

## Distribución histórica, actual y futura de *Cedrela odorata* en México

### Historical, current and future distribution of *Cedrela odorata* in Mexico

Jonathan Hernández Ramos<sup>1,6</sup> <http://orcid.org/0000-0003-2685-1199>

Roberto Reynoso Santos<sup>2</sup> <http://orcid.org/0000-0003-0958-2978>

Adrián Hernández Ramos<sup>3</sup> <http://orcid.org/0000-0003-4058-1316>

Xavier García Cuevas<sup>1</sup> <http://orcid.org/0000-0002-2481-6704>

Edgar Hernández-Máximo<sup>4</sup> <http://orcid.org/0000-0001-7354-5827>

José Vidal Cob Uicab<sup>1</sup> <http://orcid.org/0000-0002-2445-6657>

Dante Sumano López<sup>5</sup> <http://orcid.org/0000-0002-1947-4949>

<sup>1</sup>INIFAP-Campo Experimental Chetumal, km 25, carretera Chetumal-Bacalar, 77900 Chetumal, Quintana Roo, México.

<sup>2</sup>INIFAP-Campo Experimental Centro de Chiapas, km 3, carretera internacional Ocozocoautla-Cintalapa, 29140 Ocozocoautla de Espinosa, Chiapas, México.

<sup>3</sup>INIFAP-Campo Experimental Saltillo, km 342+119, carretera Saltillo-Zacatecas, No. 9515, Col. Hacienda de Buenavista, 25315 Saltillo, Coahuila, México.

<sup>4</sup>INIFAP-Campo Experimental El Palmar, km 18, carretera Tezonapa-El Palmar, 68410 Tezonapa, Veracruz, México.

<sup>5</sup>INIFAP-Campo Experimental Huimanguillo, km 1, carretera Huimanguillo-Cárdenas, Huimanguillo, Tabasco, México.

<sup>6</sup>Autor para la correspondencia: forestjonathanhdez@gmail.com

#### Resumen:

**Antecedentes y Objetivos:** Los bosques tropicales juegan un papel indispensable para enfrentar y reducir la degradación ambiental. El objetivo de este trabajo fue determinar, mediante modelos de simulación de nicho ecológico, la distribución histórica y actual de *Cedrela odorata* en México.

**Métodos:** Se empleó una base de 1747 datos de presencia de *C. odorata*. Para la modelación se emplearon 19 variables climato-ambientales y las capas de altitud, orientación, pendiente y tipo de suelos. La modelación de nicho ecológico se realizó en el programa MaxEnt con 75% de la muestra para el entrenamiento y los modelos Logistic, Cumulative, Raw y Cloglog. La validación se realizó con 25% de la muestra y la técnica Crossvalidate.

**Resultados clave:** El empleo de la regresión Cloglog es la que más se apegó a la distribución potencial para la especie, caso contrario al emplear la modelación de tipo Raw, ya que la proyección del área potencial es muy restrictiva y compacta, seguido de la regresión Cumulative y la regresión Logistic, siendo estas un punto intermedio para la modelación de la distribución histórica de *C. odorata* en México.

**Conclusiones:** La distribución histórica obtenida a partir de este modelo mostró que la especie tiene una alta probabilidad de distribuirse en la parte sur de la Península de Yucatán, norte y sur de Chiapas, y la llanura costera del Golfo en el estado de Veracruz con respecto al área actual reportada. Esto sugiere una reducción del nicho ecológico de la especie en el país.

**Palabras clave:** bosques tropicales, manejo forestal, MaxEnt, nicho ecológico.

**Abstract:**

**Background and Aims:** Tropical forests play an indispensable role to confront and reduce environmental degradation. The objective of this work was to determine, through ecological niche simulation models, the historical and current distribution of *Cedrela odorata* in Mexico.

**Methods:** A base of 1747 presence data of *C. odorata* was used. For the modeling 19 climatic-environmental variables were used, as well as the layers of altitude, orientation, slope and soil type. The ecological niche modeling was carried out in the program MaxEnt, with 75% of the sample for training and the Logistic, Cumulative, Raw and Cloglog models. The validation was carried out with 25% of the sample and the Crossvalidate technique.

**Key results:** The use of the Cloglog regression is the one that most adheres to the potential distribution for the species, otherwise using the Raw type modeling, since the projection of the potential area is very restrictive and compact, followed by the Cumulative regression and the Logistic regression, being these an intermediate point for the modeling of the historical distribution of *C. odorata* in Mexico.

**Conclusions:** The historical distribution obtained from this model showed that the species has very high values of probability in the southern part of the Yucatán Peninsula, north and south of Chiapas and the coastal plain of the Gulf in the Veracruz state with respect to the current distribution reported. This suggests a reduction in the distribution of the species in the country.

**Key words:** ecological niche, forest management, MaxEnt, tropical forests.

Recibido: 30 de octubre de 2017.

Revisado: 28 de noviembre de 2017.

Aceptado: 22 de enero de 2018.

Primero en línea: 29 de mayo de 2018.

Publicado: 1 de julio de 2018.

Citar como:

Hernández Ramos, J., R. Reynoso Santos, A. Hernández Ramos, X. García Cuevas, E. Hernández-Máximo, J. V. Cob Uicab y D. Sumano López. 2018. Distribución histórica, actual y futura de *Cedrela odorata* en México. Acta Botanica Mexicana 124. DOI: 10.21829/abm124.2018.1305

## Introducción

Dentro de la familia Meliaceae se reportan 50 géneros y alrededor de 1000 especies con una amplia distribución pantropical (Patiño, 1997; Pennington y Sarukhán, 2005). De las especies que destacan en esta familia están *Cedrela odorata* L. y *Swietenia macrophylla* King, por su alto valor comercial (Mendizábal-Hernández et al., 2009).

Particularmente *Cedrela odorata* tiene un rango altitudinal que varía entre 0 y 1200 m y tolera una amplia gama de condiciones climáticas, distribuyéndose en el continente americano desde el norte de México hasta el norte de Argentina (Gómez et al., 2007). En México se distribuye en el Pacífico, desde el sur de Sinaloa hasta Guerrero y la Depresión central y Costa de Chiapas, mientras que en el Golfo desde el sur de Tamaulipas hasta la Península de Yucatán (Patiño, 1997; Romo-Lozano et al., 2017).

Sus áreas de distribución y las poblaciones han disminuido considerablemente (Patiño, 1997; Rodríguez et al., 2003) por la extracción intensiva de su madera, en el país y de forma general en Mesoamérica, durante más de 200 años (Cavers et al., 2003). Dicha situación ha llevado a incluir a *Cedrela odorata* en el listado de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de fauna y flora silvestres (CITES, 2007) y, en México, en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 sobre protección ambiental y especies nativas de flora y fauna como especie sujetas a protección especial (SEMARNAT, 2010).

La sobreexplotación de los recursos y la reconversión de la cubierta vegetal, además del cambio climático, reconocido como el principal reto que enfrenta la humanidad (Rodríguez y Mance, 2009), han ocasionado la disminución del hábitat de las especies (Cushman, 2006; Uribe, 2015), y el deterioro ambiental y la pérdida de biodiversidad (Challenger y Dirzo, 2009; Pérez y Ferreira, 2016). Para la reducción de estos problemas se deben tomar acciones de restauración, conservación y manejo de las especies (ONU, 2016) como lo son la inclusión nacional (SEMARNAT, 2010) e internacional (CITES, 2007) en algún estatus de protección a las especies más susceptibles para su aprovechamiento sostenible o su conservación futura. Para ello, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Barrios, 2006; Gañan et al., 2015) y la modelación de nichos ecológicos con cualquiera de los métodos existentes (Phillips et al., 2006; Pliscoff y Fuentes-Castillo, 2011) son herramientas de gran utilidad.

En la actualidad y con el fin de contribuir al conocimiento de las especies y su interacción con el ecosistema, se han realizado trabajos de modelación de nichos ecológicos en combinación con los SIG para diferentes especies y con diversos enfoques. Por ejemplo, 1) definir áreas de distribución potencial para su conservación y restauración como es el caso de las palmas *Thrinax radiata* Lodd. ex Schult. & Schult. f. y *Cryosophila argentea* Bartlett en la Península de Yucatán (Hernández-Ramos et al., 2015) o la delimitación de nichos ecológicos para las cactáceas *Ferocactus histrix* (DC.) G.E. Linds., *Mammillaria bombycina* Quehl y *M. perezdelarosae* Bravo & Scheinvar en Aguascalientes, México (Meza-Rangel et al., 2014), 2) delimitar áreas de mayor probabilidad de presencia de *Dendroctonus mexicanus* Hopkins en bosques de coníferas de la Meseta Purhépecha en Michoacán, México, con la finalidad de emprender acciones de prevención y control de plagas (Martínez-Rincón et al., 2016), 3) delimitar áreas con mayor potencial de éxito en la reforestación y establecimiento de plantaciones forestales para *Pinus sylvestris* L., *P. nigra* J.F. Arnold, *P. pinaster* Aiton, *P. halepensis* Mill., *Quercus ilex* L. subsp. *ilex*, *Crataegus monogyna* Jacq. y *Acer opalus* Mill. subsp. *granatense* (Boiss.) Font Quer & Rothm. en la Provincia de Granada, España (Navarro-Cerrillo et al., 2016) y 4) identificar áreas de conservación y refugio ante escenarios de variación climática en *Swietenia macrophylla* en el sureste de México (Garza-López et al., 2016) o zonas futuras de cultivo con escenarios de cambio climático para *Coffea arabica* L. en Nicaragua (Läderach et al., 2012), entre otros. Sin embargo, en los bosques tropicales, los cuales son los más antiguos, diversos y ecológicamente complejos (Whitmore, 1993; Meli, 2003), hace falta mucha información ecológica que contribuya a entender las interacciones climáticas para el desarrollo de las especies que crecen en estos ecosistemas. Los bosques tropicales juegan un papel indispensable para enfrentar y reducir la degradación ambiental, así como para la generación de conocimiento que contribuya a la conservación, manejo y aprovechamiento de las especies incluidas en CITES (CITES, 2007) y la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010). Sin embargo, son los ecosistemas más susceptibles de perder biodiversidad por los cambios en las condiciones ambientales (Pérez y Ferreira, 2016).

