



DOI: 10.29298/rmcf.v16i87.1510

Artículo de Investigación

**Modelado espacial de *Guazuma ulmifolia* Lam. ante el  
cambio climático en México**  
**Spatial modeling of *Guazuma ulmifolia* Lam. in the face  
of climate change in Mexico**

Noé Durán Puga<sup>1</sup>, Diego Raymundo González Eguiarte<sup>1\*</sup>, José Ángel  
Martínez Sifuentes<sup>2</sup>, Miguel Prado López<sup>3</sup>

Fecha de recepción/Reception date: 8 de agosto de 2024.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 7 de noviembre de 2024.

<sup>1</sup>Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara. México.

<sup>2</sup>Centro Universitario de Los Altos, Universidad de Guadalajara. México.

<sup>3</sup>Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.

\*Autor para correspondencia; correo-e: diegonz@cucba.udg.mx

\*Corresponding author; e-mail: diegonz@cucba.udg.mx

### Resumen

*Guazuma ulmifolia* crece en las zonas tropicales y cálido-húmedas de América Latina. Posee buenas cualidades forrajeras y es de rápido crecimiento; ofrece hojas palatables, buena calidad nutricional para el ganado y capacidad para producir forraje y frutos durante la época seca. El objetivo del presente estudio fue modelar las áreas con probabilidad de aptitud ambiental y las posibles modificaciones por efecto del cambio climático para *Guazuma ulmifolia* en México. Con el uso de *MaxEnt*, y con base en 25 variables bioclimáticas y las imágenes de altitud, pendiente y textura de suelo, se modeló la distribución de la especie para 1961-2010 (climatología de referencia) y para 2041-2060 (2050). Los datos climáticos para el primer periodo se obtuvieron del Sistema de Información Agroclimática (Siamexca), y para el escenario futuro (2050) se trabajó con un modelo ensamble, derivado de 11 modelos de circulación general de *WorldClim*. Los resultados mostraron que las variables que más contribuyeron a la idoneidad ambiental de la especie fueron la temperatura mínima extrema, la precipitación del cuatrimestre más cálido, la oscilación térmica y la temperatura máxima de verano; las mejores áreas se localizaron en la Península de Yucatán, Istmo de Tehuantepec, zonas costeras del Pacífico desde Chiapas hasta el sur de Sonora y zonas costeras del Golfo de México, desde Tabasco hasta el sur de Tamaulipas. El cambio climático propiciará una dinámica de expansión de áreas con aptitud ambiental alta que en el escenario actual son de aptitud ambiental media, principalmente en el centro y norte de México.

**Palabras clave:** Aptitud ambiental, descriptores ecológicos, *Guazuma ulmifolia* Lam., *MaxEnt*, modelos de distribución, Siamexca.

### Abstract

*Guazuma ulmifolia* grows in tropical and warm-humid areas of Latin America. It has good forage qualities and is fast-growing; it offers palatable leaves, good nutritional quality for livestock and the ability to produce forage and fruits during the dry season. The objective of this study was to model the areas with probable environmental suitability and the possible modifications due to climate change for *Guazuma ulmifolia* in Mexico.

Using MaxEnt, and based on 25 bioclimatic variables and images of altitude, slope and soil texture, the distribution of the species was modeled for 1961-2010 (reference climatology) and for 2041-2060 (2050). The climatic data for the first period were obtained from the Agroclimatic Information System (Siamexca), and for the future scenario (2050) an ensemble model was used, derived from eleven general circulation models from WorldClim. The results showed that the variables that contribute most to the environmental suitability of the species are the extreme minimum temperature, the precipitation of the warmest quarter, the thermal oscillation and the maximum temperature of summer; the best areas are located in the *Yucatan* Peninsula, the Isthmus of *Tehuantepec*, coastal areas of the Pacific Ocean from *Chiapas* state to the South of *Sonora* state and coastal areas of the Gulf of Mexico, from *Tabasco* state to the South of *Tamaulipas* state. Climate change will promote a dynamic expansion of areas with high environmental suitability that in the current scenario are of medium environmental suitability, mainly in Central and Northern Mexico.

**Key words:** Environmental suitability, ecological descriptors, *Guazuma ulmifolia* Lam., MaxEnt, distribution models, Siamexca.

## Introducción

En México existe una gran riqueza de especies de uso agrícola y ganadero; *Guazuma ulmifolia* Lam., conocido con los nombres comunes de guácimo, guazamo, caulote, pixoy, guácimo de ternero, majagua de toro, yaco y granadillo es un árbol que crece comúnmente en las zonas tropicales y zonas cálido-húmedas de América Latina. Se incluye en el grupo de especies secundarias y de bosques jóvenes abiertos, ya que tiene un potencial de adaptación a suelos húmedos, secos y compactados o con textura arenosa (Casanova-Lugo et al., 2014; Gerber et al., 2020; Manríquez-Mendoza et al., 2011). Está presente en México, Cuba, Guatemala, Honduras, Ecuador, Bolivia, Brasil, Barbuda, Argentina, Bahamas, Barbados, Colombia, República Dominicana, Granada, Haití, Jamaica, Nicaragua, Costa Rica, Panamá, Paraguay, Perú, Puerto Rico, San Vicente y las Granadinas, Trinidad y Tobago e Islas Vírgenes (Araujo et al., 2020; Kumar & Gurunani, 2019). La especie es originaria del Caribe y América Tropical (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2022; Matulevich & García, 2016).

Especie de rápido crecimiento (Gerber et al., 2020; Mayren-Mendoza et al., 2018), con hojas palatables de buena calidad nutricional para el ganado y gran capacidad

para producir forraje, *Guazuma ulmifolia* conserva dicho material, así como los frutos durante la época seca (Casanova-Lugo et al., 2014; Manríquez-Mendoza et al., 2011; Rojas-Hernández et al., 2015). Los árboles de guácimo se usan en predios como cercos vivos, en los potreros proporcionan sombra para los animales, frutos para la fauna silvestre, valioso néctar para la producción de miel, buena calidad de leña, frutos, hojas, corteza, raíz y flor con propiedades medicinales y múltiples efectos restauradores (Jiménez et al., 2019; Matulevich & García, 2016).

