Modelling), GARP (Genetic Algorithm for Rule Prediction) (Stockwell y Peters, 1999) y MAG (Modelado Aditivo Generalizado) o MaxEnt (Máxima entropía) (Phillips, Dudík y Schapire, 2004). MaxEnt puede ser utilizado con datos de solo presencia, es decir, cuando existen registros de donde está presente la especie, pero no se conoce si una “no presencia” es una “ausencia verdadera” o simplemente es resultado de que dicha especie no se buscó en el sitio (Margules y Sarkar, 2009).

El modelado se ha definido como la generalización de una realidad que solo se conoce parcialmente, mediante simulación o formulación matemática. En los últimos años, se ha incrementado la aplicación en diversos campos de la ecología, la evolución, la biogeografía y la biología de la conservación; se les han designado como modelos de nicho, o modelos de distribución potencial de especies (García, 2008). Estos pueden ser binarios, en los que se otorga el valor de uno a las áreas idóneas y cero a las no idóneas, o continuos, según un intervalo de valores que clasifican el territorio (Benito y Giles, 2007). Para el uso de los modelos de distribución de especies deben considerarse tres aspectos: i) que se parte de datos conocidos sobre la distribución del organismo; ii) que son los datos con diferentes variables independientes que describen las condiciones ambientales se asocian matemática o estadísticamente; y iii) que se extrapola la relación al resto del área de estudio y se obtiene un mapa de probabilidad de presencia de la especie (García, 2008).

### **Diagrama de BAM**

Entre los factores que determinan causalmente el área de distribución de una especie, se encuentran sus tolerancias ambientales (su nicho fundamental), la presencia o ausencia de otras especies (polinizadoras, dispersoras, competidoras, depredadoras, etc.) y las posibilidades de dispersión en períodos de tiempo y desde áreas originales relevantes. Dicho en otras palabras, un área de distribución, en general, depende de muchos factores, más que el simple nicho fundamental de la especie. Una manera muy

simplificada de expresar lo anterior es el llamado «diagrama BAM» (Soberón y Peterson, 2005)

el diagrama BAM muestra que una especie tiene altas probabilidades de ser observada en aquellas regiones del planeta donde: i) deben existir las condiciones abióticas necesarias («A»), ii) condiciones bióticas favorables («B») (McGill *et al.*, 2006) y iii) hayan estado accesibles a la dispersión de la especie desde la región de su origen histórico («M») (Svenning y Skov, 2004). La zona denotada por GO, o área ocupada es la intersección de favorabilidad biótica y abiótica, y de accesibilidad histórica, por lo que la especie puede ser observada/recolectada en esa región.

Por definición, las variables ambientales en GO constituyen el nicho realizado (NR). La zona GI es una región con condiciones favorables pero que se ha mantenido fuera de las capacidades de dispersión de la especie. La región A es favorable a la especie si se hace abstracción de las interacciones y por lo tanto su medio ambiente corresponde a la idea de «nicho fundamental» de Hutchinson (1957).

### **Evaluación de modelos de distribución**

La evaluación se basa en técnicas, como lo son las curvas ROC (Operating Receiver Characteristic). El área bajo la curva (AUC, por sus siglas en inglés) ROC es un estadístico de prueba ampliamente utilizado que mide la capacidad que tiene el modelo de discriminar las presencias del resto del entorno disponible para la especie (Gormley *et al.*, 2013) y la importancia de las variables ambientales predictoras se evalúan a partir del promedio del porcentaje de contribución al modelo final de cada una para las especies (Lecours *et al.*, 2016).

La mejor forma de evaluar los modelos de distribución de especies se realiza comparando las predicciones contra un conjunto de presencias independiente a la construcción de los mismos (Pearson *et al.*, 2007) o creando matrices de confusión donde se registran las localidades verdaderas clasificadas como presencias por el modelo (Allouche *et al.*, 2006),

En algunos trabajos se han dividido los datos de presencia en porcentajes variables para el entrenamiento y evaluación del modelo, dando mayor prioridad (mayor porcentaje de presencias) al entrenamiento. Dichas particiones están en función de la cantidad de presencias disponibles y el criterio del investigador. Aceves *et al.* (2018) usaron el 50 % del total de registros para entrenamiento y el resto para validación, en la modelación de 20 especies de pinos, mientras que Cruz *et al.* (2014) destinaron el

75 % de registros para entrenamiento y 25 % para la validación del modelo, en la modelación de *Liquidambar styraciflua* L., *Quercus rubramenta* Trel. y *Roldana robinsoniana* (Greenm.) H. Rob. y Brettell.

Finalmente, en México los estudios relaciones a la distribución de especies, se han enfocado principalmente en especies arbóreas siendo el género *Pinus* el que más aportes ha tenido, ejemplo de ello son: Ávila *et al.* (2014) quienes generaron un modelo para *Pinus herreare* Martínez en el Área de Protección de Flora y Fauna Sierra de Quila (occidente de Jalisco); en Michoacán Cruz *et al.* (2016), generaron modelos bajo escenarios de cambio climático para dos especies de *Abies* y 10 de *Pinus*, Pérez *et al.* (2013) hicieron lo propio para *Pinus patula* y *P. pseudostrobus* Lindl. en el estado de México. Se ha estimado la distribución de especies género *Abies*, *Pinus*, *Pseudotsuga* (Ramos-Dorantes *et al.*, 2017) y especies invasoras (i. e. *Tamarix ramosissima* Ledeb. y *Atriplex semibaccata* R. Br.). otros géneros estudiados en México son: barrenadores, defoliadores, muérdago y descortezadores (Sosa *et al.*, 2018).

A nivel mundial, otras especies estudiadas han sido los insectos tales como: *Haemaphysalis longicornis* Neumann donde Raghavan *et al.* (2019) estudiaron su distribución espacial potencial, el género *Dendroctonus* ha sido ampliamente estudiado por sus brotes derivados directa e indirectamente por el clima (Logan y Powell, 2001; Waring *et al.*, 2009; Bentz *et al.*, 2010; Pureswaran *et al.*, 2018). Gutiérrez y Trejo, (2014) analizaron la distribución de *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl., *P. hartwegii* Lindl., *Abies hickelii* Flous y Gausson, *Quercus laurina* Bonpl. y *Quercus ocoteifolia* Liebm. para conocer el efecto del cambio climático, al igual que Zonneveld *et al.*, (2009) con *Pinus patula* Schltdl. et Cham. y *P. tecunumanii* F. Schwerdtfex Eguiluz & J.P. Perry en México y América central.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el área de distribución actual de *T. mucronatum*, que va desde el sur de Texas, hasta su límite sur, en la frontera con Guatemala (Brown y Montz, 1986). En México esta especie se localiza en riveras de ríos, manantiales o en humedales (Martínez, 1963), en altitudes desde 250 hasta 2500 m. Estas áreas presentan un tipo de clima BS1kw (semiárido templado), con temperatura media anual entre 12 y 18 °C (García, 2001), precipitaciones desde 200 hasta 800 mm, con lluvias en verano (Vidal, 1990). El tipo de suelo es litosol (INEGI, 2016).

### Obtención registros y variables bioclimáticas

Los datos georreferenciados de presencia de *T. mucronatum*, se obtuvieron de las bases de datos de la Red Mundial de Información sobre Biodiversidad (REMIB, 2019), Facilitador Global de Información de Biodiversidad (GBIF, 2019), del Banco de Datos Dendrocronológicos (BDD) y se complementaron con registros de artículos de investigación (AI). De estos se realizó un proceso de limpieza (Cobos *et al.*, 2018) eliminando registros duplicados, sin coordenadas, fuera de los límites de distribución de la especie, tanto en latitud, longitud y altitud, que de acuerdo con Rahm y Do (2010) son algunos errores encontrados en este tipo de datos. Para reducir la autocorrelación espacial entre registros, se usó el paquete spThin de R, a 5 km de distancia (Lammens *et al.*, 2015). Se emplearon 15 variables bioclimáticas (Hijmans *et al.*, 2005) obtenidas de CHELSA (Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas) (Karger *et al.*, 2017), excluyendo Bio 8, Bio 9, Bio 18 y Bio 19, dado que combinan información de temperatura y precipitación, lo que provoca anomalías espaciales en la modelación (Escobar *et al.*, 2014).