Bajo ese escenario, y considerando la importancia económica de la especie, se planteó el objetivo de determinar mediante modelos de simulación de nicho ecológico la distribución histórica y actual de *Cedrela odorata* en México, de igual forma modelar dos escenarios futuros de distribución con la finalidad de poder tener aplicación en los programas de conservación, manejo o aprovechamiento de la especie, así como en el establecimiento de plantaciones forestales comerciales (PFC) o delimitación de áreas productoras de germoplasma.

## Materiales y Métodos

### Área de estudio

El área de estudio se delimitó de acuerdo con el área de distribución natural en México para *Cedrela odorata* que reporta Patiño (1997), y la distribución mencionada del bosque tropical y bosque mesófilo considerado por Romo-Lozano et al. (2017) por ser una especie característica de estos ecosistemas.

## Base de datos

Se obtuvo una base de 1747 coordenadas geográficas de *Cedrela odorata* construida a partir de la información contenida en 1) Inventario Nacional Forestal y de Suelos de 2004-2009 (INFyS 2004-2009) realizado por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2016), 2) Red Mundial de Información sobre Biodiversidad (REMB) elaborada por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (CONABIO, 2015), 3) Base de datos de Missouri Botanical Garden (TROPICOS, 2018), 4) Herbario Nacional de México (MEXU) (UNIBIO, 2011) y 5) recorridos de campo en los años 2016 y 2017 en el área de distribución natural reportada. La base de datos fue depurada siguiendo algunos de los procedimientos que realizaron Monterrubio-Rico et al. (2016) como son la eliminación de puntos duplicados, referencias ubicadas en poblados, vías de comunicación principales, plantaciones forestales de la especie y lugares en los que las condiciones altitudinales o climáticas hicieran imposible su presencia, y se verificaron en campo algunas coordenadas particulares.

## Modelación de distribución histórica y actual

Para la modelación se emplearon 19 variables clímax-ambientales (BioClim) del periodo 1950 a 2000, obtenidas de Worldclim (WorldClim, 2016) a una resolución de 1 km<sup>2</sup> por pixel (Hijmans et al., 2005), y las capas de altitud, orientación, pendiente y tipo de suelos de la Serie IV de INEGI (INEGI, 2014) a una escala homologada de 1: 1,000,000 obtenidas del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad de CONABIO (Cuadro 1).

**Cuadro 1:** Variables utilizadas para la modelación de la distribución histórica y actual de *Cedrela odorata* L. en México. Fuente: WorldClim (2016); CONABIO (2015).

| Clave         | Variable ambiental  |
|---------------|---|
| Bio1          | Temperatura promedio anual (°C)                                   |
| Bio2          | Oscilación diurna de la temperatura (°C)                          |
| Bio3          | Isotermalidad (°C)  |
| Bio4          | Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar *100) (°C)  |
| Bio5          | Temperatura máxima promedio del periodo más cálido (°C)           |
| Bio6          | Temperatura mínima del mes más frío (°C)                          |
| Bio7          | Oscilación anual de la temperatura (°C)                           |
| Bio8          | Temperatura media del mes más húmedo (°C)                         |
| Bio9          | Temperatura media del mes más seco (°C)                           |
| Bio10         | Temperatura media del cuatrimestre más cálido (°C)                |
| Bio11         | Temperatura media del cuatrimestre más frío (°C)                  |
| Bio12         | Precipitación anual (mm)  |
| Bio13         | Precipitación del periodo más húmedo (mm)                         |
| Bio14         | Precipitación del periodo más seco (mm)                           |
| Bio15         | Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación, CV) |
| Bio16         | Precipitación del trimestre más húmedo (mm)                       |
| Bio17         | Precipitación del trimestre más seco (mm)                         |
| Bio18         | Precipitación del cuatrimestre más cálido (mm)                    |
| Bio19         | Precipitación del cuatrimestre más frío (mm)                      |
| Pendiente     | Pendiente (%)   |
| Altitud       | Elevación (msnm)  |
| Orientación   | Orientación (°)   |
| Tipo de suelo | Suelos (tipo)   |

Los registros históricos mensuales se manipularon a través de las capas en formato *raster* de las 19 variables BioClim en ArcMap 10.4 (ESRI, 2017), realizando un recorte con una máscara de México definido por las capas de la Serie IV de INEGI. Para evitar un sobre ajuste de los modelos por colinealidad como lo mencionan Dormann et al. (2013) o que se tenga un error de tipo II (cada presencia no cuenta con un grado de libertad) de acuerdo a Miller et al. (2007), se realizó un análisis de correlación entre las 23 variables en ArcMap 10.4 con la herramienta Spatial Analyst Tools>Multivariate>Band Collection Statistics, utilizando las fórmulas siguientes para determinar las matrices de covarianza (*Cov*) (1) y correlación (*Corr*) (2) (ESRI, 2017):

$$Cov_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N (Z_{ik} - \mu_i)(Z_{jk} - \mu_j)}{N-1} \quad (1) \text{ y } Corr_{ij} = \frac{Cov_{ij}}{\delta_i \delta_j} \quad (2)$$

Donde  $Z$  es el valor por celda,  $i$  y  $j$  son las capas *raster*,  $\mu$  es la media de la capa,  $N$  representa el número de celdas,  $k$  es la denominación de cada celda en particular y  $\delta_i \delta_j$  es la desviación típica de las variables  $i$  y  $j$ .

La selección de las variables se realizó considerando solo las que tuvieran un coeficiente menor a 0.80 y -0.80 (Rissler y Apodaca, 2007; Fuentes et al., 2016) y que fueran las más significativas a nivel biológico para esta especie (Romo et al., 2013). Posteriormente se transformaron a un formato ASCII para su manipulación en MaxEnt (Steven et al., 2017).

La modelación de nicho ecológico se realizó en el programa MaxEnt versión 3.4.1 (Steven et al., 2017), el cual está fundamentado en el concepto de máxima entropía, donde el resultado de distribución es la respuesta de la especie a las variables medio ambientales de su entorno (Phillips et al., 2006). Este programa es considerado un algoritmo con un buen desempeño (Elith et al., 2011; Miranda et al., 2016), debido a que en la distribución proyectada utiliza la restricción de que cada valor esperado de las variables ambientales debe concordar con el promedio de su valor empírico, lo cual hace eficientes las predicciones a partir de información incompleta (Monterrubio-Rico et al., 2016).

Se utilizó 75% de la muestra para el entrenamiento (Martínez-Méndez et al., 2016) a través de 100 réplicas, 500 iteraciones (Loaiza y Roque, 2016) y un límite de convergencia de 0.00001 (Garza-López et al., 2016). Se aplicó la regla de umbral de máxima prueba de sensibilidad (plus) más especificidad y no la mínima presencia de entrenamiento que viene por default (Loaiza y Roque, 2016). También los tres tipos de modelos clásicos: Logistic (Porcentaje de la distribución de MaxEnt, cuyo valor crudo es al menos  $r$ ), Cumulative (Registro crudo de  $r$ ) y Raw (Modelo exponencial de MaxEnt). De igual manera se incluyó la corrección al modelo Logistic propuesta por Phillips et al. (2017) Cloglog, para visualizar el efecto que tiene cada uno de los diferentes modelos en la representación del nicho ecológico de la especie (Ortíz-Yusty et al., 2014). La validación se realizó empleando 25% de la muestra (Cartaya et al., 2016; Miranda et al., 2016) y la técnica Crossvalidate.

Los modelos generados fueron sometidos a las pruebas de la curva de respuesta con el análisis de omisión o comisión, de sensibilidad ROC (Receiver Operating Characteristic), el área bajo la curva (AUC por sus siglas en inglés) y la prueba de Jackknife para verificar la confiabilidad y el efecto de cada variable dentro del modelo (Scheldeman y van Zonneveld, 2010).

La validación de significancia estadística de predicción se realizó mediante la prueba binomial de omisión para todas las corridas utilizando los 11 test binomiales: valor fijo acumulado 1, valor fijo acumulado 5, valor fijo acumulado 10, el mínimo de puntos de presencia de entrenamiento, el percentil 10 de los puntos de presencia de entrenamiento, prueba de igualdad de la sensibilidad y especificidad de entrenamiento, valor máximo de la sensibilidad más la especificidad de entrenamiento, prueba de igualdad de la sensibilidad y especificidad de prueba, valor máximo de la sensibilidad más la especificidad de prueba, balance de los puntos de omisión de entrenamiento, área predicha y valor umbral; comparación de la entropía

de las distribuciones originales y consideradas a un umbral determinado (Phillips et al., 2006). Para considerar admisible la modelación se requiere que todos sean significativos con un valor de  $p < 0.01$  (Romo et al., 2013).

La selección del mejor modelo se hizo de acuerdo con Peterson et al. (2008), donde los modelos que tengan valores en AUC cercanos a 1 y probabilidad 0 son los más consistentes. Se tomó en cuenta lo propuesto por Merow et al. (2013) y Ortíz-Yusty et al. (2014), quienes mencionan que la elección de los resultados se deberá hacer a la luz de los conocimientos biológicos de cada especie. En apego de la distribución reportada para *Cedrela odorata*, se tomó como referencia lo publicado por Pennington y Sarukhán (2005), representando los resultados bajo un modelo de consenso (Araújo y New, 2007; Marmion et al., 2009).