El clima es uno de los factores que delimitan la distribución de las plantas; cada especie tiene un intervalo de tolerancia a diversos factores ambientales y a ciertas condiciones de temperatura, humedad y luz para germinar, crecer, florecer y fructificar (Gutiérrez & Trejo, 2014). En la actualidad, el cambio climático está ocasionando variaciones ambientales regionales y globales en la temperatura y en la precipitación (Ramírez-Magil et al., 2020). Estos cambios afectan la fenología y la distribución de las plantas, por sus requerimientos específicos de luz y de humedad para su desarrollo y supervivencia (Parmesan, 2006; Ramírez-Magil et al., 2020).

Para detectar los impactos del medio ambiente en los taxones, existe una variedad de modelos que incorporan variables bioclimáticas a partir de los datos de los sitios de presencia de las especies y se asume que, para algunas de ellas, el clima y la humedad del suelo son algunos de los factores más importantes en su distribución (Hof, 2010; Ramírez-Magil et al., 2020). Dichos modelos son valiosas herramientas que, junto con los sistemas de información geográfica (SIG), permiten modelar la distribución actual y futura de diversas especies (Navarro-Martínez et al., 2018).

Diferentes algoritmos se utilizan para tal propósito (Velázquez-Hernández et al., 2023). *MaxEnt*, solo necesitar datos de accesiones georreferenciadas, por lo que ofrece ventajas con respecto a otros programas, además puede utilizar datos continuos o categorizados, sus algoritmos son eficientes y garantizan la óptima distribución de la probabilidad de máxima entropía (Quesada-Quirós et al., 2017). Así, el objetivo del presente estudio fue modelar las áreas con probabilidad de

aptitud ambiental y las posibles modificaciones por efecto del cambio climático para *Guazuma ulmifolia* en México con el uso de Máxima Entropía y con base en variables bioclimáticas, de altitud, textura y pendiente del suelo.

## **Materiales y Métodos**

### **Bases de datos biológicos**

Se utilizó una base de datos de 4 910 sitios de muestreo del Inventario Nacional Forestal y Suelos (Infys) de la Comisión Nacional Forestal (Conafor, 2018); esta base de datos fue depurada, se descartaron coordenadas duplicadas y registros sin localidad. Los registros fueron ubicados en el espacio geográfico y se revisó que la ubicación de los puntos fuese congruente con su distribución histórica reconocida a nivel regional (Monterrubio-Rico *et al.*, 2016).

### **Bases de datos climáticos y sistema de información geográfica**

Se usaron los datos de precipitación y temperatura de los periodos 1961-2010 (climatología de referencia) y 2041-2060 (con dos trayectorias representativas de concentración de gases de efecto invernadero rcp4.5 y rcp8.5). Los datos climáticos

para la climatología de referencia se obtuvieron del Sistema de Información Agroclimático para México y Centroamérica (Siamexca) (Ruiz-Corral et al., 2018); y para el escenario 2050 se trabajó con un modelo ensamble a partir del valor de la mediana de 11 modelos de circulación general del portal de *Global Climate Data* de *WorldClim* (United States Geological Survey [USGS], 2017) y se trabajaron mediante imágenes *raster* y *ascii* a 30 segundos de arco.

Estos modelos se incluyen en la modelación del clima desarrollado en el proyecto de intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5) (Ruiz-Corral et al., 2016). A partir de las variables climáticas básicas se derivaron variables adicionales (Cuadro 1) para realizar el análisis *MaxEnt* de los modelos de distribución.

**Cuadro 1.** Variables utilizadas para modelar la aptitud ambiental actual y potencial de *Guazuma ulmifolia* Lam. en México.

<b>Variables ambientales</b>	
<i>T</i> máxima media anual	<i>T</i> mínima del mes más frío
<i>T</i> máxima del periodo más húmedo	<i>P</i> acumulada anual
<i>T</i> máxima del periodo más seco	<i>P</i> del periodo más húmedo
<i>T</i> máxima del trimestre más cálido	<i>P</i> acumulada del periodo más seco
<i>T</i> media anual	<i>P</i> del mes más seco
<i>T</i> media del periodo más húmedo	<i>P</i> del mes más húmedo
<i>T</i> media del periodo más seco	<i>P</i> del trimestre más húmedo
<i>T</i> media del mes más cálido	<i>P</i> del trimestre más seco
<i>T</i> media del mes más frío	<i>P</i> del cuatrimestre más cálido
<i>T</i> media cuatrimestre más cálido	<i>P</i> del cuatrimestre más frío
<i>T</i> media del cuatrimestre más frío	Oscilación térmica (°C)
<i>T</i> mínima media anual	Pendiente del suelo (%)
<i>T</i> mínima del periodo más húmedo	Textura del suelo (tipo)
<i>T</i> mínima del periodo más seco	Altitud (msnm)

*T* = Temperatura (°C); *P* = Precipitación (mm)

La implementación de estos parámetros y la generación de las imágenes *raster* respectivas se hizo con el sistema *Idrisi Selva* (Eastman, 2012). Las variables climáticas y edáficas para el análisis de este estudio son las que normalmente se utilizan para la potencialidad territorial de especies vegetales (Moreno *et al.*, 2011).

### **Selección de variables**

Para seleccionar las variables se realizó una extracción de datos a partir de las imágenes *raster*, mediante el *software ArcMap* versión 10.8 (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2013) con la herramienta *SDM Toolbox*. Con los datos extraídos de las 28 variables de los puntos de presencia se construyó una matriz de datos en *Excel* de *Microsoft*. Previo a la ejecución de los análisis estadísticos, se aplicó la prueba de *Shapiro-Wilk* para verificar la normalidad de los datos, y no se detectó normalidad ( $P < 0.05$ ) para ninguna variable.