### Áreas de calibración y selección de variables

El área de calibración del modelo de nicho, que representa el área accesible «M» en el diagrama de BAM (Soberón y Peterson, 2005) se delimitó aplicando un buffer de 70 km de radio a las 1 267 ocurrencias, usando el programa de ArcGIS 10.5. La selección de variables bioclimáticas y su contribución, se realizó a través de Análisis de Componentes Principales (ACP) (Peterson *et al.*, 2007; Bentz *et al.*, 2010), en el paquete FactoMineR de R (Lê *et al.*, 2008) calculando el índice de Kaiser Meyer Olkin (KMO) que indica la justificación o no, del ACP. Así mismo, la selección de variables

fue acuerdo a la naturaleza de la especie y que no estuvieran correlacionadas ( $r \leq 0.80$ ), generando tres conjuntos de variables, cada uno con cinco variables, para probar la distribución de la especie.

### **Calibración, creación y transferencia del modelo**

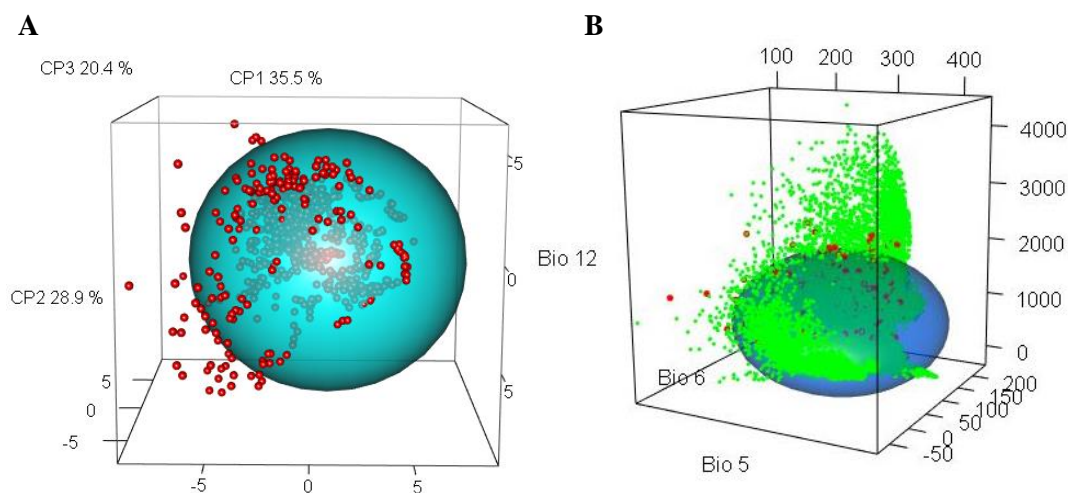
Utilizando el paquete *kuenm*, con salida logística (Cobos *et al.*, 2019) dentro de R Core Team (2019), del programa de R (Ihaka y Gentleman, 1996), se realizó: la calibración, generación de modelos candidatos, la evaluación, seleccionado el mejor modelo acorde a su significancia estadística, ROC parcial (Curvas Operada por el Receptor), tasa de omisión ( $\leq 5\%$ ), Criterio de Información Aikaike (AICc) (Warren y Seifert, 2011) y la transferencia del modelo final al año 2050 y a todo el mundo, a través de tres opciones de modelación: i) sin extrapolación, ii) con extrapolación y iii) extrapolación con clamping (Escobar *et al.*, 2014); con este fin, se utilizaron tres MCG's: CCSM4 (Danabasoglu *et al.*, 2012), HadGEM2\_AO (Collins *et al.*, 2011) y MIROC5 (Watanabe *et al.*, 2010) bajo dos trayectorias representativas de concentración de CO<sub>2</sub> 4.5 y 8.5. El riesgo de extrapolación se evaluó a través de MOP (Mobility-Oriented Parity) que identifica zonas de extrapolación estricta (Owens *et al.*, 2013).

### **Modelos de idoneidad actual y futura**

Los mapas de idoneidad actual y futura de *T. mucronatum*, se estratificaron en alta, media y baja, utilizando cuantiles relativos (INEGI, 2010). Los modelos de idoneidad se binarizaron al umbral de 10 percentil (Radosavljevic y Anderson, 2014) y a través de álgebra de rasters en ArcGis 10.5 se cuantificaron y mapearon los cambios en la idoneidad de la especie actual y futura, con la finalidad de evaluar la pérdida y ganancia de áreas de idoneidad, clasificándolas en: i) nuevas áreas aptas (donde la especie ocurre potencialmente en el futuro pero que no son aptas para la ocurrencia en condiciones actuales), ii) áreas de alto impacto (donde la especie ocurre potencialmente en la actualidad, pero no es apta en el futuro) y iii) áreas de bajo impacto (donde la especie ocurre potencialmente en la actualidad y en el futuro).

## RESULTADOS

Para este estudio se recopilaron 1 267 registros, 1 106 de GBIF, 138 de REMIB, 17 de BDD y 6 de AI. El modelo de nicho se construyó a través de ACP (Fig. 1A), cuya aplicación se justificó al obtener un valor de 0.69 del índice de KMO. El aporte de los primeros tres componentes principales fue del 85.7 % de la varianza total. Se observa que aproximadamente el 80 % de los registros se inclinan hacia los componentes principales 1 y 2. Usando las 15 Bios, mientras que usando la Bio 5 [Temperatura máxima del mes más caliente], Bio 6 [Temperatura mínima del mes más frío] y Bio 12 [Precipitación total anual], se observa que los registros se distribuyen en climas desérticos, pero también en climas húmedos con un rango de temperatura de 5 - 35 °C y precipitación anual de 1500 mm (fig. 1B). El ACP demostró que la contribución de las variables fue: Bio 1 [Temperatura media anual (°C), 14.2 %; CP 1], Bio 7 [Rango de temperatura anual (Bio5-Bio6, °C), 14.2 %; CP 1], Bio 4 [Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar \* 100), 13.0 %; CP 2], Bio 6 [Temperatura mínima del mes más frío (°C), 12.9 %; CP 2], Bio 10 [Temperatura promedio del trimestre más cálido (°C), 11.0 %; CP 3] y Bio 12 [Precipitación anual (mm), 11.0 %; CP 3].



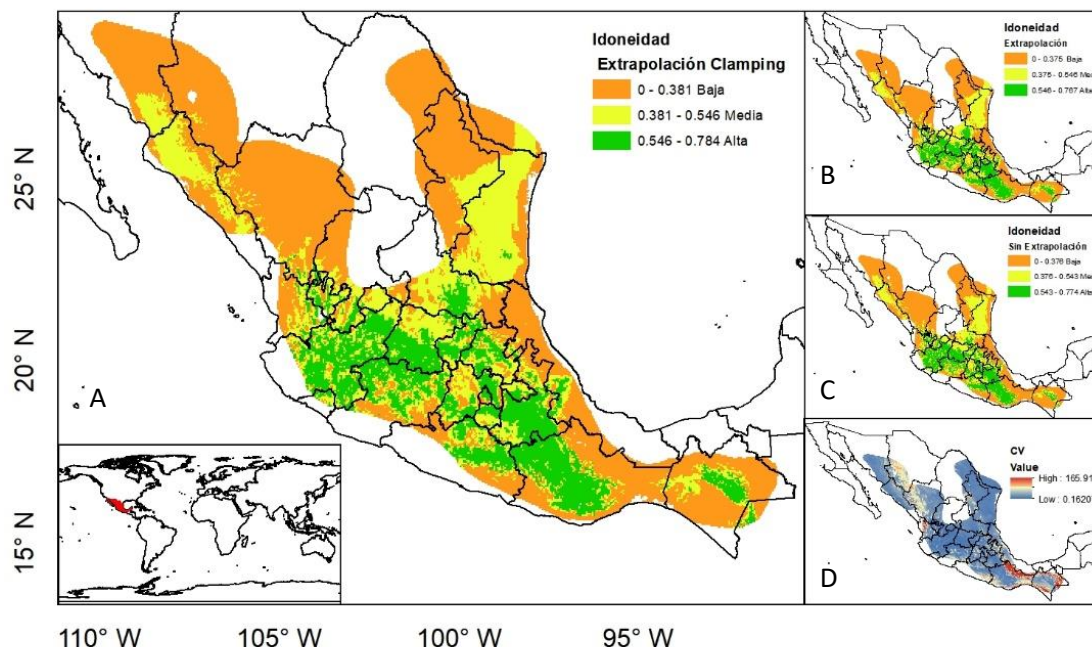
**Figura 1.** Modelo de nicho realizado de *Taxodium mucronatum* Ten., construidos con análisis de componentes principales, 15 variables bioclimáticas y 1 267 registros, con elipsoide al 99 %. (B) Modelo de nicho realizado, construido con tres variables bioclimáticas y 1 267 registros con elipsoide al 95 %.