### **Modelación de distribución futura**

La modelación futura a 2050 (promedio de 2041 a 2060) se realizó empleando las capas climáticas con una resolución espacial de 30 segundos de grado, información cartográfica resultado del Programa de Diagnóstico del Modelo Climático e Intercomparación (PCMDI por sus siglas en inglés) en su quinta fase para el modelo del sistema climático global versión 4 (CCSM4 por sus siglas en inglés), las cuales ya fueron corregidas por WorldClim versión 1.4 como clima de referencia actual (WorldClim, 2016).

Se emplearon las variables de pendiente (%), altitud (m), orientación ( $^{\circ}$ ) y suelos (tipo) con dos variantes de modelación. La primera modelación se efectuó usando las variantes de precipitación total mensual (*pr*) con variables climato-ambientales, y la segunda a través de variables bioclimáticas (*bi*) en el escenario futuro más conservador denominado RCP2.6 (Representative Concentration Pathways). En este escenario se plantea que el aumento de la radiación solar forzada será de más de  $2.6 \text{ W/m}^2$ , que se eleve la concentración de  $\text{CO}_2$  de entre 350 y 400 ppm, y de 445 a 490 en el  $\text{CO}_2$  equivalente, con un incremento en la temperatura a nivel global de entre 2 y  $2.4^{\circ}\text{C}$  (Weyant et al., 2009). La elección de las variables a utilizar fue mediante el análisis de covarianza y correlación (ESRI, 2017), y la regresión para obtener la distribución final se realizó con las combinaciones del mejor modelo resultante de la modelación histórica.

### **Elaboración de mapas de distribución histórica, actual y futura**

Con el modelo que más se acercó a la realidad se elaboraron los mapas de distribución histórica, actual y futura reclasificando los resultados de 0 a 100% en ArcMap 10.4 (Hernández-Ruiz et al., 2016), tomando en consideración el valor máximo del AUC.

El mapa de distribución histórica se realizó con todas las probabilidades resultantes, mientras que el mapa de distribución actual solo con la probabilidad mayor de 50% (York et al., 2011). Los mapas de distribución futura se prepararon considerando todas las probabilidades para los dos escenarios.

## **Resultados**

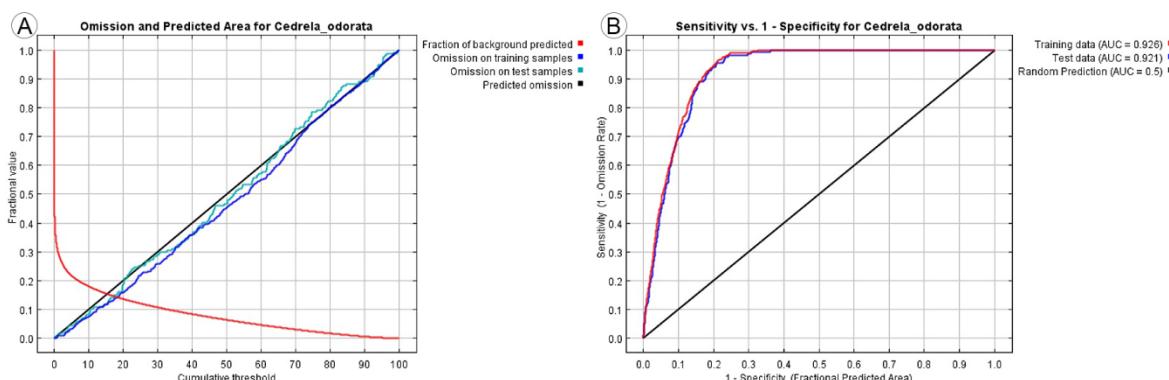
### **Base de datos y selección de variables**

Se obtuvieron, posterior a la depuración, 1200 pares de coordenadas de *Cedrela odorata*, de las cuales se emplearon 900 datos para la modelación y 300 para la validación dentro del mismo programa. Al realizar las pruebas de covarianza y correlación entre las 23 variables, se observaron problemas de correlación debido a que los valores de las capas Bio1, Bio4, Bio10, Bio11, Bio13, Bio16 y Bio17 fueron superiores a 0.80 y -0.80 por lo cual se eliminaron, quedando 16 variables para modelar la distribución histórica y actual de la especie en México, sin tener problemas de sub o sobre ajuste en el modelo empleado.

### **Modelación y mapas de distribución histórica y actual**

Al seleccionar las variables (16) se realizó la modelación con los cuatro tipos de regresiones de MaxEnt: Logistic, Cumulative, Raw y Cloglog, en las cuales no se observaron diferencias en los estadísticos de ajuste,

pero sí en las distribuciones proyectadas en los mapas. Para los cuatro casos, las tasas de omisión en los registros de presencia de entrenamiento y prueba, y el área predicha en función del umbral acumulativo, son cercanas; además, ambas presentan una tendencia hacia la línea recta (Fig. 1A).



**Figura 1:** A. Análisis de omisión/comisión para la modelación de nicho ecológico de *Cedrela odorata* L. en México; B. Curva operacional ROC para *Cedrela odorata* L. en México.

Los resultados de la aplicación de la técnica Receiver Operating Characteristic (ROC) indicaron que los cuatro modelos son adecuados, ya que el valor del cálculo del área bajo la curva (AUC) para los datos de entrenamiento (línea roja) y para los datos de prueba (línea azul) es de 0.926 y 0.921, respectivamente. Estos resultados están orientados a la parte superior izquierda por lo cual, y de acuerdo a la literatura, mientras ambas curvas se sitúen lo más juntas posible, mejor es el ajuste del modelo, lo que indicaría que no habría ningún error de omisión. De igual forma al emplear una clasificación aleatoria por el programa se obtuvo el valor máximo (0.5) (Fig. 1B).

Al validar la significancia estadística de predicción mediante la prueba binomial de omisión para todas las corridas utilizando los 11 test binomiales, todos ellos son significativos  $p < 0.01$ , por lo cual se acepta el modelo empleado (Cuadro 2).

**Cuadro 2:** Pruebas binominales para la modelación de nicho ecológico de *Cedrela odorata* L. en México.

| Umbral acumulativo | Umbral logístico | Descripción  | Área predicha fraccional | Tasa de omisión de entrenamiento | Tasa de omisión de prueba | Valor de p |
|--------------------|------------------|--|--------------------------|----------------------------------|---------------------------|------------|
| 1                  | 0.041            | Valor acumulado fijo 1                                 | 0.305                    | 0.009                            | 0.013                     | <0.0001    |
| 5                  | 0.181            | Valor acumulado fijo 5                                 | 0.218                    | 0.035                            | 0.045                     | <0.0001    |
| 10                 | 0.314            | Valor acumulado fijo 10                                | 0.181                    | 0.076                            | 0.084                     | <0.0001    |
| 0.57               | 0.023            | Presencia mínima de formación                          | 0.334                    | 0                                | 0.006                     | <0.0001    |
| 12.4               | 0.356            | 10 percentil de presencia en el entrenamiento          | 0.168                    | 0.1                              | 0.11                      | <0.0001    |
| 18.321             | 0.45             | Sensibilidad y especificidad de entrenamiento iguales  | 0.143                    | 0.143                            | 0.149                     | <0.0001    |
| 5.714              | 0.209            | Sensibilidad máxima de entrenamiento más especificidad | 0.211                    | 0.037                            | 0.045                     | <0.0001    |

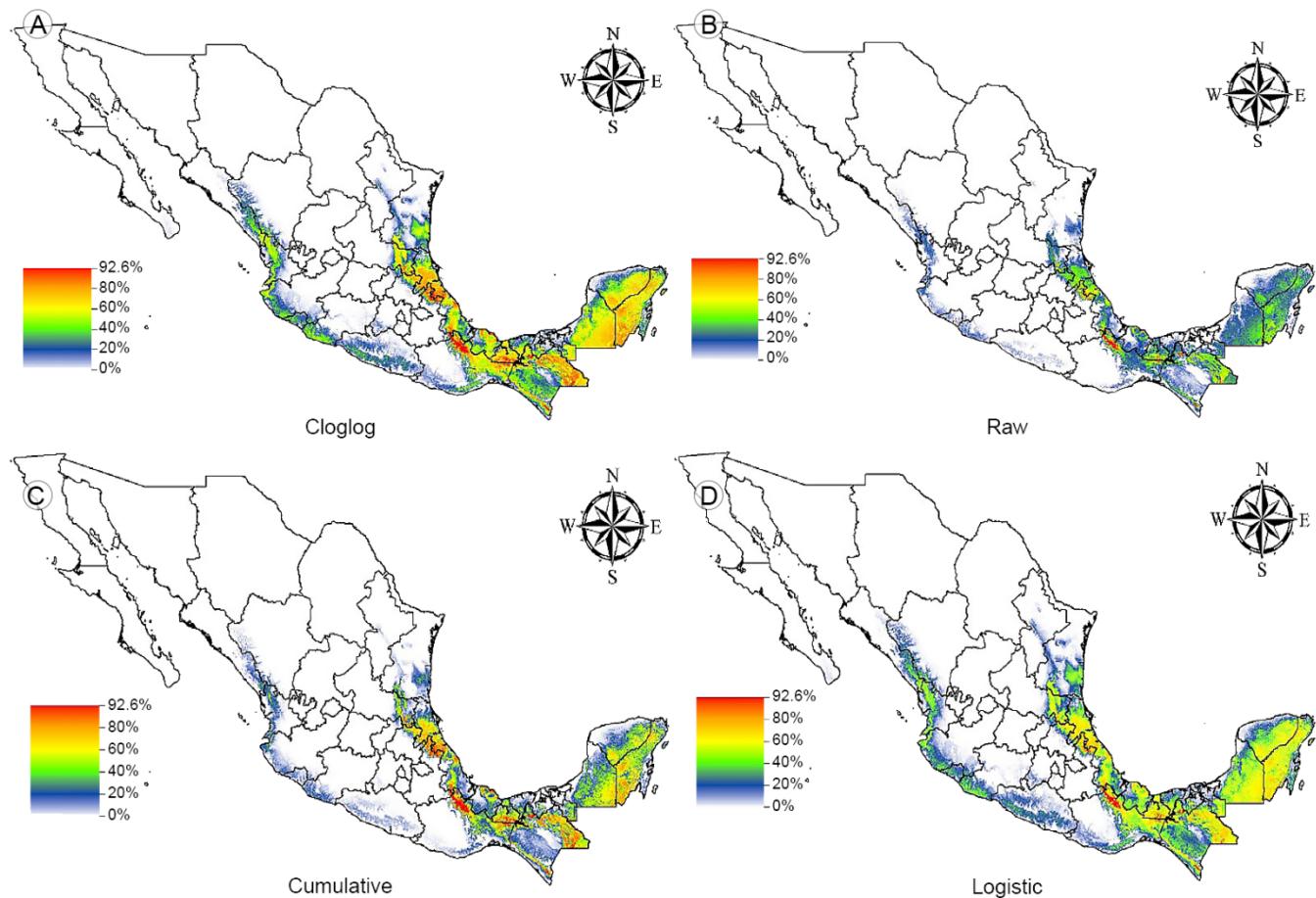
|        |       |   |       |       |       |         |
|--------|-------|---|-------|-------|-------|---------|
| 17.286 | 0.436 | Sensibilidad y especificidad de prueba iguales                              | 0.147 | 0.134 | 0.149 | <0.0001 |
| 5.966  | 0.217 | Máxima sensibilidad de prueba más especificidad                             | 0.209 | 0.043 | 0.045 | <0.0001 |
| 0.57   | 0.023 | Equilibrar la omisión del entrenamiento, el área prevista y el valor umbral | 0.334 | 0     | 0.006 | <0.0001 |
| 5.152  | 0.185 | Equivale a la entropía de las distribuciones umbral y original              | 0.217 | 0.035 | 0.045 | <0.0001 |