Para seleccionar un conjunto de variables que contribuyan más a los modelos y para eliminar la multicolinealidad se hizo una correlación de *Spearman* con un valor umbral de correlación  $r > 0.9$  (Hebbar *et al.*, 2022). De las variables con colinealidad se escogió la que se consideró de mayor relevancia para la existencia de la especie. Para los análisis de correlación se utilizaron los datos de la Matriz de Variables; este análisis estadístico se llevó a cabo con programas desarrollados en el *software R* versión 4.05 (R Core Team, 2023) y con los datos normalizados.

## Modelado del nicho ecológico

La selección de covariables candidatas, previo a la obtención del modelo, es un proceso crucial; por ello, es necesario hacer un análisis de correlación entre covariables para eliminar la autocorrelación (Elith et al., 2011), y así evitar la inestabilidad y eliminar la posibilidad de obtener un modelo sobreajustado o sobreparametrizado (Cobos et al., 2019).

El modelado se realizó con *MaxEnt* y con el paquete *Kuenm* en R (Cobos et al., 2019; R Core Team, 2023), mismo que automatiza los procesos para obtener el modelo del Nicho Ecológico (ENM). *Kuenm\_ceval* crea modelos candidatos con datos de ocurrencia y de predictores ambientales, esta función ajusta el rendimiento de los modelos por medio de la significancia estadística con la función *cal eval*, además de la calidad relativa del modelo; la evaluación se hace mediante el Criterio de Información de *Akaike* (*AIC*) (Cobos et al., 2019), el cual también permite evaluar numerosos factores multiplicadores de regularización (RM), combinaciones de clases (FC), diferentes grupos de predictores ambientales, y crea la tasa de omisión permisible (OR). Para cada configuración de parámetros se crea un modelo basado en el conjunto completo de ocurrencias y otro basado solo en datos de entrenamiento.

En la presente investigación se probaron modelos en un orden secuencial con seis tipos de clases (FC) con todas las posibles combinaciones de L, LQ, H, LQH, LQHP, LQHPT (donde L=Lineal, Q=Cuadrática, H=Bisagra, P=Producto, T=Umbral), y los valores del multiplicador de regularización (RM) de 0.1 a 10 en intervalos de 0.1; se estableció una tasa de omisión máxima de 5 % y se corrió a 25 k réplicas de cada configuración con 500 interacciones (Camacho-Portocarrero et al., 2021; Cobos et al., 2019; Velázquez-Hernández et al., 2023). Los sitios de ocurrencia de *G.*

*ulmifolia* y las imágenes en formato *ascii* para cuatro variables seleccionadas se utilizaron en la elaboración de ENM con el paquete *Kuenm* en R.

En este estudio se desarrollaron modelos finales para *G. ulmifolia* a partir del conjunto completo de ocurrencias y las parametrizaciones seleccionadas. Para obtener modelos robustos se generaron cinco réplicas con salidas logísticas y se transfirieron estos modelos a los escenarios actual y futuro; y así, se crearon los modelos finales evaluados sin riesgo de extrapolación.

### **Modelos finales, evaluación y riesgo de extrapolación**

Para la evaluación final del modelo se utilizó el análisis de la curva *ROC* parcial con tasas de omisión ( $E=5\%$ ). Los modelos finales y sus evaluaciones se llevaron a cabo con las funciones *kuenm mod* y *kuenm feval* (Cobos *et al.*, 2019). Se utilizó la media de todas las réplicas en todos los parámetros para consolidar los resultados de la especie. Los riesgos de extrapolación en las transferencias de modelos, se identificaron mediante un análisis de *MOP* con la función *kuenm\_mmop*.

Finalmente, se obtuvieron mapas para representar las áreas con aptitud ambiental media-baja (probabilidad  $\leq 0.50$ ) y aptitud ambiental alta (probabilidad  $> 0.50$ ) de la especie, para representar el área de distribución actual y potencial se usó el umbral del *Balance Training Omission, Predicted Area y Threshold Value*.



## Resultados y Discusión

### Selección de variables

A partir del análisis de correlación de *Spearman* fue posible eliminar la colinealidad entre variables (Hebbar et al., 2022), por lo que de las 28 variables originales permanecieron únicamente 9 que fueron utilizadas en posteriores análisis.

