



DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE *Cordia dodecandra* A.DC. Y SU VARIACIÓN RELACIONADA AL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN, MÉXICO †

[POTENTIAL DISTRIBUTION OF *Cordia dodecandra* A.DC. AND ITS VARIATION RELATED TO THE CHANGE OF LAND USE ON THE YUCATÁN PENINSULA, MEXICO]

José L. Cámara-Romero^{1*}, Juan J. Jiménez-Osornio², Héctor Estrada-Medina² and Francisca Hernández García³

¹ Centro de Ciencias de Desarrollo Regional. Universidad Autónoma de Guerrero. Privada de Laurel No.13. El Roble. C.P. 39640, Acapulco, Gro., México. *Email: josecamara84@gmail.com

² Departamento de Manejo y Conservación de Recursos Naturales Tropicales. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad Autónoma de Yucatán. Km. 15.5 carretera Mérida-Xmatkuil S/N. C.P. 97315. Mérida, Yucatán, México. Email: josornio@correo.uady.mx; hector.estrada@correo.uady.mx

³ Departamento de Producción Vegetal y Microbiología, Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO), Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH). Ctra. Beniel, Km 3.2, C.P. 03312, Orihuela, Alicante, España. Email: francisca.hernandez@umh.es

*Corresponding author

SUMMARY

Background. The study of the geographical distribution of species is very useful for understanding the patterns and processes that explain biodiversity and are raw materials for conservation planning based on the generation of maps identifying areas with a high probability of occurrence. **Objective.** To determine the potential distribution (PD) of *C. dodecandra* and land use variations in the Yucatan Peninsula (YP). **Methodology.** A Species Distribution Model (MDE) was used to find areas with suitable environmental conditions for wild populations of *Cordia dodecandra*, fifteen environmental variables were used to model the optimal conditions for the species and to create the model for PD using the MaxEnt 3.3.3k program, the georeferenced presence records available from herbaria and the data collected in the field were used to map the Known Distribution (DC) of *C. dodecandra*. The corrected PD (DPC) was calculated by incorporating the land use data obtained from INEGI into the model. **Results.** The PD of *C. dodecandra* in the YP was 2,501,938 hectares. The main environmental variables that affect the PD of the species were the type of climate, the precipitation of the wettest month, the precipitation of the wettest quarter and the annual precipitation. CPD decreased by 2 per cent (265,439 hectares) compared to PD. **Implications.** The analysis identifies areas with a high probability of finding the species, which would help to initiate projects for the development of this species aimed at its conservation. **Conclusion.** The areas of potential distribution with the greatest probability of presence of *Siricote* in the Yucatan Peninsula are: the Calakmul Biosphere Reserve, the southern and central part of the state of Yucatan and the central area of the municipality of Felipe Carrillo Puerto (Quintana Roo).

Key words: Distribution models; *Cordia dodecandra*; Maximum entropy; WorldClim.

RESUMEN

Antecedentes. El estudio de la distribución geográfica de las especies es de gran utilidad para entender los patrones y los procesos que explican la biodiversidad e importantes para planear su conservación con base en la generación de mapas identificando áreas con una alta probabilidad de ocurrencia. **Objetivo.** Determinar la Distribución Potencial (DP) de *C. dodecandra* y las variaciones debido al uso de la tierra, en la Península de Yucatán (PY). **Metodología.** Se utilizó un Modelo de Distribución de Especies (MDE) para encontrar áreas con condiciones ambientales adecuadas para las poblaciones silvestres de *Cordia dodecandra*, se utilizaron quince variables ambientales para modelar las condiciones óptimas para la especie y crear el modelo para la DP utilizando el programa MaxEnt 3.3.3k., los registros de presencia georreferenciados disponibles de herbarios y los datos recolectados en el campo se usaron para mapear la Distribución Conocida (DC) de *C. dodecandra*. La DP corregida (DPC) se calculó incorporando al modelo los datos

† Submitted July 21, 2020 – Accepted November 6, 2020. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License.
ISSN: 1870-0462.

de uso del suelo obtenido del INEGI. **Resultados.** La DP de *C. dodecandra* en la PY fue de 2,501,938 hectáreas. Las principales variables ambientales que afectan la DP de la especie fueron, tipo de clima, precipitación del mes más húmedo, precipitación del trimestre más húmedo y la precipitación anual. La DPC disminuyó 2% (265,439 hectáreas) en comparación con la DP. **Implicaciones.** El análisis identifica las áreas con una alta probabilidad de encontrar a la especie, lo que ayudaría a iniciar proyectos para el aprovechamiento de ésta especie dirigida a su conservación. **Conclusión.** Las áreas de DP con mayor probabilidad de presencia de Siricote en la PY son: la Reserva de la Biosfera de Calakmul, la parte sur y centro del estado de Yucatán y la zona centro del municipio de Felipe Carrillo Puerto (Quintana Roo).

Palabras clave: Modelos de distribución; *Cordia dodecandra*; Máxima entropía; WorldClim.