Al analizar la prueba de Jackknife, las variables con mayor porcentaje de contribución para modelar la distribución de *Cedrela odorata* en México fueron la precipitación anual (mm) (Bio12: 38.3%), la precipitación del periodo más seco (mm) (Bio14: 32.2%), la oscilación diurna de la temperatura (°C) (Bio2: 9.4%) y la altitud (m) (8.2%), mientras que las demás variables incluidas están por debajo de 2.3%. En el caso del factor de importancia de las variables con mayor peso, vuelven a ser altitud (27.2%), precipitación anual (Bio12: 16.1%) y la oscilación diurna de la temperatura (Bio2: 13.3%). Sin embargo, la oscilación anual de la temperatura (°C) y la precipitación del cuatrimestre más cálido (mm) tienen un factor mayor de 10% (Bio7 y Bio18) (Cuadro 3), situación que señala que las interacciones entre las variables son indispensables para la presencia o ausencia de la especie.

**Cuadro 3:** Análisis de la contribución por variable con mayor aporte para la distribución de *Cedrela odorata* L. en México.

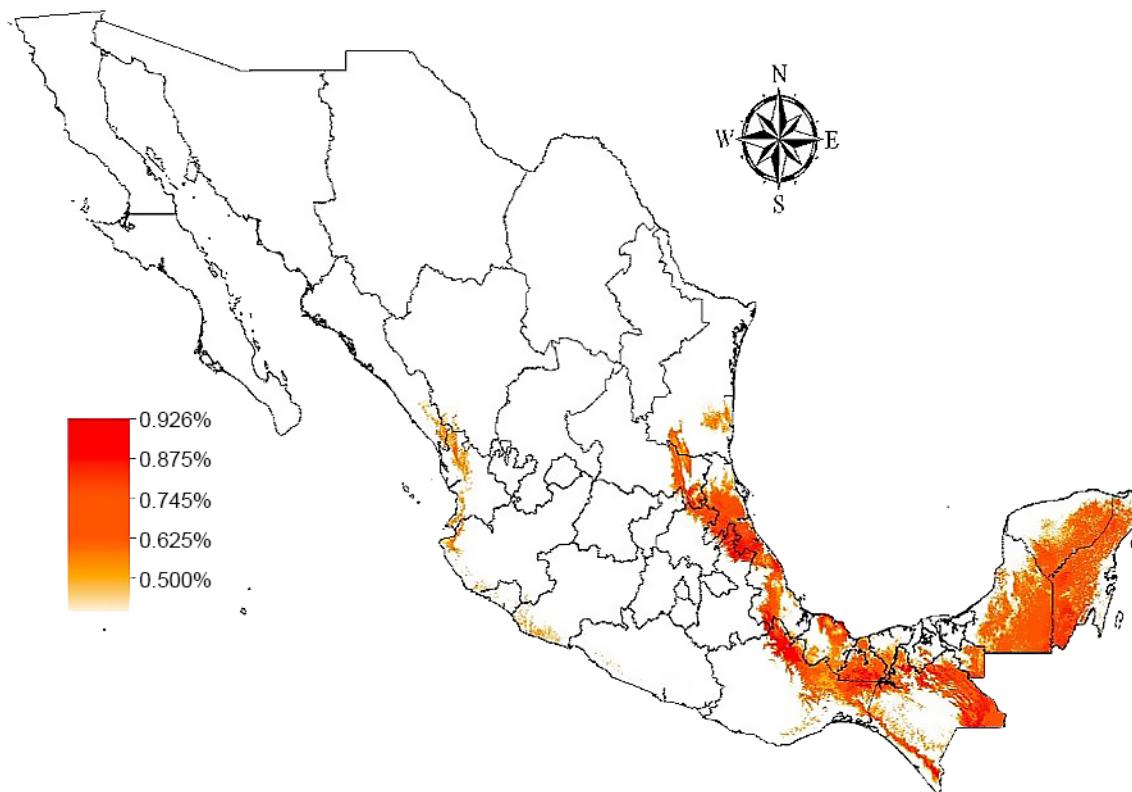
| Variable | Porcentaje de contribución (%) | Factor de importancia (%) | Variable      | Porcentaje de contribución (%) | Factor de importancia (%) |
|----------|--------------------------------|---------------------------|---------------|--------------------------------|---------------------------|
| Bio12    | 38.3                           | 16.1                      | Tipo de suelo | 1.4                            | 1                         |
| Bio14    | 32.2                           | 0.7                       | Bio5          | 1.2                            | 0.6                       |
| Bio2     | 9.4                            | 13.3                      | Bio3          | 1                              | 3.5                       |
| Altitud  | 8.2                            | 27.2                      | Bio7          | 0.9                            | 12                        |
| Bio8     | 2.2                            | 5.1                       | Bio15         | 0.8                            | 3.7                       |
| Bio18    | 1.8                            | 10.2                      | Orientación   | 0.6                            | 1.9                       |
| Bio9     | 1.8                            | 4.4                       | Pendiente     | 0.1                            | 0.3                       |

En la representación gráfica de los modelos de MaxEnt para *Cedrela odorata* los colores cálidos indican una alta probabilidad de presencia disminuyendo paulatinamente conforme el color cambia a azul. Los resultados muestran que el empleo de la regresión Cloglog es la que más se apega a la distribución potencial para la especie (Fig. 2A), caso contrario al emplear la modelación de tipo Raw, ya que la proyección del área potencial es muy restrictiva y compacta (Fig. 2B), seguido de la regresión Cumulative (Fig. 2C) y la regresión Logistic (Fig. 2D), siendo estas un punto intermedio para la modelación de la distribución histórica de *Cedrela odorata* en México.



**Figura 2:** Distribución histórica generada con MaxEnt empleando los modelos: A. Cloglog; B. Raw; C. Cumulative; D. Logistic, para representar el nicho ecológico de *Cedrela odorata* L. en México.

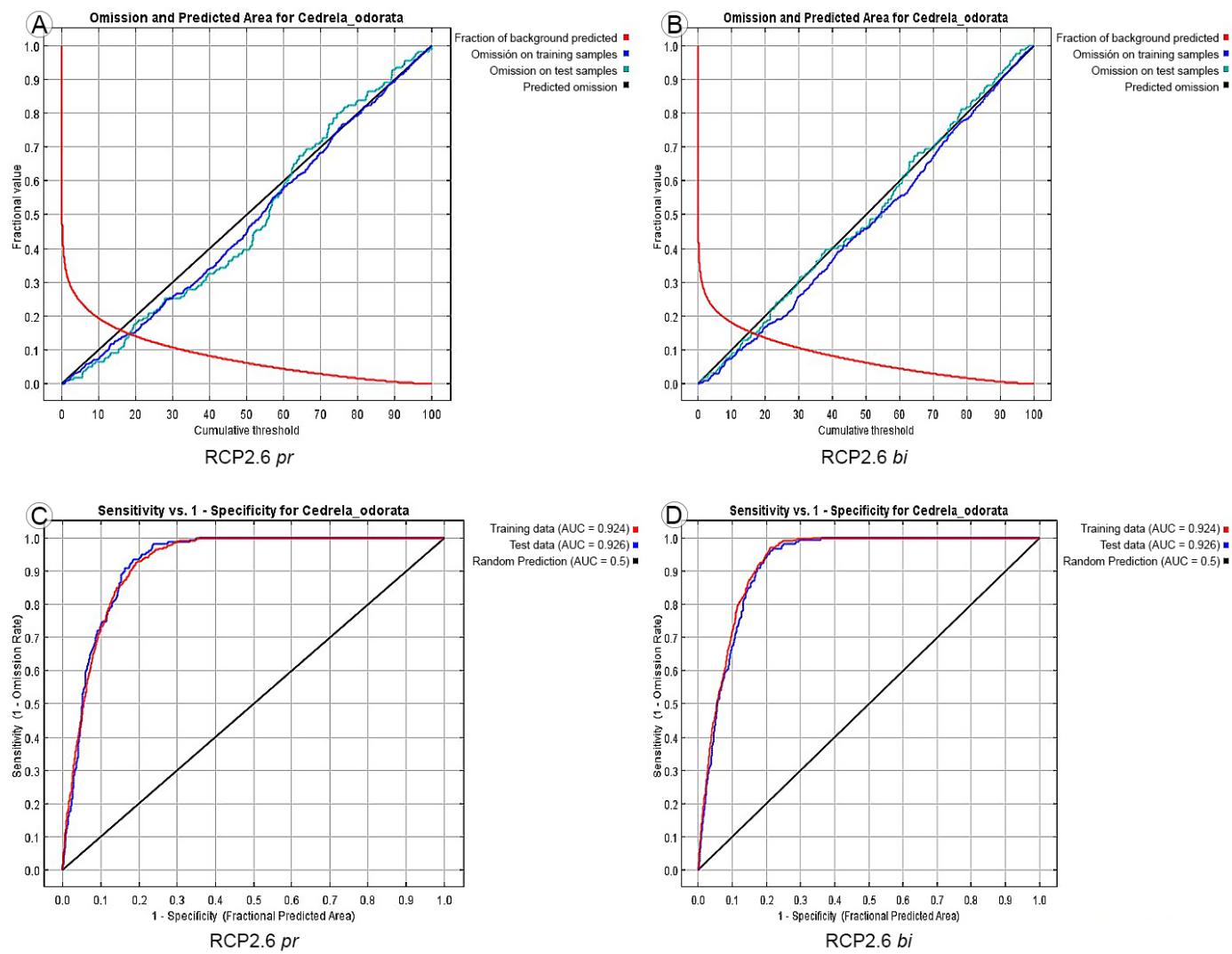
Al definir que la mejor modelación es la obtenida por el modelo Cloglog se construyó el mapa de distribución actual para *Cedrela odorata* en México al emplear solo la probabilidad  $>0.50$  (Fig. 3).