### Modelación de la distribución potencial de *G. ulmifolia*

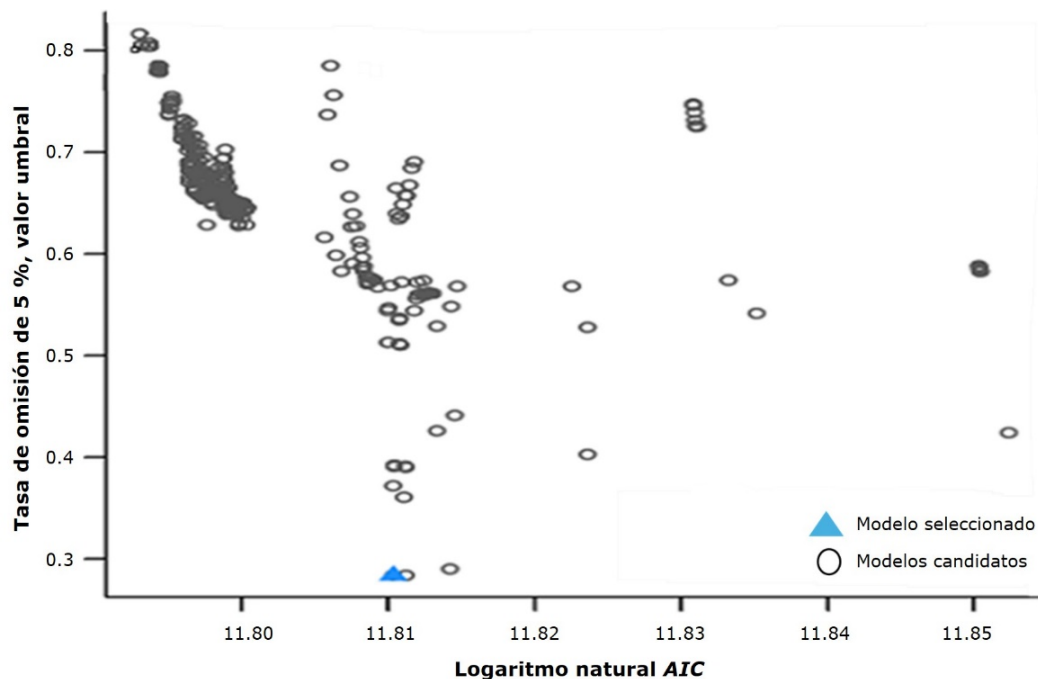
Mediante el modelo de nicho ecológico, el paquete *Kuenm* permitió optimizar el número de variables ambientales en solo cuatro, por su mayor contribución a la presencia y distribución de *G. ulmifolia*. Los resultados de la prueba estadística *Jackknife* se utilizaron para comprobar la certeza y la participación de cada variable de forma individual, la cual tiene como función principal correr cada modelo con cada variable por si sola para medir el aporte de la variable particular (Quesada-Quirós et al., 2017). La predicción mostró que las variables ambientales (Cuadro 2) que más influyeron en la aptitud ambiental y en la distribución potencial de *G. ulmifolia* fueron la temperatura mínima extrema (69.3 %), la precipitación del cuatrimestre más cálido (28.8 %), la oscilación térmica (1.4 %) y la temperatura máxima de verano (0.5 %).

**Cuadro 2.** Selección de variables ambientales (%) sin problemas de ajuste para modelar la aptitud ambiental actual y potencial de *Guazuma ulmifolia* Lam. en México.

<b>Variables ambientales</b>	<b>Contribución</b>	<b>Permutación</b>
<i>T</i> mínima del mes más frío	69.3	69.8
<i>P</i> del cuatrimestre más cálido	28.8	21.5
Oscilación térmica anual	1.4	4.9
<i>T</i> máxima de mayo a octubre	0.5	3.8

*T* = Temperatura (°C); *P* = Precipitación (mm).

Se obtuvieron 372 modelos candidatos con el paquete *Kuenn* en R (Figura 1); todos fueron significativos; es decir, los modelos coincidieron con la prueba de los datos de ocurrencia con más frecuencia mediante la asociación aleatoria de puntos y una predicción del área determinada; sin embargo, solo uno cumplió con el criterio de *Akaike* ( $AIC=0$ ) y una tasa de omisión máxima de 5 %; el modelo seleccionado presentó un valor del área bajo la curva (*AUC*) de 0.88, por lo general los valores de 0.7 a 0.9 de *AUC* tienen una aplicación útil en el modelo (Quesada-Quirós *et al.*, 2017).



**Figura 1.** Modelos obtenidos y evaluados con el paquete *Kuenm* para *Guazuma ulmifolia* Lam. en México.

El paquete *Kuenm* en R implementado con *MaxEnt* estableció que 10 fue el multiplicador de regularización adecuado para representar el área de distribución de la especie. La calidad del modelo se evaluó con el valor *AUC* de la curva *ROC* y el Criterio de Información de *Akaike* (Cobos et al., 2019).

### Descriptorios ecológicos

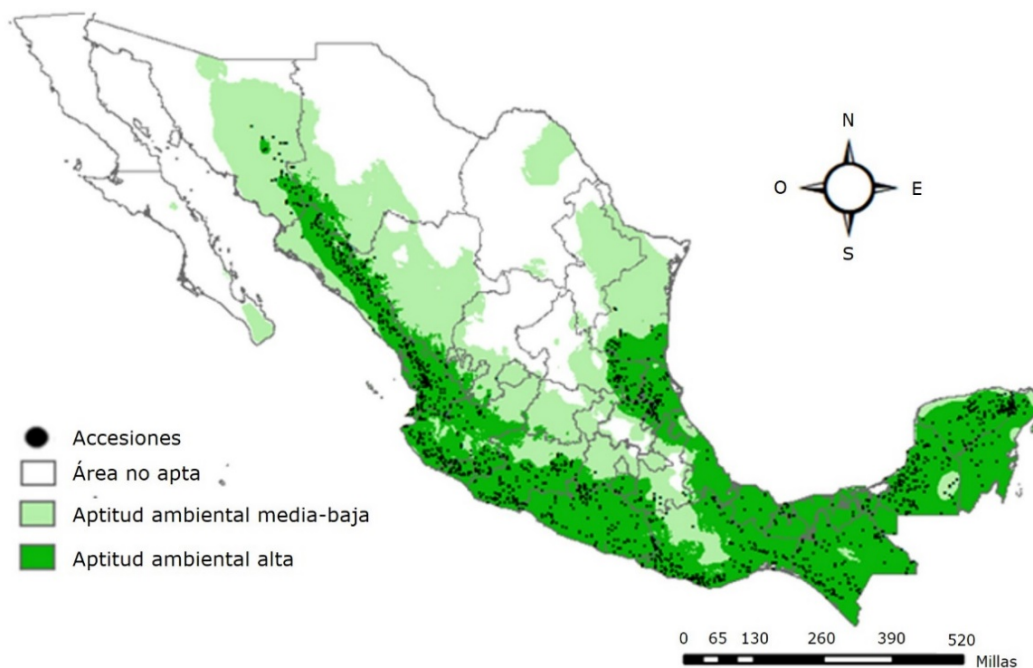
En el Cuadro 3 se observa un amplio intervalo, tanto de temperatura como de precipitación en la distribución de la especie; se ha señalado que los determinantes ambientales e históricos de los patrones de la riqueza de las especies, como la evapotranspiración potencial global, el número de días húmedos por año y la heterogeneidad topográfica y del hábitat son los predictores más importantes de la riqueza de especies de plantas vasculares (López-Mata et al., 2012).