**Cuadro 1.** Estadísticas generales de los modelos candidatos de *Taxodium mucronatum* Ten.

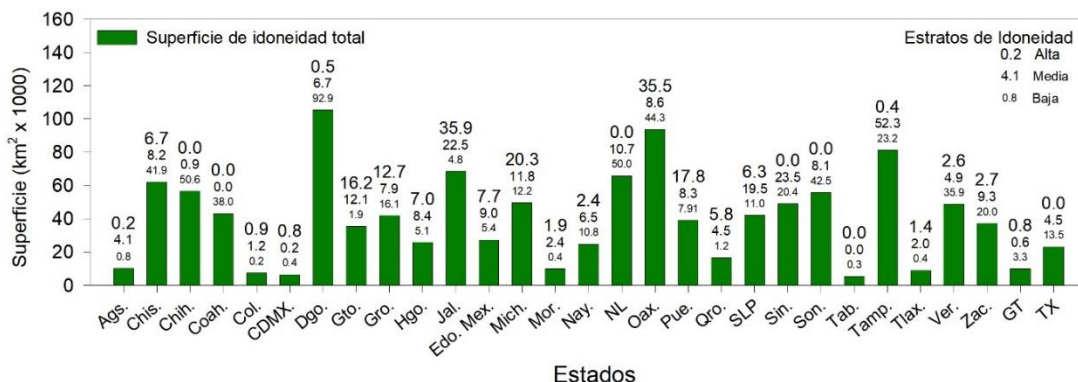
Criterio	Número de modelos
Todos los modelos candidatos	273
Modelos estadísticamente significativos (Mes)	273
Modelos que cumplen con el criterio tasa de omisión (mTO)	44
Modelos que cumplen con el criterio AICc (mAIC)	3
Número de mES y mTO	44
Número de mES y mAIC	3
Número de mES, mTO y mAIC	3

Se evaluaron un total de 273 modelos candidatos, todos estadísticamente significativos, con parámetros que reflejan todas las combinaciones de 13 multiplicadores de regularización, 7 combinaciones de clase de características (l, q, p, lq, lp, qp, lqp) y 3 conjuntos diferentes de variables ambientales; 44 modelos (16 %) cumplieron con el criterio tasa de omisión del 5 % (Cuadro 1). El modelo de mayor eficacia fue: lineal+cuadratic (lq), con un regularizador de 0.2 y las variables: Bio 1, Bio 4, Bio 6 [Temperatura mínima del mes más frío (°C)], Bio 13 [Precipitación del mes más lluvioso (mm)] y Bio 16 [Precipitación del trimestre más lluvioso (mm)]. En la calibración del modelo, el ROC parcial tuvo valor de 0 y la tasa de omisión 0.025 %, mientras que, en la validación del modelo con 161 registros independientes, el valor de ROC parcial fue de 0 y la tasa de omisión de 0.264 %.



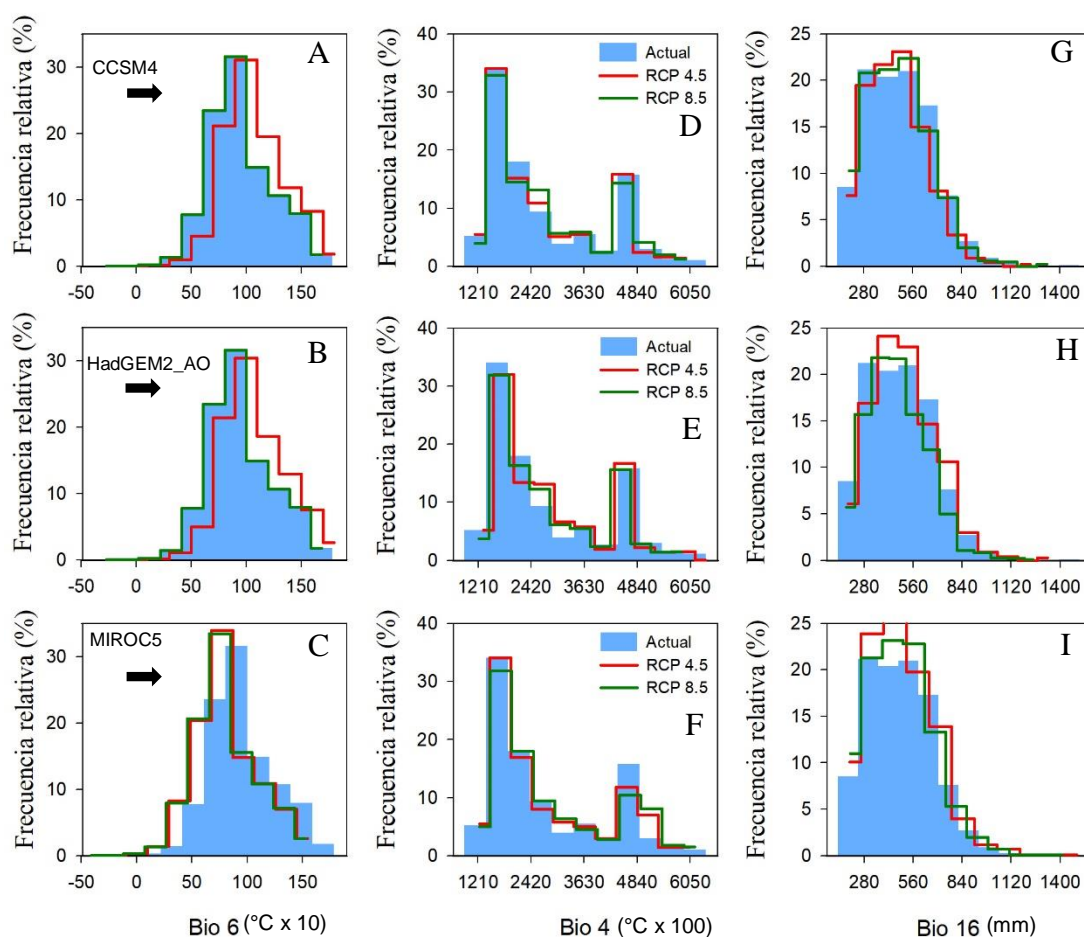
**Figura 2.** Áreas de idoneidad actual de *Taxodium mucronatum* Ten. estratificadas en tres niveles (alto, medio y bajo), en tres enfoques de modelación: con clamping (A), extrapolación (B), sin extrapolación (C) y coeficiente de variación de modelación con clamping (D).

El modelo predice idoneidad actual similar en los tres tipos de extrapolación (Fig. 2A-2C). La incertidumbre medida a través del coeficiente de variación (Fig. 2D) es de alrededor del 1.73 % en las áreas de mayor idoneidad. Con una superficie de 187 674.7 km<sup>2</sup> (Fig. 2A) que corresponde al 9.5 % del área total de «M», se presenta la idoneidad alta de *T. mucronatum*, con distribución discontinua en centro-sur del país, siendo Jalisco (35 950 km<sup>2</sup>), Oaxaca (35 510.8 km<sup>2</sup>), Michoacán (20 340.4 km<sup>2</sup>), Puebla (17 852.5 km<sup>2</sup>) y Guanajuato (16 203.1 km<sup>2</sup>) quienes representan más del 67 % de esta idoneidad (Fig. 3).

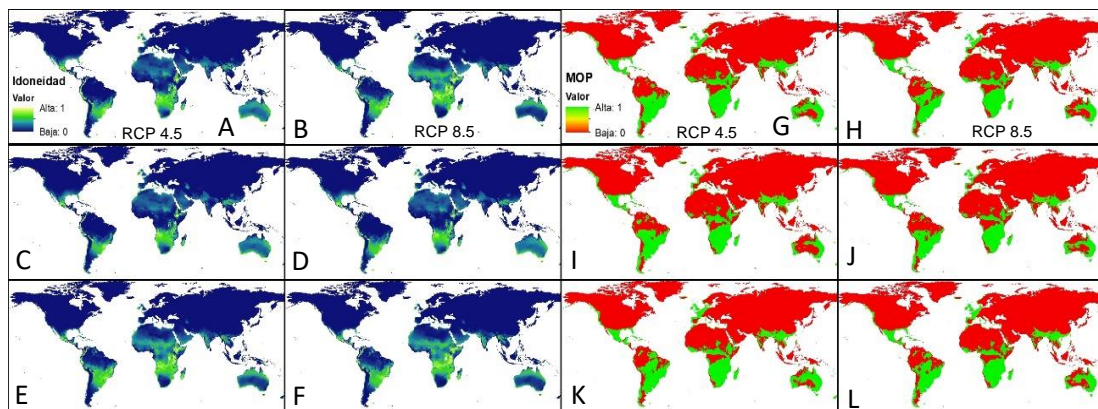


**Figura 3.** Superficie de idoneidad actual por entidad federativa y estratificada (baja, media y alta) de *Taxodium mucronatum* Ten.