**Figura 3:** Distribución actual generada con MaxEnt empleando el modelo Cloglog y una probabilidad  $>0.50$  para *Cedrela odorata* L. en México.

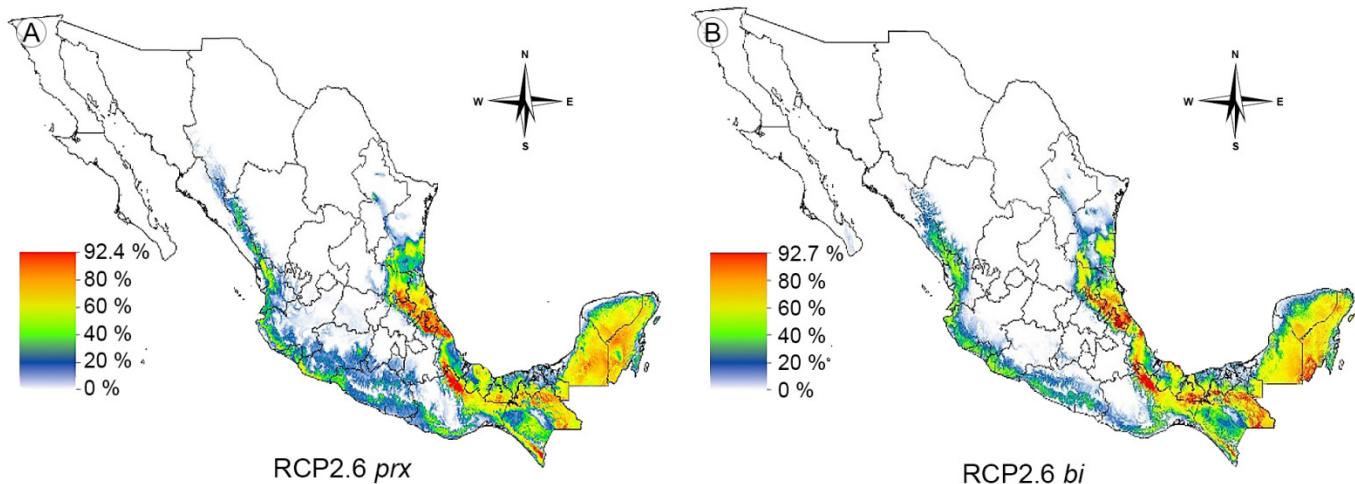
### Modelación y mapas de distribución futura

Al realizar los análisis de covarianza y correlación en las capas de información futura se tiene que para la modelación con las variantes de precipitación (*pr*) solo nueve variables fueron las adecuadas para modelar la distribución futura, mientras que al emplear las variantes climáticas se modeló con 14 variables. Ambos escenarios fueron realizados con la regresión Cloglog, la técnica Crossvalidate y el umbral de máxima prueba de sensibilidad más (plus) especificidad. En los dos escenarios planteados la tasa de omisión, calculada para los registros de presencia de entrenamiento y de prueba, y el área predicha en función del umbral acumulativo son cercanas; además, en ambas su tendencia es hacia la línea recta (Figs. 4A, B). Los resultados de la prueba ROC indicaron ajustes adecuados, ya que el valor de AUC para los datos de entrenamiento (línea roja) y para los datos de prueba (línea azul) es de 0.924 y 0.926 para *pr*, respectivamente (Fig. 4C), y de 0.927 y 0.921 para *bi* (Fig. 4D). De igual forma al emplear una clasificación aleatoria en los casos se obtuvo el valor máximo (0.5).



**Figura 4:** A y B. Análisis de omisión/comisión; C y D. Curva operacional ROC para la modelación de la distribución futura de *Cedrela odorata* L. en México.

Las pruebas binominales de omisión en las dos distribuciones son significativas  $p<0.01$ . Para RCP2.6 pr las variables que mayor aporte presentaron a la modelación futura de *C. odorata* en México (Fig. 5A) fueron temperatura media del cuatrimestre más cálido ( $^{\circ}\text{C}$ ) (58.2%), altitud (m) (12.1%), temperatura mínima del mes más frío ( $^{\circ}\text{C}$ ) (11.3%) y estacionalidad de la temperatura (desviación estándar \*100) ( $^{\circ}\text{C}$ ) (10.4%). De igual forma la variable oscilación anual de la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) en el factor de importancia contribuyó en 26.7%. En el caso del modelo RCP2.6 bi las variables precipitación del periodo más seco (mm), precipitación anual (mm) y altitud (m) fueron las de mayor aporte a la modelación futura bajo esta variante con 36.8%, 30.7% y 8.2% respectivamente, mientras las variables de oscilación anual de la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) (24.5%) y oscilación diurna de la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) son las dos más altas en el factor de importancia (Fig. 5B).



**Figura 5:** Distribución futura para *Cedrela odorata* L. en México empleado el escenario RCP2.6 (A) y dos variantes climato-ambientales (B).

## Discusión

Al realizar la selección de las variables que no están correlacionadas entre sí, mejora la precisión de los resultados evitando el sobre o sub ajuste de la distribución histórica y futura de la especie, tal y como lo mencionan Miller et al. (2007) y Dormann et al. (2013) en sus estudios de análisis de colinealidad y correlación de las variables espaciales, y de lo aplicado por Obregón et al. (2014) al modelar la distribución de las especies de mariposa *Pseudophilotes abencerragus* Pierret y *P. panoptes* Hübner en España, así como Elith et al. (2006) al emplear la prueba de correlación de Spearman para mejorar los métodos de predicción de la distribución de las especies a partir de datos de presencia.

Los resultados muestran una buena eficiencia de los modelos aplicados para predecir la distribución histórica de *C. odorata*, siendo superior la regresión Cloglog en la modelación por apegarse con mayor fidelidad a la realidad, por lo cual fue empleada en la modelación futura. La superioridad de esta técnica de regresión se debe a que es una corrección de la regresión Logistic que deriva de la interpretación de MaxEnt versión 3.4.0 como un proceso de Poisson inhomogéneo (IPP), dándole una justificación teórica más fuerte a la transformación (Phillips et al., 2017).

Al comparar la tasa de omisión y el área predicha en función del umbral acumulativo con la línea de referencia (negra), son muy cercanas tanto en la modelación histórica como futura; por lo cual se define con eficiencia el umbral acumulativo para *C. odorata* (Figs. 1, 4). Estos resultados son similares a los reportados por Álvarez et al. (2013) al definir la distribución potencial y la probabilidad de presencia de cinco especies: *Pinus sylvestris*, *P. nigra*, *P. pinaster*, *P. halepensis* y *P. pinea* L. en Andalucía, España, empleando cinco variables orográficas, 17 climáticas y 15 edáficas, y por Hernández-Ruiz et al. (2016) al modelar con 22 variables la distribución potencial y características geográficas de poblaciones silvestres de *Vanilla planifolia* Andrews (Orchidaceae) en Oaxaca, México. Sin embargo, difiere con lo obtenido por Loaiza y Roque (2016) al modelar con 14 variables la distribución potencial de *Armatocereus brevispinus* Madsen (Cactaceae) en la región sur en Ecuador. Esta diferencia se asume que se debe al tipo de variables utilizadas en este último estudio, ya que emplea variables de nubosidad anual, frecuencia de heladas y presión de vapor anual que en el presente trabajo no se integraron.

El comportamiento de la curva ROC fue adecuado para la modelación histórica y para las dos variantes del escenario futuro, esto confirma que la modelación realizada con MaxEnt tuvo una buena capacidad predictiva, ya que es muy semejante la curva resultante al aplicar los datos de entrenamiento y el test aplicado por el programa. Al evaluar el área bajo la curva ROC (AUC) se registró un valor cercano a 1 en la clasificación, utilizando todos los datos de entrenamiento, y de 0.5 al emplear una clasificación aleatoria por el programa que es el valor máximo (Álvarez et al., 2013). Lo anterior concuerda con lo expuesto por

Araújo et al. (2005), Araújo y Guisan (2006) y lo aplicado por Miranda et al. (2016), donde un valor mayor en AUC de 0.9 es satisfactorio en este tipo de modelaciones. De igual forma cumple con lo expuesto por Newbold et al. (2009) al mencionar que un modelo con valor mayor de 0.7 corresponde a un modelo de elevada precisión o alta discriminación.