**Cuadro 3.** Descriptorios ecológicos de las variables ambientales que contribuyen en la distribución geográfica de *Guazuma ulmifolia* Lam. en México.

Variable ambiental	Valor mínimo	Valor máximo	Media	Desviación estándar
Temperatura mínima del mes más frío	0.5	21.5	13.4	3.6
Precipitación del cuatrimestre más cálido	362	2 398	893	287
Temperatura máxima del periodo más húmedo	20.3	37	32.4	1.9
Oscilación térmica (°C)	8.7	19.3	14.2	2

Temperatura (°C); Precipitación (mm).

La temperatura mínima extrema y la lluvia acumulada del cuatrimestre más cálido fueron las variables que más contribuyeron en la distribución geográfica de *G. ulmifolia* en México (Cuadro 3). Algunas accesiones que se ubicaron al norte de México, específicamente en la cadena montañosa de Chihuahua y Durango (Figura 2), prosperaron a una temperatura mínima extrema de 0.5 °C; otras accesiones localizadas al sur de Sonora lo hicieron a una temperatura máxima extrema de 37 °C; estos intervalos de temperatura coinciden con lo señalado por la FAO (2022), quien indica que *G. ulmifolia* se desarrolla en zonas con temperaturas de 10 hasta de 36 °C, lo que concuerda con lo señalado por Martínez y Sánchez (2016), autores que refieren un intervalo de 25 a 35 °C como temperatura óptima para la germinación de la especie.



**Figura 2.** Área con aptitud ambiental para el periodo 1961-2010 de *Guazuma ulmifolia* Lam. en México.

La precipitación del cuatrimestre más cálido (junio a septiembre) también es una de las variables que más contribuyeron a explicar la distribución geográfica de la especie (Cuadro 3). De acuerdo con los valores de la precipitación pluvial, *G. ulmifolia* se distribuye entre los 362 y 2 398 mm, lo que coincide con Manríquez-Mendoza et al. (2011) quienes especifican que en la parte central del estado de Veracruz, la especie ha evolucionado en regiones donde las precipitaciones son estacionales y muy marcadas, con periodos secos de hasta ocho meses.

Araujo et al. (2019) refieren que el taxón se distribuye desde los 600 a 1 500 mm, pero puede desarrollarse bien en áreas con precipitaciones anuales de 2 500 mm. FAO (2022) establece que la especie crece en zonas donde la lluvia anual es de al menos de 500 mm. Villa-Herrera et al. (2009) indican que se desarrolla ampliamente en las zonas húmedas y subhúmedas de los bosques tropicales de México.

### **Modelación de la aptitud ambiental actual para *G. ulmifolia***

De acuerdo con los resultados, el área con probabilidad de aptitud ambiental (Figura 2), tiene una extensión de 1 284 224 km<sup>2</sup>, y se localiza en las zonas costeras del Pacífico desde Sonora hasta Chiapas, el Eje Volcánico Transversal, la Península de Yucatán, el Istmo de Tehuantepec y las zonas costeras del Golfo de México, desde Tabasco hasta el sur de Tamaulipas. Esta información es acorde con lo señalado por Casanova-Lugo et al. (2014), quienes mencionan que *G. ulmifolia* crece de forma natural en el sur de México, en grandes extensiones de bosques tropicales y subtropicales húmedos y subhúmedos; cerca de la vertiente del Golfo, desde

Tamaulipas hasta la península de Yucatán y en la vertiente del Pacífico, en zonas abiertas con diversos tipos de vegetación: costera, matorral espinoso, selva subperennifolia y caducifolia, pastizal, bosques de encinos, manglar, ruderal y selva alta perennifolia; *G. ulmifolia* es de crecimiento secundario y se considera como indicadora de zonas perturbadas.

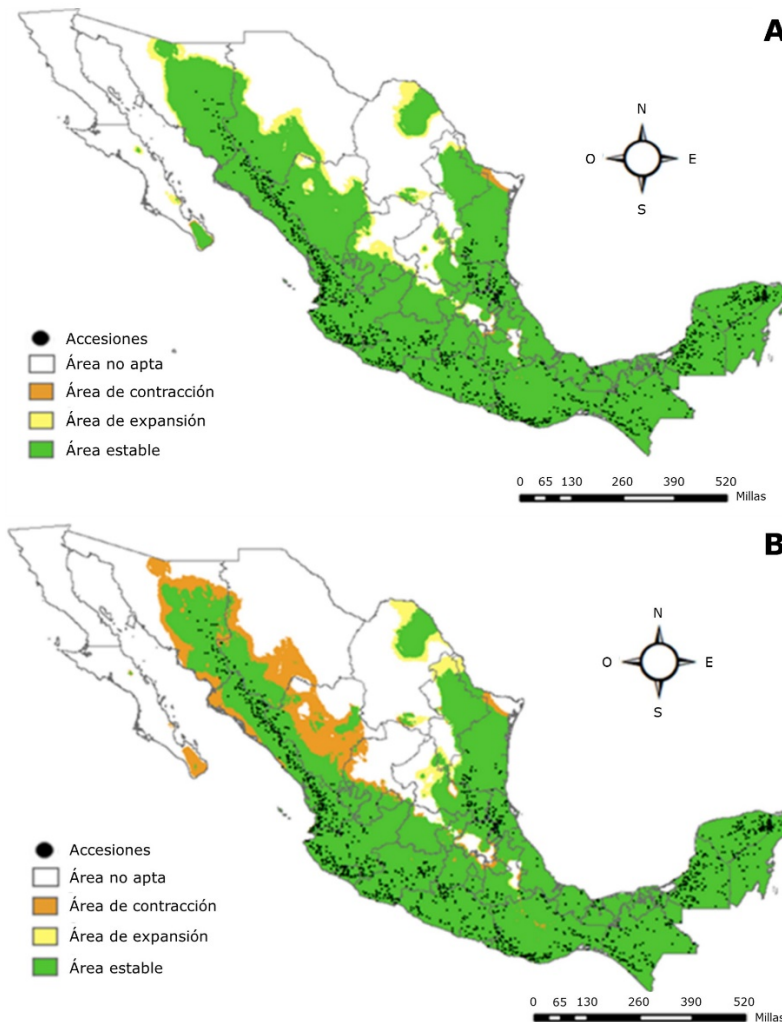
Villa-Herrera et al. (2009) indican que es una especie nativa de América y se adapta a altitudes que de 0 a 1 500 m; además, se alude que es una especie arbórea muy abundante que crece de manera silvestre en Veracruz. Por su gran adaptación a las condiciones edafoclimáticas y de manejo adverso, es un recurso potencial para incluirse en sistemas silvopastoriles con el propósito de producir forraje para la alimentación del ganado. Manríquez-Mendoza et al. (2011) mencionan que, en México, esta especie ha sido evaluada en bancos forrajeros, sistemas agrosilvopastoriles, en llanuras costeras, cordilleras, montañas y altiplanos de Veracruz y Chiapas.