Las variables bioclimáticas que mejor explican la distribución de *T. mucronatum* de acuerdo a la prueba de Jackknife fueron: Bio 6 (39.1 %), Bio 4 (33.5 %) y Bio 16 (13.9 %), las variables Bio1 y Bio 13, aportaron solo el 13.5 %. Bio 6 y Bio 16 presentan una distribución cercana a la normal (Figs. 4a - 4c y Figs. 4g - 4i), definiendo adecuadamente el perfil de la especie; el 70 % de los registros de *T. mucronatum*, se ubican entre 7.0 y 10.0 °C (Bio 6; Figs. 4a - 4c) y entre 240 y 840 mm (Bio 16, Figs. 4g - 4i). El histograma de Bio 4 presenta una distribución bimodal. Se observa que al 2050, estas variables no sufrirán incrementos significativos ni en temperatura (Bio 6) ni en precipitación (Bio 16), destacando una disminución en Bio 6, predicha por MIROC5 (Figs. 4c).



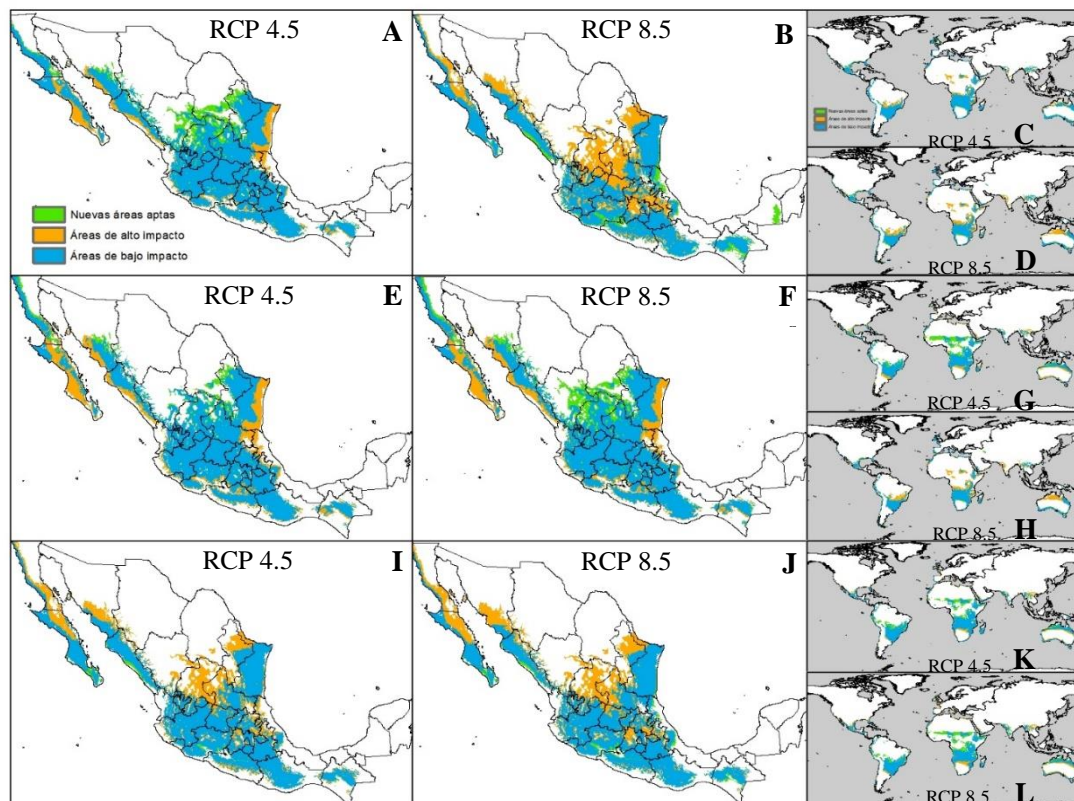
**Figura 4.** Histograma de frecuencia de tres variables ambientales de mayor contribución Bio 6 (A - C), Bio 4 (D - F) y Bio 16 (G - I), elaborado con 1 267 registros de *Taxodium mucronatum* Ten. en el periodo actual (barras) y en tres Modelos de Circulación General (MCG's) (líneas) en dos trayectorias de concentración (RCP's) 4.5 y 8.5 al 2050.



**Figura 5.** Idoneidad de *Taxodium mucronatum* Ten. (A - F) y paridad orientada a la movilidad (MOP) (G - L) para el año 2050 en tres Modelos de Circulación General (MCG's): CCSM4 (arriba), HadGEM2\_AO (media) y MIROC5 (abajo), en dos trayectorias de concentración representativas (RCP's) 4.5 y 8.5.

Al realizar la transferencia del modelo, de «M» al espacio geográfico «G» y al 2050, los modelos predicen que, en México, la idoneidad de esta especie podría extenderse hacia mayores latitudes (28 - 32° norte) (Fig. 5A – 5F). A nivel mundial se predicen ambientes favorables con idoneidad de hasta “1” especialmente hacia latitudes sur (16 - 34°) en los MCG's; HadGEM2\_AO en el RCP 4.5 (Fig. 5C) y MIROC5 en ambos RCP's (Fig. 5E – 5F), pero también en Sudáfrica. El MOP siendo una métrica estricta de la extrapolación, indica similitud de áreas idóneas de «M» al de las áreas idóneas de extrapolación «G» (Fig. 5I – 5L).

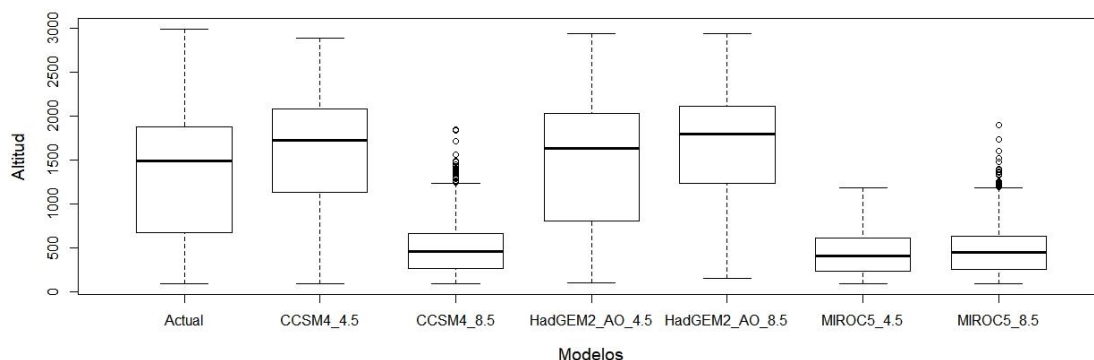
La transferencia del modelo actual (Fig. 2) al 2050 y a todo el mundo (Figs. 6A-6L) predice nuevas áreas idóneas para esta especie en los tres MCG's. En México se estiman en promedio, 113 mil km<sup>2</sup> de nuevas áreas aptas (latitudes norte) para *T. mucronatum*, en el RCP 4.5 del CCSM4 (Fig. 6A), probablemente debido al incremento de 1.48 °C (Bio 6), migrando hacia altitudes desde 1200 a 2300 msnm (Fig. 7).



**Figura 6.** Áreas de distribución potencial y efectiva de *Taxodium mucronatum* Ten. para el año 2050 en los Modelos de Circulación General: CCSM4 (A - D), HadGEM2\_AO (E - H) y MIROC5 (I - L), en dos trayectorias de concentración representativas (RCP's) 4.5 y 8.5.

Con mayores niveles de emisión de CO<sub>2</sub> (RCP 8.5) HadGEM2\_AO predice nuevas áreas hacia mayores latitudes (Fig. 6F) por el posible incremento de 1.79 °C (altitudes de 1300 a 2200 msnm) en esas nuevas áreas. En México MIROC5, predice pocas nuevas áreas para esta especie (Fig. 6I-6J), pero estima pérdidas de áreas idóneas de 237 mil km<sup>2</sup> (Tabla 2). Los resultados demuestran que los tres MCG's predicen similar en «M», pero diferente cuando se transfieren a «G» y a otros tiempos, esto deber tomarse en cuenta en cualquier estudio de modelación; por ende, la altitud en nuevas áreas idóneas de *T. mucronatum* es contrastante entre MCG's y RCP's, y no es posible identificar la tendencia altitudinal en nuevas áreas (Fig. 7).