Las modelaciones con MaxEnt mostraron significancia estadística en todos los test binomiales ( $p < 0.01$ ), lo cual señala la confiabilidad estadística de los resultados a 99% tal como lo indican Romo et al. (2013) al evaluar 76 test binomiales para modelar la distribución de las especies de mariposa: *Boloria dia* L., *B. eunomia* Esper, *B. selene* Denis & Schiffermüller, *B. euphrosyne* L., *B. pales* Denis & Schiffermüller y *B. napaea* Hoffmannsegg en la Península Ibérica, en el sudoeste de Europa, y Loaiza y Roque (2016) al evaluar solo los primeros tres test binomiales al realizar la distribución potencial de la cactácea *Armatocereus brevispinus* en la región sur del Ecuador.

La técnica de regresión que representa mayor fiabilidad, sin subestimar la superficie geográfica de distribución de *C. odorata*, fue de tipo Cloglog con el método de validación Crossvalidate, empleando el umbral de máxima prueba de sensibilidad más (plus) especificidad. Nuestros resultados difieren con lo aplicado por Cartaya et al. (2016) y Figueroa et al. (2016), donde la combinación de la regresión de tipo Cumulative y la técnica de Bootstrap fue la adecuada al modelar el nicho ecológico del roedor *Cuniculus paca* Brisson en Ecuador, y del oso *Tremarctos ornatus* Cuvier en Perú, respectivamente. Sin embargo, son semejantes con lo expuesto por Loaiza y Roque (2016) al modelar la distribución potencial bajo el umbral de mínima presencia de entrenamiento de *Armatocereus brevispinus* en Perú, donde mencionan que el empleo de la regresión tipo Logistic es superior por su fácil conceptualización e interpretación de los resultados por su escala binaria. Estas diferencias se asumen por el comportamiento biológico y los requerimientos mínimos de cada especie para su proliferación y distribución.

Esta combinación de procedimiento en la modelación realizada para *C. odorata* en México (Cloglog+Umbral de máxima prueba de sensibilidad más (plus) especificidad+ Crossvalidate) difiere con lo reportado por Merow et al. (2013) donde se menciona que para un análisis de idoneidad de hábitat y de influencia de las variables climáticas en la distribución potencial de las especies se deberá utilizar el formato Raw por ser un formato de salida crudo. Sin embargo, en este estudio se observó en el mapa de distribución potencial resultante con Raw una subestimación del área potencial de la especie en cuestión, indicando probabilidades de presencia muy restringidas a áreas específicas. Caso contrario es el empleo del umbral de máxima prueba de sensibilidad más (plus) especificidad, el cual ha demostrado ser uno de los métodos más robustos para generar este tipo de mapas de distribución a partir de mapas de probabilidades continuas (Liu et al., 2005; Ortíz-Yusty et al., 2014).

El área de distribución histórica modelada para *C. odorata* concuerda con lo reportado por Gómez et al. (2007) para el estado de Hidalgo, al modelar su distribución y algunos escenarios climáticos en esta región. Al comparar los resultados de este estudio con la distribución de *C. odorata* reportada por Pennington y Sarukhán (2005), para la selva mediana subperennifolia, muestran una disminución de su área de distribución. Por otro lado, si hacemos una comparación visual de los reportes anteriores, particularmente lo expuesto por Patiño (1997) y Rodríguez et al. (2003), donde se menciona que las poblaciones vegetales y su área de distribución han disminuido considerablemente, los resultados de este estudio podrían ser tomados como base para la actualización de la distribución histórica en México de esta especie así como para la implementación de planes de conservación del nicho ecológico de *C. odorata* y/o especies asociadas, tal como lo realizaron Hernández-Ruiz et al. (2016) para *Vanilla planifolia* en el estado de Oaxaca. De igual forma, el área de distribución potencial obtenida para *C. odorata* es muy similar a lo reportado por Garza-López et al. (2016) para *Swietenia macrophylla* en la región sur de México, al modelar la distribución contemporánea y futura de esta especie.

En el caso de la distribución futura bajo dos variantes (*pr* y *bi*) del escenario climático RCP2.6 a 2050, se observa que en ambos casos disminuye el área de distribución general de la especie. Particularmente en el escenario con la variante de precipitación (*pr*) en la región sur de México la disminución del área se ve

marcada en el sur de Veracruz y Chiapas, Tabasco y la Península de Yucatán. El área de distribución de la especie se compacta en el norte de Chiapas y en la parte centro de Veracruz, mientras que en la región centro del país se mantienen las condiciones favorables de crecimiento. Al modelar la distribución futura empleando variantes climáticas (*bi*), la tendencia de disminución general del área de distribución y las áreas de compactación se mantienen, aunque en menor grado; sin embargo, este escenario señala un área de refugio muy marcada en la parte sur de Campeche y Quintana Roo.

Estos resultados pueden ser la pauta para realizar planes y programas de manejo y conservación a futuro de la especie, tal y como lo proponen Obregón et al. (2014) al estudiar la ecología, biología y distribución de *Pseudophiotes abencerragus* y *P. panoptes* empleando un escenario futuro, Ortiz-Yusty et al. (2014) al modelar la posible fluctuación de la distribución potencial de la tortuga *Podocnemis lewyana* Duméril en escenarios de cambio climático en Colombia, y Pliscoff y Fuentes-Castillo (2011) al realizar una revisión de las nuevas herramientas y enfoques empleados al modelar la distribución de las especies y ecosistemas. También podrán servir como base en estudios posteriores de esta especie en su migración asistida como lo han documentan Sáenz-Romero et al. (2009) y la Secretaría del Convenio sobre la diversidad Biológica (2009) en otras especies.

Cabe mencionar que la presencia y/o ausencia de cualquier especie está sujeta a limitaciones históricas, ya sea de tipo ambiental u orográfico, que determinan su dispersión o distribución geográfica, y que son el resultado de un proceso evolutivo completo (Maciel-Mata et al., 2015). Por lo anterior, una especie no siempre se encontrará en todas las áreas potenciales de distribución como lo mencionan Soberón y Peterson (2005) al explicar el diagrama de BAM, y Broennimann et al. (2006) al describir que este tipo resultados que representa el nicho ecológico idóneo y la amplitud de distribución de las especies son de tipo probabilísticos.

La modelación de la distribución histórica, actual y futura, así como sus áreas potenciales de presencia y/o proliferación, contribuyen a entender la ecología de distribución de cualquier especie. Particularmente en el caso de especies raras o con algún estado de conservación, tal y como lo mencionan Leal-Nares et al. (2012) al generar un modelo espacial basado en el conocimiento ecológico para *Pinus martinezii* E. Larsen, García-Aranda et al. (2012) al modelar la distribución actual y potencial para *Taxus globosa* Schltdl., y Cartaya et al. (2016) al identificar la distribución geográfica potencial del hábitat de *Cuniculus paca*, pues se da la pauta para poder planear actividades o realizar planes de conservación, restauración o manejo acordes con sus condiciones ambientales específicas (Meza-Rangel et al., 2014; Hernández-Ramos et al., 2015). También se pueden definir áreas productoras de germoplasma y/o zonas de establecimiento de poblaciones artificiales con fines de aprovechamiento o conservación (Navarro-Cerrillo et al., 2016), o bien realizar planes futuros de acuerdo con modelos de escenarios de distribución de las especies (Läderach et al., 2012; Garza-López et al., 2016).

Cabe mencionar que aunque los resultados obtenidos en el estudio fueron adecuados estadísticamente (Araújo et al., 2005; Liu et al., 2005; Araújo y Guisan, 2006; Miller et al., 2007; Newbold et al., 2009; Álvarez et al., 2013; Dormann et al., 2013; Merow et al., 2013; Romo et al., 2013; Ortiz-Yusty et al., 2014; Cartaya et al., 2016; Figueroa et al., 2016; Loaiza y Roque, 2016; Phillips et al., 2017), y concuerdan con otras aproximaciones para esta especie y el hábitat donde se desarrolla (Patiño, 1997; Rodríguez et al., 2003; Pennington y Sarukhán, 2005; Gómez et al., 2007; Garza-López et al., 2016), se deberá tomar en cuenta que las capas empleadas tienen un retraso de 17 años, por lo que la actualización constante de esta proyección, o bien el crear capas más actuales, mejoraría los resultados de este trabajo.

## Conclusiones

Los resultados de la modelación de nicho ecológico con MaxEnt sugieren que es posible usar los mapas históricos para actualizar y determinar la distribución de *Cedrela odorata* en México. A partir de las variables analizadas con la prueba de Jackknife se mostró que la precipitación anual, la precipitación del

periodo más seco, la oscilación diurna de la temperatura y la altitud (m), contribuyeron con más información para modelar la distribución de esta especie.

De los cuatro modelos usados, la regresión Cloglog es el más apegado con la distribución natural de la especie. La distribución histórica obtenida a partir de este modelo con respecto a la distribución actual reportada mostró que *C. odorata* tiene valores muy altos de probabilidad de distribuirse en la parte sur de la Península de Yucatán, norte y sur de Chiapas, y la llanura costera del Golfo en el estado de Veracruz. Esto sugiere que en la actualidad existe una reducción de la distribución de la especie en el país. La modelación futura bajo las dos variantes del escenario de cambio climático señala que las áreas de distribución de *C. odorata* seguirán disminuyendo con el paso de los años, por lo cual es indispensable planear acciones que mitiguen los efectos del cambio climático global en los bosques tropicales donde se desarrolla.

## Contribución de autores

JHR, RRS, AHR, XGC y EHM concibieron y diseñaron el estudio. JHR, RRS, XGC, EHM, JVCU y DSL, llevaron a cabo el levantamiento de información de campo y la construcción de bases de datos. JHR, RRS y AHR realizaron el análisis geoespacial de la información. JHR, RRS, EHM, JVCU y DSL validaron *in situ* los resultados. JHR y RRS escribieron el manuscrito con apoyo de AHR, XGC, EHM, JVCU y DSL. Todos los autores contribuyeron a la discusión, revisión y aprobación del manuscrito final.