Las zonas con aptitud ambiental media se localizan en gran parte del estado de Sonora, sur de Chihuahua, gran parte de Durango, sur de Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato, parte de Michoacán y Jalisco, además de algunas zonas del norte de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas.

## **Modelación de la aptitud ambiental ante el cambio climático**

En los mapas de la Figura 3 se observa que por el efecto del cambio climático se mantendrá gran parte de la superficie con aptitud ambiental estable, pero el modelo predice una dinámica de contracción y de expansión en ambos escenarios climáticos (Cuadro 4). Así, las áreas de expansión serán favorecidas con 2 % en el escenario

optimista (rcp4.5); las superficies que en la climatología actual tienen aptitud ambiental media, se convertirán en el futuro (2050) en lugares con aptitud ambiental alta. También, el modelo predice que se registrará una contracción de áreas con aptitud ambiental en el escenario pesimista (rcp8.5); el área que en la condición actual registra aptitud ambiental media se contraerá hasta en 14 %.



A = Escenario 2050 con rcp4.5; B = Escenario 2050 con rcp8.5.

**Figura 3.** Áreas con aptitud ambiental estable, en expansión y contracción, para el escenario 2050 para *Guazuma ulmifolia* Lam. en México.

**Cuadro 4.** Áreas con aptitud ambiental de expansión, de contracción y estable (km<sup>2</sup>) para *Guazuma ulmifolia* Lam. con el clima de referencia y con dos escenarios de cambio climático en México.

<b>Escenario climático</b>	<b>Áreas con AA</b>	<b>Expansión</b>	<b>Contracción</b>	<b>Estable</b>
1961-2010	1 284 224.3			
2050 rcp4.5	1 309 245.1	30 868.9	5 848.1	1 278 376.1
2050 rcp8.5	1 106 026.4	4 096.7	182 294.6	1 101 929.6

AA = Aptitud ambiental.

Este efecto está en correspondencia con lo citado por Gutiérrez y Trejo (2014) y Parmesan (2006), quienes consignan que con el efecto del cambio climático los ecosistemas presentarán alteraciones en la distribución y abundancia de especies, o en la desaparición directa de algunas poblaciones. Los autores también, refieren que las especies tenderán a modificar su distribución hacia latitudes y altitudes diferentes a las que se encuentran hoy en día; particularmente, el efecto será más severo para las especies que se ubiquen en ecosistemas geográficamente confinados, como las montañas, ya que serán más sensibles a los cambios de las condiciones climáticas. Benton et al. (2022) citan que las angiospermas tienen una gran propensión a adaptarse y a evolucionar, ya que su fisiología y anatomía les permiten capturar energía y Carbono más rápido que otras plantas, lo que ayuda a impulsar su alta riqueza de especies en la actualidad.

La superficie con aptitud ambiental que se pronostica para los escenarios futuros, cubrirá totalmente los estados de Aguascalientes, Guerrero, Oaxaca, Jalisco, Nayarit y Sinaloa, así como gran parte de Guanajuato, Durango, Tamaulipas, Nuevo León, Coahuila, Chihuahua, Sonora, Zacatecas, Querétaro, San Luis Potosí, Estado de México, Morelos y Puebla. Es importante señalar que algunas áreas que se expanden con el escenario optimista, se contraerán en el escenario pesimista; estas



últimas se ubicarán en gran parte de los estados de Sonora, Chihuahua y Durango y una mínima proporción en Sinaloa, Zacatecas y Tamaulipas.

## Conclusiones

Las áreas con aptitud ambiental para *Guazuma ulmifolia* en México, se localizan principalmente en las zonas costeras del Golfo de México y del océano Pacífico, del Eje Volcánico Transversal, del Istmo de Tehuantepec y de la Península de Yucatán.

Los efectos del cambio climático para *G. ulmifolia* en México, previstos para el año 2050, representan una alteración en las áreas con aptitud ambiental. Áreas que en el escenario actual son de aptitud ambiental media, en el futuro se convertirán en áreas de aptitud ambiental alta con el escenario optimista.

Las alteraciones se localizarán principalmente en el Eje Volcánico Transversal, la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Oriental.

La predicción *MaxEnt* refleja que la precipitación pluvial en el cuatrimestre más cálido del año (junio a septiembre), la temperatura máxima del periodo más húmedo, la temperatura mínima extrema y la oscilación térmica son las variables que contribuyen con mayor porcentaje para explicar la aptitud ambiental de *G. ulmifolia* en México.