**Figura 7.** Distribución altitudinal actual y futura en áreas efectivas de *Taxodium mucronatum* Ten. en tres Modelos de Circulación General (MCG's) y dos trayectorias representativas de concentración (RCP's) 4.5 y 8.5.

Diez mil puntos distribuidos aleatoriamente sobre nuevas áreas aptas y sobre áreas de alto impacto, demuestran (acorde a una prueba de "t de Student) que el incremento de temperatura al 2050 estimado por los MCG's sobre las nuevas áreas, es estadísticamente más alto ( $p < 0.05$ ) que en áreas donde la especie ocurre potencialmente en la actualidad, pero no es apta en el futuro (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Áreas de distribución potencial y efectiva de *Taxodium mucronatum* Ten. y promedio de incremento de temperatura, en tres Modelos de Circulación General (MCG's) y dos trayectorias representativas de concentración (RCP's) 4.5 y 8.5.

	Modelos de Circulación General					
	CCSM4		HadGEM2_AO		MIROC5	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Nuevas áreas aptas (km <sup>2</sup> )	109 769	50 4631	57 028	117 045	16 762	25 862
Incremento de temp. (°C)	1.48 <sup>a</sup>	-2.00 <sup>a</sup>	-1.45 <sup>a</sup>	1.79 <sup>a</sup>	-1.29 <sup>a</sup>	-1.49 <sup>a</sup>
Áreas de alto impacto (km <sup>2</sup> )	104 889	287 486	156 666	151 157	223 600	250 744
Incremento de temp. (°C)	1.44 <sup>b</sup>	-2.13 <sup>b</sup>	-1.24 <sup>b</sup>	1.71 <sup>b</sup>	-1.20 <sup>b</sup>	-1.45 <sup>b</sup>
Áreas de bajo impacto (km <sup>2</sup> )	668 378	485 297	616 116	621 626	549 182	525 167

Letras diferentes dentro de MCG y RCP, son estadísticamente significativas acorde a una prueba de "t" de Student (95 %).

**Cuadro 3.** Contribución de variables acorde al análisis de componentes principales y perfil bioclimático de *Taxodium mucronatum* Ten. Obtenido con tres Modelos de Circulación General (MCG's) y dos trayectorias representativas de concentración (RCP's) 4.5 y 8.5.

Variable	ACP		CCSM4			HadGEM2_AO		MIROC5	
	CP 1	CP 2	Actual	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Bio 1 (°C)	3.8	14.2	46 - 253	60 - 270	66 - 275	64 - 273	64 - 272	61 - 270	65 - 275
Bio 4 (¶)	13.0	1.2	966 - 6338	907 - 6180	996 - 6143	1109 - 6163	1018 - 6049	1010 - 6271	1039 - 6379
Bio 6 (°C)	0.4	12.9	(-36) -178	(-23) -188	(-58) - 162	(-23) - 190	(-22) - 191	(-48) - 164	(-51) - 162
Bio 13 (mm)	8.9	5.1	47 - 487	44 - 473	52 - 496	46 - 507	45 - 456	46 - 571	50 - 510
Bio 16 (mm)	9.4	4.3	133 - 1396	130 - 1281	144 - 1371	131 - 1379	133 - 1198	135 - 1557	148 - 1470

¶: desviación estándar de temperatura \* 100.

Los tres MCG's y los dos RCP's muestran similitud en los rangos de las variables de temperatura y precipitación. *T. mucronatum* se distribuye de 4.6 a 25.3 °C (Bio 1) y entre -3.6 y 17.8 °C (Bio 6) con un incremento promedio de 0.11 °C al 2050. En precipitación (Bio 13 y Bio 16) no se observan cambios importantes los próximos 30 años. Los requerimientos de precipitación de la especie según Bio 16 [Precipitación del trimestre más lluvioso] son desde 133 hasta 1396 mm (Cuadro 3).

## DISCUSIÓN

La disminución en la incertidumbre en las predicciones de idoneidad de *T. mucronatum* se obtuvo a través del uso de variables no correlacionadas, empleando tres MCG's (Karger *et al.*, 2017) y al excluir las variables Bio 8, Bio 9, Bio 18 y Bio 19 (Escobar *et al.*, 2014; Peterson *et al.*, 2011; Peterson *et al.*, 2018). La evaluación de variables climáticas es fundamental para predecir la distribución de las especies (Cobos *et al.*, 2019); en este estudio, se evaluaron tres grupos de variables, siendo Bio 6, Bio 4 y Bio 16 las que explican la distribución de *T. mucronatum*. Algunos autores han evaluado la contribución de las variables a través de ACP (Peterson *et al.*, 2008; Bentz *et al.*, 2010), al igual que en este estudio, incluso Cruz *et al.* (2014) reportan que la precisión de los modelos es mayor al realizar la selección del conjunto de variables a través de este método. Otros autores (Mendoza *et al.*, 2011) consideran también la forma de la distribución del histograma de las variables bioclimáticas, como se hizo aquí (Figura 4). Modelar con pocos o muchos parámetros puede incrementar los errores de comisión u omisión, arrojando predicciones erróneas, por lo que el número de variables en un modelo es de suma importancia (Beaumont *et al.*, 2005), para *T. mucronatum* se consideraron cinco por grupo.

La transferencia y evaluación del modelo de nicho ecológico a otra región y a otro tiempo es muy común en estudios de biogeografía (Sequeira *et al.*, 2018); sin embargo, pueden surgir problemas por no identificar cambios en las correlaciones entre variables, además algunas están basadas en los trimestres cálidos y secos, cambian estacionalmente en varios continentes, por lo que las predicciones podrían no ser confiables a regiones distantes del área de calibración (Elith *et al.*, 2010) y por no usar métricas adecuadas para evaluar la transferencia (Owens *et al.*, 2013), en este estudio ésta se evaluó a través de MOP ya que identifica riesgos de extrapolación y calcula la similitud ambiental entre la calibración y la proyección (Owens *et al.*, 2013).

Las nuevas áreas aptas para *T. mucronatum*, muestran similitud en «M» y en las áreas de extrapolación «G», como ha ocurrido en otros estudios (Raghavan *et al.*, 2019) para la especie *Haemaphysalis longicornis* Neumann, lo que no ocurre con *Pseudogymnoascus destructans* (Escobar *et al.*, 2014). No obstante, deben tomarse precauciones al inferir sobre áreas idóneas de esta especie en otros continentes. La modelación de la distribución actual de la especie, mostró congruencia con la distribución conocida de *T. mucronatum* que va desde el sur de Texas, hasta su límite sur, en la frontera con Guatemala (Brown y Montz, 1986). La altitud de los registros



(n = 1 267) de esta especie varió de 100 a 2800 m, semejante a la que reporta Villanueva *et al.* (2003), desde los 250 m (Nuevo León y Tamaulipas) hasta 2,500 m (Estado de México) y observado a 2,800 m en un sitio de la Sierra Gorda (Querétaro). Los modelos arrojados por Maxent, mostraron un buen ajuste con ROC parcial de cero y tasa de omisión de 0.264 % tal como lo indican Cobos *et al.*, (2019), para *Amblyomma americanum* Linn y *Peltophryne empusa* Cope, ROC cero y 0.04 respectivamente y tasa de omisión de 0.04 y cero, mismos valores reportados para *H. longicornis* por Raghavan *et al.* (2019).

Las variables bioclimáticas que mejor explicaron la distribución de *T. mucronatum* fueron: Bio 6, Bio 4 y Bio 16 (Fig. 4), donde la primera y la última muestran una distribución cercana a la normal; al respecto, Beaumont *et al.* (2005), mencionan que variables que poseen una distribución normal o sesgada, ejercen gran influencia en el perfil bioclimático de la especie, pero dependerá del número de registros que se contemplen. Cruz *et al.* (2016), demuestran que Bio 6 es la variable más importante para modelar la distribución de *Pinus douglasiana* Martínez (92.3 %), *P. lawsonii* Roehl ex Gordon (76.7 %), *P. pseudostrobus* Lindl. (92.4 %), *P. teocote* Schiede ex Schltdl. & Cham. (92.3 %) y *P. montezumae* Lamb. (48.9 %). Aceves *et al.* (2018), al modelar 20 especies de pinos reportan que las variables de temperatura son las que mejor explican la distribución. Téllez *et al.* (2005) reportan que las variables que explican la distribución potencial de *P. arizonica* Engelm., *P. devoniana* Lindl., *P. durangensis* Martínez y *P. pseudostrobus* son: Bio 1 y Bio12. En la evaluación de 12 especies de coníferas realizada en México por Ramos *et al.* (2017) la variable más importante fue Bio 1. En otros géneros (barrenadores, defoliadores, descortezadores y muérdago), Sosa *et al.* (2018) indican que las variables de mayor contribución al modelo son también las relacionadas a temperatura (Bio 1, Bio 3, Bio 6 y Bio 8), misma tendencia se reporta en especies de *Dendroctonus* (Logan y Powell, 2001; Waring *et al.*, 2009; Bentz *et al.*, 2010; Pureswaran *et al.*, 2018).