## Financiamiento

Este estudio fue apoyado por el Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica Forestal a través del proyecto CONACYT-CONAFOR 275052.

## Literatura citada

- Álvarez, G. J. R., A. Seseña R., J. Venegas T., M. L. Sillero A. y J. A. Rodríguez A. 2013. Autoecología de las principales especies de *Pinus* en Andalucía. Sexto Congreso Forestal Español. Ed. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Vitoria-Gasteiz, España. 19 pp.
- Araújo, M. B. y A. Guisan. 2006. Five (or so) challenges for species distribution modeling. *Journal of Biogeography* 33(10): 1677-1688. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01584.x>
- Araújo, M. B. y M. New. 2007. Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology & Evolution* 22(1): 42-47. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2006.09.010>
- Araújo, M. B., R. G. Pearson, W. Thuiller y M. Erhard. 2005. Validation of species climate impact models under climate change. *Global Change Biology* 11(9): 1504-1513. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01000.x>
- Barrios, P. 2006. Reseña de manejo de recursos naturales con SIG de Laura Lang. *Terra Nueva Etapa* 22(32): 183-185.
- Broennimann, O., W. Thuiller, G. Hughes, G. F. Midgley, J. M. R. Alkemade y A. Guisan. 2006. Do geographic distribution, niche property and life form explain plants' vulnerability to global change? *Global Change Biology* 12(6): 1079-1093. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01157.x>
- Cartaya, S., C. Anchundia y R. Mantuano. 2016. Distribución geográfica potencial de la especie *Cuniculus paca* (guanta) en el occidente de Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida* 24(2): 134-149. DOI: <https://doi.org/10.17163/lgr.n24.2016.11>
- Cavers, S., C. Navarro y A. J. Lowe. 2003. Chloroplast DNA phytogeography reveals colonization history of a Neotropical tree, *Cedrela odorata* L., in Mesoamerica. *Molecular Ecology* 12(6): 1451-1460. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-294X.2003.01810.x>
- Challenger, A. y R. Dirzo. 2009. Factores de cambio y estado de la biodiversidad. In: Dirzo, R., R. González y I. J. March (comps.). *Capital natural de México*, Vol. II: Estado de conservación y tendencias de

- cambio. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México, D.F., México. Pp. 37-73.
- CITES. 2007. Apéndices I, II y III. Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres. <https://cites.org/esp/app/appendices.php> (consultado agosto de 2017).
- CONABIO. 2015. Red mundial de información sobre biodiversidad (REMIB). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F., México. [http://www.conabio.gob.mx/remib/doctos/remib\\_esp.html](http://www.conabio.gob.mx/remib/doctos/remib_esp.html) (consultado agosto de 2017).
- CONAFOR. 2016. Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS 2004-2009). Comisión Nacional Forestal. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-forestal-y-de-suelos> (consultado mayo de 2018).
- Cushman, S. A. 2006. Effects of habitat loss and fragmentation on amphibians: A review and prospectus. *Biological Conservation* 128(2): 231-240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.09.031>
- Dormann, C. F., J. Elith, S. Bacher, C. Buchmann, G. Carl, G. Carré, J. R. García, M. B. Gruber, B. Lafourcade, P. J. Leitao, T. Münkemüller, C. McClean, P. E. Osborne, B. Reuneking, B. Schoröder, A. K. Skidmore, D. Zurell y S. Lautenbach. 2013. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography* 36(1): 27-46. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>
- Elith, J., H. C. Graham, R. P. Anderson, M. Dudík, S. Ferrier, A. Guisan, R. J. Hijmans, F. Huettmann, J. R. Leathwick, A. Lehmann, J. LI, L. G. Lohmann, B. A. Loiselle, G. Manion, C. Moritz, M. Nakamura, Y. Nakazawa, J. Mcc. Overton, P. Townsend A., S. J. Phillips, K. Richardson, R. Scachetti-Pereira, R. E. Schapire, J. Soberón, S. Williams, M. S. Wisz y N. E. Zimmermann. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29(2): 129-151. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>
- Elith, J., S. J. Phillips, T. Hastie, M. Dudík, Y. E. Chee y C. J. Yates. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17(1): 43-57. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>
- ESRI. 2017. Maps throughout this article were created using Arc-GIS® software. Environmental Systems Research Institute (ESRI). Redlands, USA.
- Figueroa, J., M. Stucchi y R. Rojas-VeraPinto. 2016. Modelación de la distribución del oso andino *Tremarctos ornatus* en el bosque seco del Marañón (Perú). *Revista Mexicana de Biodiversidad* 87(1): 230-238. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rmb.2016.01.008>
- Fuentes, D. J., D. Vargas L. y M. Boada J. 2016. Distribución del patrón espacial tipo leopardo en regiones áridas y semiáridas del mundo. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 71(1): 59-72.
- Gañan, M. M., T. A. Contador y H. H. Kennedy. 2015. La vida en los extremos: el uso de SIG para estudiar la distribución de la mosca antártica alada, *Parochlus steinenii* (Diptera: Chironomidae), en las Islas Shetland del Sur (Antártica marítima) In: de la Riva, J., P. Ibarra, P. Montorio, M. Rodríguez (eds.). Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación. Universidad de Zaragoza. Zaragoza, España. Pp. 1599-1608.
- García-Aranda, M. A., C. Cantú-Ayala, E. Estrada-Castillón, M. Pando-Moreno y A. Moreno-Talamantes. 2012. Distribución actual y potencial de *Taxus globosa* (Taxaceae) en México. *Journal of the Botanical Research Institute of Texas* 6(2): 587-598.
- Garza-López, M., J. M. Ortega-Rodríguez, F. J. Zamudio-Sánchez, J. F. López-Toledo, F. A. Domínguez-Álvarez y C. Sáenz-Romero. 2016. Calakmul como refugio de *Swietenia macrophylla* King ante el cambio climático. *Botanical Sciences* 94(1): 43-50. DOI: <https://dx.doi.org/10.17129/botsci.500>
- Gómez, J., A. Monterroso y A. Tinoco. 2007. Distribución del cedro rojo en el estado de Hidalgo bajo condiciones actuales y escenarios de cambio climático. *Madera y Bosques* 13(2): 299-49. DOI: <https://dx.doi.org/10.21829/myb.2007.1321227>

- Hernández-Ramos, A., J. Hernández-Ramos, X. García-Cuevas, C. Flores-López y G. G. García-Espinoza. 2015. Distribución potencial de *Thrinax radiata* Lodd. ex J.A. & J.H. Schult. y *Cryosophila argentea* Bartlett. en la Península de Yucatán. In: Barrón-González, M. P. y S. Moreno-Limón (eds.). Cambio climático y desarrollo sostenible: Apunte científico, tomo I. Editorial Académica Española. Saarbrücken, Alemania. Pp. 535.
- Hernández-Ruiz, J., B. E. Herrera-Cabrera, A. Delgado-Alvarado, V. M. Salazar-Rojas, Á. Bustamante-González, J. E. Campos-Contreras y J. Ramírez-Juárez. 2016. Distribución potencial y características geográficas de poblaciones silvestres de *Vanilla planifolia* (Orchidaceae) en Oaxaca, México. Revista de Biología Tropical 64(1): 235-246.
- Hijmans, J. R., E. S. Cameron, L. J. Parra, G. P. Jones y A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology 25(15): 1965-1978. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- INEGI. 2014. Conjunto de datos vectoriales edafológicos, escala 1: 250,000 Serie IV; continuo nacional, escala: 1: 250,000 Ed. 2. Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- Läderach, P., C. Zelaya, O. Ovalle, S. García, A. Eitzinger y M. Baca. 2012. Escenarios del Impacto del Clima Futuro en Áreas de Cultivo de Café en Nicaragua. Informe Final. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Managua, Nicaragua. <http://globaltrends.thedialogue.org/publication/escenarios-del-impacto-del-clima-futuro-en-areas-de-cultivo-de-cafe-en-nicaragua/> (consultado julio de 2017).
- Leal-Nares, O., M. E. Mendoza, D. Pérez-Salicrup, D. Geneletti, E. López-Granados y E. Carranza. 2012. Distribución potencial del *Pinus martinezii*: un modelo espacial basado en conocimiento ecológico y análisis multicriterio. Revista Mexicana de Biodiversidad 83(4): 1152-1170.
- Liu, C., P. M. Berry, T. P. Dawson y R. G. Pearson. 2005. Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. Ecography 28(3): 385-393. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2005.03957.x>
- Loaiza, C. R. y J. Roque G. 2016. Revalidación taxonómica y distribución potencial de *Armatocereus brevispinus* Madsen (Cactaceae). Revista Peruana de Biología 23(1): 35-41. DOI: <https://dx.doi.org/10.15381/rpb.v23i1.11831>
- Maciel-Mata, C. A., N. Manríquez-Morán, P. Octavio-Aguilar y G. Sánchez-Rojas. 2015. El área de distribución de las especies: revisión del concepto. Acta Universitaria 25(2): 3-19. DOI: <https://dx.doi.org/10.15174/au.2015.690>
- Marmion, M., M. Parviainen, M. Luoto, R. K. Heikkinen y W. Thuiller. 2009. Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling. Diversity and Distributions 15(1): 59-69. DOI: <https://dx.doi.org/10.1111/j.1472-4642.2008.00491.x>
- Martínez-Méndez, N., E. Aguirre-Planter, L. E. Eguiarte y J. P. Jaramillo-Correa. 2016. Modelo de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (Pinaceae) en México: Algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. Botanical Sciences 94(1): 5-24. DOI: <https://dx.doi.org/10.17129/botsci.508>
- Martínez-Rincón, S., J. Hernández-Ramos, J. T. Sáenz-Reyes, I. López-Pérez, J. J. García-Magaña, M. A. Aguilar-Vidales, M. Martínez-Salvador y A. Hernández-Ramos. 2016. Distribución potencial para *Dendroctonus mexicanus* en la Meseta Purhépecha, Michoacán. Revista Mitigación del Daño Ambiental Agroalimentario y Forestal de México 2(2): 95-104.
- Meli, P. 2003. Restauración ecológica de bosques tropicales. Veinte años de investigación académica. Interciencia 28(10): 581-589.
- Mendizábal-Hernández, L. C., J. Alba-Landa y T. Suárez-Dorantes. 2009. Captura de carbono por *Cedrela odorata* L. en una plantación de origen genético conocido. Foresta Veracruzana 11(1): 13-18.