*G. ulmifolia* es una especie que se adapta a un amplio intervalo de condiciones, tanto de precipitación como de temperatura, lo que le confiere ventajas adaptativas en ambientes con variación climática.

## **Agradecimientos**

Los autores agradecen a la Comisión Nacional Forestal (Conafor) por proporcionar información de campo de la especie bajo estudio.

## **Conflictos de intereses**

Los autores declaran que no tienen conflictos de intereses ni relaciones personales que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

## **Contribución por autor**

Noé Durán Puga: planeación de la investigación, planeación del manuscrito, ejecución de análisis, revisión de escritos durante todo el proceso y correcciones solicitadas por los revisores; Diego Raymundo González Eguiarte: planeación de la investigación, planeación del manuscrito, revisión de escritos durante todo el proceso; José Ángel Martínez Sifuentes: contribución en la ejecución de análisis, revisión del manuscrito en etapas iniciales; Miguel Prado López: revisión del manuscrito en sus etapas iniciales y participación en su planeación.

## **Referencias**

Araujo, P. G., Peixoto A., N. M., Arruda, H. S., Farias, D. de P., Molina, G. & Pastore, G. M. (2019). Phytochemicals and biological activities of mutamba (*Guazuma ulmifolia* Lam.): A review. *Food Research International*, 126, 108713. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108713>

- Araujo, P. G., Arruda, H. S., Rodrigues de M., D., Peixoto A., N. M. & Pastore, G. M. (2020). Mutamba (*Guazuma ulmifolia* Lam.) fruit as a novel source of dietary fibre and phenolic compounds. *Food Chemistry*, 310, Article 125857. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125857>
- Benton, M. J., Wilf, P. & Sauquet, H. (2022). The angiosperm terrestrial revolution and the origins of modern biodiversity. *New Phytologist*, 233(5), 2017-2035. <https://doi.org/10.1111/nph.17822>
- Camacho-Portocarrero, R. F., Duarte-Gándica, I. y Altamiranda-Saavedra, M. (2021). Áreas en riesgo de invasión por *Procambarus clarkii* (Decapoda:Cambaridae) un cangrejo de río introducido en Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 69(1), 77-89. <https://doi:10.15517/rbt.v69i1.41493>
- Casanova-Lugo, F., Petit-Aldana, J., Solorio-Sánchez, F. J., Parsons, D. & Ramírez-Áviles, L. (2014). Forage yield and quality of *Leucaena leucocephala* and *Guazuma ulmifolia* in mixed and pure fodder banks systems in Yucatan, Mexico. *Agroforestry Systems*, 88, 29-39. <https://doi.org/10.1007/s10457-013-9652-7>
- Cobos, M. E., Peterson, A. T., Barve, N. & Osorio-Olvera, L. (2019). Kuenm: an R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, 7, Article e6281. <https://doi.org/10.7717/peerj.6281>
- Comisión Nacional Forestal. (2018). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Informe de Resultados 2009-2014* (1ª Edición). Comisión Nacional Forestal <https://old-snigf.cnf.gob.mx/wp-content/uploads/Resultados%20Hist%C3%B3ricos%20INFyS/2009%20-%202014/Informe%20de%20resultados/Informe%20inventario%202009%20-%202014.pdf>
- Eastman, J. R. (2012). *IDRISI: Guía para SIG y procesamiento de imágenes*. Clark Labs, Clark University. <https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/10/IDRISI-Selva-Spanish-Manual.pdf>

- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E. & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of *MaxEnt* for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43–57. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.0072>
- Environmental Systems Research Institute. (2013). *ArcGIS Desktop: Release 10.2.0.3348*. ESRI. <http://www.esri.com>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2022). *ECOCROP. Database of Crop Constraints and Characteristics*. GAEZ Data Portal. <https://gaez.fao.org/pages/ecocrop>
- Gerber, D., Topanotti, L. R., Romero G., M., Corrêa V., F. M., Stolarski, O. C., Nicoletti, M. F. & Campanhã B., F. (2020). Performance of *Guazuma ulmifolia* Lam. in subtropical forest restoration. *Scientia Forestalis*, 48(127), Article e3045. <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr127/2318-1222-scifor-48-127-e3045.pdf>
- 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(1), 179-188. <https://doi.org/10.7550/rmb.37737>
- Hebbar, K. B., Abhin, P. S., Sanjo J., V., Neethu, P., Santhosh, A., Shil, S. & Prasad, P. V. V. (2022). Predicting the potential suitable climate for coconut (*Cocos nucifera* L.) cultivation in India under climate change scenarios using the MaxEnt model. *Plants*, 11(6), 731. <https://doi.org/10.3390/plants11060731>
- Hof, C. (2010). *Species distributions and climate change: current patterns and future scenarios for biodiversity* [Doctoral thesis, University of Copenhagen]. YUMPU. <https://www.yumpu.com/en/document/view/28454797/species-distributions-and-climate-change-biologisk-institut>
- Jiménez R., E. R., Fonseca G., W. y Pazmiño P., L. (2019). Sistemas silvopastoriles y cambio climático: Estimación y predicción de biomasa arbórea. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 29(1), 45-55. <https://doi.org/10.17163/lgr.n29.2019.04>
- Kumar, N. S. & Gurunani, S. G. (2019). *Guazuma ulmifolia* Lam.: A review for future view. *Journal of Medicinal Plants Studies*, 7(2), 205-210. <https://www.plantsjournal.com/archives/2019/vol7issue2/PartC/7-2-29-548.pdf>