En los tres MCG's: CCSM4, HadGEM2\_AO y MIROC5, se observa un posible desplazamiento del área de idoneidad de *T. mucronatum* hacia latitudes norte, con un promedio de pérdida de áreas de alto impacto de 101 mil km<sup>2</sup> y 165 mil km<sup>2</sup> para los RCP's 4.5 y 8.5, para el 2050, así mismo los tres MCG's, predicen mayores pérdidas de áreas idóneas que nuevas áreas para *T. mucronatum*, la cual podría estar en riesgo, ya que en el centro de México se ha observado que el 40 % de los escurrimientos se han reducido significativamente (Hernández y Návar, 2010). Aitken *et al.* (2008),

indican que el cambio climático obligará a las especies arbóreas a desplazarse o adaptarse. Sáenz *et al.* (2010) reportan que los desplazamientos de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, *Pinus oocarpa* Schiede, *P. devoniana*, *P. pseudostrobus* y *P. hartwegii*, tienden hacia otras altitudes u orientación en la misma región, pero no latitudinales pues implicarían desplazamientos más largos. Las nuevas áreas o potenciales, deben ser tomadas con consideraciones (Ávila *et al.*, 2014; Cruz *et al.*, 2016; Ramos *et al.*, 2017) ya que los diferentes MCG's predicen diferente entre la misma especie incluso entre RCP's, como se observó en este estudio.

## CONCLUSIONES

Este estudio sugiere que para el 2050 *Taxodium mucronatum* Ten. podría tener una ganancia de áreas de idoneidad en zonas norte de México de aproximadamente 4 880 km<sup>2</sup> (RCP 4.5) predicha por el modelo CCSM4, pero más del 50 % de pérdida de áreas idóneas; es decir, se predicen más pérdidas de áreas idóneas que nuevas áreas. Bio 6 [Temperatura mínima del mes más frío (°C)] y Bio 16 [Precipitación del trimestre más lluvioso (mm)] son las que definen la distribución de *T. mucronatum*. La mayor idoneidad de esta especie se observa en Jalisco, Oaxaca, Michoacán Puebla y Guanajuato. En las nuevas áreas idóneas se espera en promedio un incremento de temperatura de 0.11 y 0.02 °C (RCP 4.5 y 8.5), con leve desplazamiento hacia latitudes norte, pero hacia zonas más cálidas (en México). A nivel mundial, se observan áreas de idoneidad en latitudes sur (16 - 34°). No hay una tendencia clara hacia dónde podría migrar altitudinalmente la especie. Se recomienda se evalúen más modelos para *T. mucronatum*, debido a las diferencias contrastantes que mostraron en las predicciones los tres modelos seleccionados para este estudio.

## REFERENCIAS

- Aceves-Rangel, L. D., Méndez-González, J., García-Aranda, M. A. y Nájera-Luna, J. A. (2018). Distribución potencial de 20 especies de pinos en México. *Agrociencia*, 52(7), 1043-1057.
- Aitken, S. N., Yeaman S., Holliday, J. A., Wang, T. y Curtis-McLane, S. (2008). Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary applications*, 1(1), 95-111. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x>
- Allouche, O., Tsoar, A. y Kadmon, R. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of applied ecology*, 43(6), 1223-1232.
- Ávila-Coria, R., Villavicencio-García, R. y Ruiz-Corral, J. A. (2014). Distribución potencial de *Pinus herrerae* Martínez en el occidente del estado de Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5, 92-109. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v5i24.322>
- Allen, M. R., Dube, O. P., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Kainuma, S., Kala, M., Mahowald, J., Mulugetta, N., Pérez, Y., Wairiu, R. M. y Zickfeld, K. (2018). Framing and Context. In: Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. 81 pp
- Andrewartha, H. G. y Birch, L. C. (1954). *The Distribution and Abundance of Animals*: University of Chicago. Chicago, Illinois, 782.
- Beaumont, L. J., Hughes, L. y Poulsen, M. (2005). Predicting species distributions: Use of climatic parameters in BIOCLIM and its impact on predictions of species current and future future distributions. *Ecological Modelling*, 186, 251-270. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.01.030>
- Benito, B. y Peñas, J. (2007). Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (7), 100-119.
- Bentz, B. J., Régnière, J., Fettig, C. J., Hansen, E. M., Hayes, J. L., Hicke, J. A., Kelsey, R. J., Negrón, J. F. y Seybold, S. J. (2010). Climate change and bark beetles of the western United States and Canada: Direct and indirect effects. *BioScience*, 60, 602-613. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.8.6>
- Busby, J. R. (1991). BIOCLIM - a bioclimate analysis and prediction system. *Plant Protection Quarterly*, 6, 8-9.

- Brown, C. A. y Montz, G. N. (1986). *Baldcypress*. Claitor's Publishing Division, Baton Rouge, L. A. 139 pp.
- Calle, M. J. C., y Calzado, P. R. (2013). Evidencias y escenarios de cambio climático. *Revista de Obras Públicas: Organo profesional de los ingenieros de caminos, canales y puertos*, 3545, 51-62.
- Carranza, E. (1992). Familia Taxodiaceae. Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes. Fascículo 4. Instituto de Ecología, A. C. Centro Regional del Bajío, Pátzcuaro, Michoacán. 7 pp.
- Church, J. A., Clark, P. U., Cazenave, A., Gregory, J. M., Jevrejeva, S., Levermann, A. et al. (2013). Sea level change. En T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung et al. (Eds.), *Climate change 2013: the Physical Science basis. Contribution of working group I to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1137–1216). United Kingdom and New York: Cambridge University Press.
- Cobos, M. E., Jiménez, C., Nuñez, P. C., Romero-Alvarez, D. y Simoes, M. (2018). Sample data and training modules for cleaning biodiversity information. *Biodiversity Informatics*, 14, 49-50. <https://doi.org/10.17161/bi.v13i0.7600>
- Cobos, M. E., Peterson, A. T., Barve, N. y Osorio, O. L. (2019). kuenm: An R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, 7, e6281. <https://doi.org/10.7717/peerj.6281>
- CONANP. *Prontuario Estadístico y Geográfico de las Áreas Naturales Protegidas de México*. Primera edición. México. (2016).
- Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C. D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A. y Woodward, S. (2011). Development and evaluation of an Earth-System model-HadGEM2. *Geoscientific Model Development*, 4, 1051-1075. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011>, 2011
- Correa-Díaz, A., Gómez-Guerrero, A., Villanueva-Díaz, J., Castruita-Esparza, L. U., Martínez-Trinidad, T. y Cervantes-Martínez, R. (2014). Análisis dendroclimático de ahuehete (*Taxodium mucronatum* Ten.) en el centro de México. *Agrociencia*, 48(5), 537-551.
- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Villaseñor, J. L. y Ortiz, E. (2014). Potential species distribution modeling and the use of principal component analysis as predictor variables. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 189-199.
- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Silva, J. T., Bernal-Santana, N., Estrada-Godoy, F. y López-Sandoval, J. A. (2016). Potential distribution model of Pinaceae species under climate change scenarios in Michoacán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(2), 135-148.

- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Silva, J. T., Bernal- Santana, N., Estrada, G. F. y López, S. J. (2016). Potential distribution model of Pinaceae species under climate change scenarios in Michoacán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22, 135-148. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.06.027>
- Danabasoglu, G., Bates, S. C., Briegleb, B. P., Jayne, S. R., Jochum, M., Large, W. G y Yeager, S. G. (2012). The CCSM4 ocean component. *Journal of Climate*, 25(5), 1361-1389.
- Debreczy, Z. y Rácz, I. (1997). El Árbol del Tule: The ancient giant of Oaxaca. *Arnoldia: The Magazine of the Arnold Arboretum*, 57 (4), 3-11.
- Dorado, O., Avila, G., Arias, D. M., Ramirez, R., Salinas, D. y Valladares, G. (1996). The Árbol del Tule (*Taxodium mucronatum* Ten.) is a single genetic individual. *Madroño*, 445-452.
- Elith, J., H. Graham, C., P. Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R. J., Huettmann, F., Leathwick, J. R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L. G., Loiselle, B. A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J. M., Peterson, A. T., Phillips, S. J., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Soberon, J., Williams, S., Wisz, M. S. y Zimmermann, N. E. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129-151.
- Enríquez-Peña, E. G., Suzán-Azpiri, H. y Malda-Barrera, G. (2004). Seed viability and germination of *Taxodium mucronatum* (Ten.) in the State of Querétaro, México. *Agrociencia*, 38(3), 375-381. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.041>
- Escobar, L. E., Lira, N. A., Medina, V. G. y Peterson, T. A. (2014). Potential for spread of the white-nose fungus (*Pseudogymnoascus destructans*) in the Americas: use of Maxent and NicheA to assure strict model transference. *Geospatial Health*, 9, 221-229. <https://doi.org/10.4081/gh.2014.19>
- García, M. R. (2008). Modelos predictivos de riqueza de diversidad vegetal. Comparación y optimización de métodos de modelado ecológico. Memoria de Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Biológicas. Departamento de Biología Vegetal I. Madrid, España. 188 p.
- Gormley, K. S. G., Porter, J. S., Bell, M. C., Hull, A. D. y Sanderson, W. G. (2013). Predictive habitat modelling as a tool to assess the change in distribution and extent of an OSPAR priority habitat under an increased ocean temperature scenario: consequences for marine protected area networks and management. *Plos One*, 8, e68263. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0068263>
- Gutiérrez, E. y 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, 179-188. <http://doi.org/10.7550/rmb.37737>

- Guisan, A., y Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological modelling*, 135(2-3), 147-186.
- Hernández-Rodríguez, H. y Návar-Cháidez, J. D. J. (2010). Tendencias en los caudales en ríos de Michoacán, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1, 153-159.
- Henley, B. J. y King, A. D. (2017). Trajectories toward the 1.5°C Paris target: Modulation by the Interdecadal Pacific Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 44, 4256-4262. <https://doi.org/10.1002/2017GL073480>
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones P. G., y Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25 (15), 1965-1978.
- Hughes, L. (2000). Biological consequences of global warming: is the signal already apparent?. *Trends in Ecology & Evolution*, 15(2), 56-61. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(99\)01764-4](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(99)01764-4)
- INEGI. (2010). “Nota técnica. Estratificación univariada”. Censo de Población y Vivienda. 2010. SINCE. Sistema para la Consulta de Información Censal. México. 17 p.
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria, R. W. y Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth’s land surface areas. *Scientific Data*, 4, 170122. <https://www.nature.com/articles/sdata2017122>
- Karplus, V. J., Zhang, S. y Almond, D. (2018). Quantifying coal power plant responses to tighter SO<sub>2</sub> emissions standards in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(27), 7004-7009. <https://doi.org/10.1073/pnas.1800605115>
- Kobayashi, T. (1980). Needle blight of *Taxodium mucronatum* in the Philippines. *Japanese Journal of Phytopathology*, 46(2), 258-262.
- Lammens, A. M., Boria, R. A., Radosavljevic, A., Vilela, B. y Anderson, R. P. (2015). spThin: An R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography*, 38(5), 541-545. <https://doi.org/10.1111/ecog.01132>
- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Pongratz, J., Manning, A. C. y Boden, T. A. (2017). Global carbon budget 2017. *Earth System Science Data Discussions*, 1, 79. <https://doi.org/10.5194 / essd-2017-123>
- Lê, S., Josse, J. y Husson, F. (2008). FactoMineR: an R package for multivariate analysis. *Journal of Statistical Software*, 25, 1-18. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>
- Lecours, V., Brown, C. J., Devillers, R., Lucieer, V. L. y Edinger, E. N. (2016). Comparing selections of environmental variables for ecological studies: A

- focus on terrain attributes. *Plos One*, 11, 1–18.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0167128>
- Logan, J. A. y Powell, J. A. (2001). Ghost forests, global warming and the mountain pine beetle (Coleoptera: Scolytidae). *American Entomologist*, 47(3), 160-172.  
<https://doi.org/10.1093/ae/47.3.160>
- Lot, A., Novelo, A. y Ramírez-García, P. (1998). Diversidad de la flora acuática mexicana. In: Ramamoorthy, T. P., Bye, R., Lot, A. y Fa, J. (eds.). 1998. Diversidad biológica de México. Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 563-577 pp.  
<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.1998.01.004>
- Luque, E. (1921). Voto razonado para elegir el árbol nacional. Sociedad Forestal Mexicana. México. *Revista México Forestal*, 3, 9-10.
- Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M. y Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: Una revisión sintética. *Revista chilena de historia natural*, 84(2), 217-240.
- Margules, C. R. y Sarkar, S. (2009). Planeación sistemática de la conservación. (Trad. Sánchez-Cordero, V. y Figueroa, F.). Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 304 pp. México D.F. (Original en inglés, 2007)
- Martínez, M. (1963). Las pináceas mexicanas, tercera edición. Instituto de Biología, UNAM, México, D.F. 400 pp.
- Martínez, A. E. (1999). El Ahuehuete. CONABIO. *Biodiversitas*, 5 (25), 12-14
- McGill, B. J., Enquist, B. J., Weiher, E. y Westoby, M. (2006). Rebuilding community ecology from functional traits. *Trends in Ecology and Evolution*, 21, 179-185.  
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.02.002>
- Mendoza, G. M., Salinas, M. Y., Olivo, M. A. y Zúñiga, M. G. (2011). Factors influencing the geographical distribution of *Dendroctonus rhizophagus* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Environmental Entomology*, 40(3), 549-559.  
<https://doi.org/10.1603/EN10059>
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P. y Meehl, G. A. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747.
- Owens H. L., Campbell, L. P., Dornak, L. L., Saupe, E. E., Barve, N., Soberón, J., Lira-Noriega, A., Hensz, C. M., Myers, C. E. y Peterson, A. T. (2013). Constraints on interpretation of ecological niche models by limited environmental ranges on calibration areas. *Ecological Modelling*, 263, 10-18.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.04.011>



- Pearson, R. G., Raxworthy, C. J., Nakamura, M. y Townsend Peterson, A. (2007). Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of biogeography*, 34(1), 102-117. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01594.x>
- Pérez-Miranda, R., Moreno-Sánchez, F., González-Hernández, A. y Arreola-Padilla, V. (2013). Escenarios de la distribución potencial de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. y *Pinus pseudostrobus* Lindl. con modelos de cambio climático en el Estado de México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 4(15), 73-86.
- Peterson, A. T., Soberón, J. y Sánchez-Cordero, V. (1999). Conservatism of ecological niches in evolutionary time. *Science*, 285(5431), 1265-1267.
- Peterson, A. T. (2001). Predicting species' geographic distributions based on ecological niche modeling. *The Condor*, 103, 599-605. DOI: <https://doi.org/10.1093/condor/103.3.599>
- Peterson, A. T., Papeş, M. y Eaton, M. (2007). Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and Maxent. *Ecography*, 30(4), 550-560. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2007.05102.x>
- Peterson, A. T., Papeş, M. y Soberón, J. (2008). Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213, 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008>
- Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M. y Araújo, M. B. (2011). Ecological niches and geographic distributions. Princeton: Princeton University Press. Princeton, N. J. 328 PP. <https://doi.org/10.23943/princeton/9780691136868.003.0003>
- Peterson, A. T., Cobos, M. E. y Jiménez-García, D. (2018). Major challenges for correlational ecological niche model projections to future climate conditions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1429, 66-77. <https://doi.org/10.1111/nyas.13873>
- Phillips, S. J., Dudík, M. y Schapire, R. E. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Twenty-First International Conference on Machine Learning – ICML*, 4, 83. <https://doi.org/10.1145/1015330.1015412>
- Pureswaran, D. S., Roques, A. y Battisti, A. (2018). Forest insects and climate change. *Current Forestry Reports*, 4(2), 35-50. <https://doi.org/10.1007/s40725-018-0075-6>
- Ihaka, R. y Gentleman, R. (1996). R: a language for data analysis and graphics. *Journal of computational and graphical statistics*, 5(3), 299-314.
- Rahm, E. y Do, H. (2010). Data cleaning: problems and current approaches. *IEEE Data Engineering*, 23(4), 3-13.

- Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. Ed. LIMUSA. México, D.F. 432 pp
- Radosavljevic, A., y Anderson, R. P. (2014). Making better Maxent models of species distributions: complexity, overfitting and evaluation. *Journal of Biogeography*, 41, 629-643. <https://doi.org/10.1111/jbi.12227>
- Ramos-Dorantes, D. B., Villaseñor, J. L., Ortiz, E. y Gernandt, D. S. (2017). Biodiversity, distribution, and conservation status of Pinaceae in Puebla, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 215-223. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.01.028>
- Raghavan, R. K., Barker, S. C., Cobos, M. E., Barker, D., Teo, E. J. M., Foley, D. H. y Peterson, A. T. (2019). Potential spatial distribution of the newly introduced long-horned tick, *Haemaphysalis longicornis* in North America. *Scientific reports*, 9, 498. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37205-2>
- Rodríguez, M. L. (2013). Estimaciones objetivas sobre la evolución regional y global del cambio climático. *Polígonos. Revista de Geografía*, 24, 133-162.
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., St-Amant, R., Beaulieu, J. y Richardson, B. A. (2010). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change*, 102, 595-623. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9753-5>
- Salzmann, M. (2016). Global warming without global mean precipitation increase?. *Science Advances*, 2(6), e1501572. <http://doi.org/10.1126/sciadv.1501572>
- Sequeira A. M. M., Bouchet, P. J., Yates, K. L., Mengersen, K. y Caley, M. J. (2018). Transferring biodiversity models for conservation: opportunities and challenges. *Methods in Ecology and Evolution*, 9, 1250-1264. <http://doi.org/10.1111/2041-210X.12998>
- SEMARNAT. (2010). NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. [https://doi.org/dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5173091&fecha=30/12/2010](https://doi.org/dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5173091&fecha=30/12/2010).
- Soberón, J. y Peterson, A. T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2, 1-10.
- Soto, M., Angulo, M. J., Garduño, O. L. y Hernández, M. (1984). Bioclimatología y computación interactiva. *Ciencia y Desarrollo*, 59, 153-161.
- Sosa, D. L., Méndez, G. J., García, A. M., Cambrón, S. V., Villarreal, Q. J., Ruiz, G. C. y Montoya, J. J. (2018). Distribución potencial de barrenadores, defoliadores, descortezadores y muérdagos en bosques de coníferas de México.

*Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47), 187-208.  
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.159>

- Smith, D. M., Scaife, A. A., Hawkins, E., Bilbao, R., Boer, G. J., Caian, M. y Doescher, R. (2018). Predicted chance that global warming will temporarily exceed 1.5 °C. *Geophysical Research Letters*, 45(21), 895-903. <https://doi.org/10.1029/2018GL079362>
- Stockwell, D. y Peters, D. (1999). The GARP modelling system: Problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science*, 13(2), 143-158. <https://doi.org/10.1080/136588199241391>
- Stahle, D.W., Villanueva, J., Cleaveland, M. K., Therrell, M.D., Paull, G., Burns, B., Salinas, W., Suzán, H. y Fule, P. (2000). Recent tree ring research in México. In: Roig, F.A. (Ed.), *Dendrocronología en América Latina*. EDIUNC, Mendoza, Argentina, 285-306 pp.
- Stahle, D. W., Villanueva-Díaz, J., Burnette, D. J., Cerano-Paredes, J., Heim Jr, R. R., Fye, F. K., Acuna-Soto, R., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K. y Stahle, D. K. (2011). Major Mesoamerican droughts of the past millennium. *Geophysical Research Letters*, 38(5), 1- 4. L05703. <https://doi.org/10.1029/2010GL046472>
- Suzán-Azpiri, H., Enríquez-Peña, G. y Malda-Barrera, G. (2007). Population structure of the Mexican baldcypress (*Taxodium mucronatum* Ten.) in Queretaro, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 242(2-3), 243-249. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.041>
- Svenning, J. C. y Skov, F. (2004). Limited filling of the potential range in European tree species. *Ecology Letters*, 7, 565-573. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00614.x>
- Téllez, V. O., Chávez, Y. M., Gómez, H. A. y Gutiérrez, M. V. (2005). Modelado bioclimático como herramienta para el manejo forestal: Estudio de cuatro especies de Pinus. *Ciencia Forestal en México*, 29, 61-82.
- Tiwari, S. P., Yadav, D., Kumar, P. y Chauhan, D. K. (2012). Comparative palynology and wood anatomy of *Taxodium distichum* (L.) Rich. and *Taxodium mucronatum* Ten. *Plant systematics and evolution*, 298(4), 723-730.
- Torres-Beristáin, B. (2016). Memoria viviente de nuestra historia. Ahuehetes: los viejos del agua.
- Udvardy, M. D. y Papp, C. S. (1969). *Dynamic zoogeography*. Van Nostrand Reinhold Company, New York
- Vargas, M. F. (1997). Compendio de árboles históricos y notables de México. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT. México, D. F. México. 52 pp. <https://doi.org/10.32800/abc.2016.39.0077>

- Vickulin, S. V., LePage, B. A. y Shalisko, V. Y. (2003). Palaeogene leaf compressions of *Taxodium mucronatum* Ten. affinity from Pasekovo, middle Russian upland, southern European Russia. *Sentia CUCBA*, 5(1-2), 63-87. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.1999.tb01942.x>
- Vidal-Zepeda, R. (1990). Precipitación media anual, hoja IV.4.6, Atlas Nacional de México, vol. II, escala 1:4000 000, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Villanueva D. J., Stahle, D.W. M. D., Therrell, M. K., Cleaveland, F., Camacho-Morfín, P., Núñez-Díaz de la Fuente, S., Gómez-Chávez, J., Sánchez-Sesma, J. y Ramírez-García, A. (2003). Registros climáticos de los ahuehuetes de Chapultepec en los últimos 450 años. *Boletín del Archivo Histórico del Agua*, 8, 34-43. <https://doi.org/10.19083/tesis/625207>
- Villanueva, D. J., Cerano, J. P., Stahle, D.W., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K. y Luckman, B. H. (2005). Estudios paleoclimáticos en México utilizando anillos de crecimiento de especies arbóreas. In: Benavides S. J., Becerra, F., Hernández, L.T., González, C., Flores, S. (Editores). Contribución al estudio de los servicios ambientales. Libro Técnico No. 1. INIFAP CIRPAC. Guadalajara, Jalisco, México. pp. 7-32
- Villanueva-Díaz, J., Cerano, J. P., Stahle, D. W., Therrell, M. D., Vázquez-Selem, L., Morán-Martínez, R., Luckman, B. H. y Morán, M. (2006). Árboles viejos del centro-norte de México: Importancia ecológica y paleoclimática. Folleto Científico No. 20. INIFAP CENID-RASPA. Gómez Palacio, Durango. 46 pp. <https://doi.org/10.5154/r.rchsa.2012.06.036>
- Villanueva Díaz, J., Cerano-Paredes, J., Stahle, D. W., Constante-García, V., Vázquez-Salem, L., Estrada Ávalos, J., Benavides-Solorio, J. de D. (2010). Árboles longevos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, (2), 7-30. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v1i2.634>
- Villanueva Díaz, J., Constante García, V., Cerano Paredes, J. y Martínez Cifuentes, A. R. (2014). La cuenca San Martín y situación del ahuehuate (*Taxodium mucronatum* ten.) en el río sabinas, Coahuila.
- Waring, K. M., Reboletti, M. D., Mork, L. A., Huang, C. H., Hofstetter, W. R., Garcia, M. A., Fulé, P. Z. y Davis, T. S. (2009). Modeling the impacts of two bark beetle species under warming climate in the southwestern USA: Ecological and economic consequences. *Environmental Management*, 44(4), 824-835. <http://doi.org/10.1007/s00267-009-93424>
- Warren, D. y Seifert, S. N. (2011). Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological Application*, 21, 335-342. <https://doi.org/10.1890/10-1171.1>
- Watanabe, M., Suzuki, T., O'ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekigushi, M., Takata, K., Yamasaki, D., Yakohata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe H. y Kimoto, M. (2010). Improved climate

simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. *Journal of Climate*, 23(23), 6312-6335. <https://doi.org/10.1175/2010jcli3679.1>

Zhang, Y., Tan, N., Huang, H., Jia, R., Zeng, G. y Ji, C. (2005). Three bioactive biflavones isolated from {sl *Taxodium mucronatum*}. *Acta Botánico Yunnanica*, 27(1), 107-110.

Zonneveld, M., A. Jarvis, W. Dvorak, G. Lema and C. Leibing. 2009. Climate change impact predictions on *Pinus patula* and *Pinus tecunumanii* populations in México and Central America. *Forest Ecology and Management*, 257, 1566-1576. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.12.027>