- Merow, C., J. Smith M. y A. Silander J. 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography* 36(10): 1058-1069. DOI: <https://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x>
- Meza-Rangel, E., F. Tafoya, R. Lindig-Cisneros, J. J. Sigala-Rodríguez y E. Pérez-Molphe-Balch. 2014. Distribución actual y potencial de las cactáceas *Ferocactus histrix*, *Mammillaria bombycina* y *M. perezdelarosae* en el estado de Aguascalientes, México. *Acta Botanica Mexicana* 108: 67-80. DOI: <https://dx.doi.org/10.21829/abm108.2014.197>
- Miller, J., J. Franklin y R. Aspinall. 2007. Incorporating spatial dependence in predictive vegetation models. *Ecological Modelling* 202(3-4): 225-242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.12.012>
- Miranda, S. C. A., G. Geada L. y R. Sotolongo S. 2016. Modelación de la distribución potencial de *Pinus tropicalis* en el occidente de Cuba. *Avances* 18(1): 28-35.
- Monterrubio-Rico, T. C., J. F. Charre-Medellín, C. Pacheco-Figueroa, S. Arriaga-Weiss, J. D. Valdez-Leal, R. Cancino-Murillo, G. Escalona-Segura, C. Bonilla-Ruz e Y. Rubio-Rocha. 2016. Distribución potencial histórica y contemporánea de la familia Psittacidae en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 87(3): 1103-1117. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.rmb.2016.06.004>
- Navarro-Cerrillo, R. M., I. Clavero, A. Lorenzo V., L. Quero J. y J. Duque-Lazo. 2016. Integración de datos de inventario y modelos de hábitat para predecir la regeneración de especies leñosas mediterráneas en repoblaciones forestales. *Ecosistemas* 25(3): 6-21. DOI: <https://dx.doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-3.02>
- Newbold, T., F. Gilbert, S. Zalat, A. El-Gabbas y T. Reader. 2009. Climate-based models of spatial patterns of richness in Egypt's butterfly and mammal fauna. *Journal of Biogeography* 36(11): 2085-2095. DOI: <https://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2699.2009.02140.x>
- Obregón, R., S. Arenas-Castro, F. Gil-T., D. Jordano y J. Fernández-Haeger. 2014. Biología, ecología y modelo de distribución de las especies del género *Pseudophilotes* Beuret, 1958 en Andalucía (Sur de España) (Lepidoptera: Lycaenidae). *SHILAP Revista lepidoptera* 42 (168): 501-515.
- ONU. 2016. Informe de la Conferencia de las Partes sobre su vigésimo primer periodo de sesiones, celebrado en París del 30 de noviembre al 13 de diciembre de 2015; segunda parte: medidas adoptadas por la Conferencia de las Partes. Organización de las Naciones Unidas. <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/10a01s.pdf> (consultado octubre de 2017).
- Ortíz-Yusty, C., A. Restrepo y V. P. Páez. 2014. Distribución potencial de *Podocnemis lewyana* (Reptilia: Podocnemididae) y su posible fluctuación bajo escenarios de cambio climático global. *Acta Biológica Colombiana* 19(3): 471-481. DOI: <https://doi.org/10.15446/abc.v19n3.40909>
- Patiño, F. 1997. Recursos genéticos de *Swietenia* y *Cedrela* en los neotrópicos. Propuestas para acciones coordinadas. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)- Dirección de recursos forestales departamento de montes. Roma, Italia. 58 pp.
- Pennington, T. D. y J. Sarukhán. 2005. Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies. 3a ed. Universidad Nacional Autónoma de México; Fondo de Cultura Económica. México, D.F., México. 523 pp.
- Pérez S., J. E. y M. Ferreira S. 2016. Uso de los modelos de distribución potencial en el análisis de patrones de distribución, de la flora endémica de la Península de Yucatán, México. *Herbario CICY* 8: 44-48.
- Peterson, A. T., M. Papeş y J. Soberón. 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche. *Ecological Modelling* 213(1): 63-72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008>
- Phillips, S. J., R. Anderson P. y R. Schapire E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190(3-4): 231-259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Phillips, S. J., R. P. Anderson, M. Dudík, R. E. Schapire y M. Blair. 2017. Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography* 4(7): 887-893. DOI: <https://doi.org/10.1111/ecog.03049>

- Pliscoff, P. y T. Fuentes-Castillo. 2011. Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. Revista de geografía Norte Grande 48: 67-79. DOI: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022011000100005>
- Rissler, L. J. y J. J. Apodaca. 2007. Adding more ecology into species delimitation: ecological niche models and phylogeography help define cryptic species in the black salamander (*Aneides flavipunctatus*). Systematic Biology 56(6): 924-942. DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/10635150701703063>
- Rodríguez, B. M. y H. Mance. 2009. Cambio climático: lo que está en juego. Foro Nacional Ambiental. Bogotá, Colombia. 773 pp.
- Rodríguez, R., M. Daquinta, I. Capote, D. Pina, Y. Lezcano y J. L. González-Olmedo. 2003. Nuevos aportes a la micro-propagación de *Swietenia macrophylla* × *Swietenia mahogani* (Caoba híbrida) y *Cedrela odorata* (Cedro). Cultivos tropicales 24(3): 23-27.
- Romo, H., P. Sanabria y E. García-Barros. 2013. Predicción de los impactos del cambio climático en la distribución sobre las especies de Lepidoptera. El caso del género *Boloria* Moore, 1900 en la Península Ibérica (Lepidoptera: Nymphalidae). Revista de Lepidopterología 41(162): 267-287.
- Romo-Lozano, J. L., J. J. Vargas-Hernández, J. López-Upton y M. L. Ávila-Ángulo. 2017. Estimación del valor financiero de las existencias maderables de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en México. Madera y Bosques 23(1): 1-7. DOI <https://dx.doi.org/10.21829/myb.2017.231473>
- Sáenz-Romero, C., G. E. Rehfeldt, N. L. Crookston, P. Duval y J. Beaulieu. 2009. Estimaciones de cambio climático para Michoacán: Implicaciones para el sector agropecuario y forestal y para la conservación de la Mariposa Monarca. Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Michoacán; Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, México. 21 pp.
- Scheldeman, X. y M. van Zonneveld. 2010. Training Manual on Spatial Analysis of Plant Diversity and Distribution. Bioversity International. Rome, Italy. [http://www.bioversityinternational.org/uploads/tx\\_news/Training\\_manual\\_on\\_spatial\\_analysis\\_of\\_plant\\_diversity\\_and\\_distribution\\_1431\\_07.pdf](http://www.bioversityinternational.org/uploads/tx_news/Training_manual_on_spatial_analysis_of_plant_diversity_and_distribution_1431_07.pdf) (consultado octubre de 2017).
- Secretaría del Convenio sobre la diversidad Biológica. 2009. Relación entre la Diversidad Biológica y la Mitigación y Adaptación al Cambio Climático. Informe del Segundo grupo especial de expertos técnicos sobre diversidad biológica y cambio climático. Secretaría del convenio sobre la Diversidad Biológica. Montreal, Canadá. 11 pp.
- SEMARNAT. 2010. NORMA Oficial Mexicana NOM-059-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. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. Cd. Mx., México. [http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/435/1/NOM\\_059\\_SEMARNAT\\_2010.pdf](http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/435/1/NOM_059_SEMARNAT_2010.pdf) (consultado julio de 2017).
- Soberón, J. y T. Peterson A. 2005. Interpretation of Models of Fundamental Ecological Niches and Species' Distributional Areas. Biodiversity Informatics 2: 1-10. DOI: <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>
- Steven, J. P., M. Dudík y R. E. Schapire. 2017. Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). [http://biodiversityinformatics.amnh.org/open\\_source/maxent/](http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/) (consultado diciembre de 2017).
- TROPICOS. 2018. Tropicos.org. Missouri Botanical Garden. <http://www.tropicos.org/Home.aspx> (consultado octubre de 2017).
- UNIBIO. 2011. Base de datos del Herbario Nacional de México (MEXU). Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México, D.F., México. <http://unibio.unam.mx/minero/index.jsp?accion=sc&colecciones=MEXU,Herbario> (consultado septiembre de 2017).

- Uribe, B. E. 2015. Estudio del cambio climático en América Latina: El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago de Chile, Chile. 84 pp.
- Weyant, J., C. Azar, M. Kainuma, J. Kejun, N. Nakicenovic, P. R. Shukla, E. La Rovere y G. Yohe. 2009. Future Intergovernmental Panel on Climate Change activities-New scenarios. Report of 2.6 Versus 2.9 Watts/m<sup>2</sup> Representative Concentration Pathways (RCP's) Evaluation Panel. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)-XXX/INF.6. Antalya, Turkey. 81 pp.
- Whitmore, T. C. 1993. An introduction to tropical rain forests. Oxford University Press. New York, USA. 226 pp.
- WorldClim. 2016. Free climate data for ecological modeling and GIS. WorldClim-Global Climate Data. <http://www.worldclim.org/> (consultado octubre de 2017).
- York, P., P. Evangelista, S. Kumar, J. Graham, C. Flather y T. Stohlgren. 2011. A habitat overlap analysis derived from maxent for tamarisk and the south-western willow flycatcher. Frontiers of Earth Science 5(2): 120-129. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11707-011-0154-5>