- López-Mata, L., Villaseñor, J. L., Cruz-Cárdenas, G., Ortiz, E. y Ortiz-Solorio, C. (2012). Predictores ambientales de la riqueza de especies de plantas del bosque húmedo de montaña de México. *Botanical Sciences*, 90(1), 27-36. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-42982012000100004](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-42982012000100004)
- Manríquez-Mendoza, L. Y., López-Ortíz, S., Pérez-Hernández, P., Ortega-Jiménez, E., López-Tecpoyotl, Z. G. & Villarruel-Fuentes, M. (2011). Agronomic and forage characteristics of *Guazuma ulmifolia* Lam. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, 453-463. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n2/v14n2a1.pdf>
- Martínez, J. y Sánchez, J. A. (2016). Incremento de la germinación en semillas de *Guazuma ulmifolia* (Malvaceae) por ciclos de hidratación-deshidratación y fluctuaciones en la temperatura. *Acta Botánica Cubana*, 215(3), 352-360. <https://revistasgeotech.com/index.php/abc/article/view/147>
- Matulevich P., J. y García R., J. (2016). Composición Química del aceite esencial de hojas de *Guazuma ulmifolia* (Malvaceae). *Scientia et Technica*, 21(3), 269-272. <https://www.redalyc.org/pdf/849/84950585010.pdf>
- Mayren-Mendoza, F. J., Rojas-García, A. R., Maldonado-Peralta, M. A., Ramírez-Reynoso, O., Herrera-Pérez, J., Torres-Salado, N., Sánchez-Santillán, P., Bottini-Luzardo, M. B. & Hernández-Garay, A. (2018). Comportamiento productivo de ovinos Pelibuey en pastoreo suplementados con follaje de *Guazuma ulmifolia* Lam. *Agroproductividad*, 11(5), 29-33. [https://ri.uagro.mx/bitstream/handle/uagro/1345/AT\\_14241\\_18.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ri.uagro.mx/bitstream/handle/uagro/1345/AT_14241_18.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Monterrubio-Rico, T. C., Charre-Medellín, J. F., Pacheco-Figueroa, C., Arriaga-Weiss, S., Valdez-Leal, J. de D., Cancino-Murillo, R., Escalona-Segura, G., Bonilla-Ruíz, C. y Rubio-Rocha, Y. (2016). Distribución potencial histórica y contemporánea de la familia Psittacidae en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(3), 1103-1117. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.06.004>

- Moreno, R., Zamora, R., Molina, J. R., Vásquez, A. & Herrera, M. A (2011). Predictive modeling of microhabitats for endemic birds in South Chilean temperate forest using Maximum entropy (Maxent). *Ecological Informatics*, 6(6), 364-370. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574954111000574>
- Navarro-Martínez, A., Ellis, E. A., Hernández-Gómez, I., Romero-Montero, J. A. & Sánchez-Sánchez, O. (2018). Distribution and abundance of big-leaf mahogany (*Swietenia macrophylla*) on the Yucatan Peninsula, Mexico. *Tropical Conservation Science*, 11, 1-17. <https://doi.org/10.1177/1940082918766875>
- Parmesan, C. (2006). Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 37, 637-669. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100>
- Quesada-Quirós, M., Acosta-Vargas, L. G., Arias-Aguilar, D. y Rodríguez-González, A. (2017). Modelación de nichos ecológicos basado en tres escenarios de cambio climático para cinco especies de plantas en zonas altas de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 14(34), 1-12. [https://www.researchgate.net/publication/316448650\\_Modelacion\\_de\\_nichos\\_ecologicos\\_basado\\_en\\_tres\\_escenarios\\_de\\_cambio\\_climatico\\_para\\_cinco\\_especies\\_de\\_plantas\\_en\\_zonas\\_altas\\_de\\_Costa\\_Rica](https://www.researchgate.net/publication/316448650_Modelacion_de_nichos_ecologicos_basado_en_tres_escenarios_de_cambio_climatico_para_cinco_especies_de_plantas_en_zonas_altas_de_Costa_Rica)
- R Core Team. (2023). *Language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Ramírez-Magil, G., Botello, F. y Navarro-Martínez, A. (2020). Idoneidad de hábitat para *Swietenia macrophylla* en escenarios de cambio climático en México. *Madera y Bosques*, 26(3), Artículo e2631954. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2631954>
- Rojas-Hernández, S., Olivares-Pérez, J., Aviles-Nova, F., Villa-Mancera, A., Reynoso-Palomar, A. & Camacho-Díaz, L. M. (2015). Productive response of lambs fed *Crescentia alata* and *Guazuma ulmifolia* fruits in a tropical region of Mexico. *Tropical Animal Health and Production*, 47,1431-1436. <https://doi.org/10.1007/s11250-015-0874-8>

Ruiz-Corral, J. A., Medina-García, G., Rodríguez-Moreno, V. M., Sánchez-González, J. de J., Villavicencio G., R., Durán P., N., Grageda G., J. y García R., G. E. (2016). Regionalización del cambio climático en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (13), 2451-2464. <http://www.redalyc.org/pdf/2631/263144472001.pdf>

Ruiz-Corral, J. A., Medina-García, G. y García R., G. E. (2018). Sistema de Información Agroclimático para México-Centroamérica. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(1), 1-10. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i1.843>

United States Geological Survey. (2017). *WorldClim-Global Climate Data. Free climate data for ecological modeling and GIS*. WorldClim. <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/5526ee42e4b026915857c71f>

Velázquez-Hernández, J. M., Ruíz-Corral, J. A., Durán-Puga, N., González-Eguiarte, D. R., Santacruz-Ruvalcaba, F., García-Romero, G. E., de la Mora-Castañeda, J. G., Barrera-Sánchez, C. F. & Gallegos-Rodríguez, A. (2023). Eco-Geography of *Dioscorea composita* (Hemsl.) in México and Central America under the influence of climate change. *Sustainability*, 15(16), Article 12320. <https://doi.org/10.3390/su151612320>

Villa-Herrera, A., Nava-Tablada, M. E., López-Ortíz, S., Vargas-López, S., Ortega-Jimenez, E. y López, F. (2009). Utilización del Guácimo (*Guazuma ulmifolia*) como fuente de forraje en la ganadería bovina extensiva del trópico mexicano. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10, 253-261. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93912989012>



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.