INTRODUCCIÓN

Los estudios sobre la distribución geográfica de las plantas en México son escasos; algunos trabajos abordan aspectos generales de la distribución de grupos de taxones a nivel de tipo de vegetación y de afinidades geográficas de taxones, o han registrado patrones de riqueza locales y regionales en estudios de flora, pero muy pocos han documentado el área total ocupada por una sola especie (Skov, 2000). Por lo cual, determinar y comprender la distribución de una especie en un área determinada es importante para el manejo de recursos y la conservación biológica (Peterson *et al.*, 2011).

Se conoce como el área de distribución de una especie al conjunto de lugares dentro de un espacio geográfico donde se puede detectar su presencia, reflejado por la ecología y la historia evolutiva de la especie (Soberón, 2007). Hay dos tipos de distribución de especies: real o conocida (se refiere a los sitios donde se han observado y / o recolectados individuos), y potencial (constituye las áreas donde las condiciones ambientales son similares a aquellas donde se sabe que existió o existen las especies y que muy probablemente ocupe) (Gámez, 2011). La dinámica de la distribución geográfica está determinada por procesos interactivos que ocurren en diferentes niveles de organización biológica, extensión espacial, resolución, tasas temporales y condiciones ambientales (Yackulic y Ginsberg, 2016), a su vez el cambio en el uso del suelo genera una variación espacial en la disponibilidad de recursos al disminuir y aislar los hábitats (Ahlers *et al.*, 2016).

Los modelos de distribución de especies (MDE) se basan en encontrar aquellos lugares del espacio geográfico que reúnen las condiciones ambientales capaces de soportar una población de una especie determinada. Para ello el algoritmo del MDE establece una relación entre las condiciones ambientales que existen en los lugares de presencia actual de una especie y encuentra otros lugares donde se cumpla la relación establecida. De esta forma se obtiene una proyección sobre un mapa de las áreas donde la especie podría sobrevivir con diferentes grados de idoneidad para la misma. (Guisan y Zimmermann, 2000).

El modelo de distribución de las especies define también un nicho de las especies (Quipuscoa *et al.*, 2019), para aproximarnos a esta distribución potencial el modelamiento de las especies se realiza con variables climáticas, principalmente para los modelos de predicción, que se basan actualmente en datos climáticos (Fick y Hijmans, 2017), para la predicción potencial del hábitat, donde generalmente no se toma en cuenta el factor humano.

En los últimos años, la combinación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las técnicas de estadística aplicada ha llevado a la creación de modelos de distribución de especies, que permiten un análisis detallado de los patrones espaciales de presencia / ausencia de especies (Swenson, 2008). Estos modelos ubican lugares geográficos con condiciones ambientales adecuadas que soportan a una población de una especie dada (Franklin y Miller, 2010).

El algoritmo del MDE establece una relación entre las condiciones ambientales existentes, en las áreas de presencia natural de la especie, y encuentra otros lugares donde se cumple esta relación obteniendo un mapa de proyección de las áreas donde la especie podría sobrevivir, calculando diferentes niveles de idoneidad (Cruz-Leyva, 2014). El propósito de los MDE y especialmente los mapas predictivos resultantes, es proporcionar información espacialmente explícita, es decir, asociada a una ubicación en el espacio geográfico, los MDE generan datos sobre las especies y otros elementos de la biodiversidad para aplicaciones como desarrollar planes de conservación, evaluar riesgos y gestionar recursos (Franklin y Miller, 2010).

Se han desarrollado diferentes técnicas basadas en algoritmos para modelar la distribución espacial de las especies (Singh *et al.*, 2018). El más ampliamente aceptado y utilizado es el de máxima entropía (MaxEnt) (Phillips *et al.*, 2006). MaxEnt posee cuatro ventajas sobre los demás: (i) puede trabajar solo con datos de presencia (ii) utiliza variables tanto continuas como categóricas y el producto se interpreta como un grado relativo de adecuación (en qué medida un lugar es adecuado para que la especie esté presente) (iii) su buen desempeño (Elith *et al.*, 2016), con un número pequeño de muestras; y (iv) su disponibilidad

gratuita. Su facilidad de uso y resultados confiables de datos lo ha hecho una herramienta en la comunidad científica, donde se utiliza para modelar la distribución de especies para diversos objetivos.

El Siricote se distribuye desde el Sureste de México hasta el Norte de Guatemala y Belice. En México se encuentra distribuido en la zona seca del centro de Veracruz, en la depresión central de Chiapas y en las partes bajas de Tabasco (CONAFOR, 2007); se encontraba distribuido en toda la PY, ya que formaba parte de la composición de la selva baja caducifolia, selva baja subcaducifolia y selva mediana subcaducifolia, sin embargo, la sobreexplotación y la transformación del hábitat han disminuido considerablemente las poblaciones silvestres (Durán y García, 2010). Dada esta disminución y la escasez de datos sobre la distribución geográfica de esta especie en la PY, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) ha definido al Siricote como una especie prioritaria (CONAFOR, 2007). Por lo anterior, este estudio tiene como objetivo la modelación y estimación de la superficie de la distribución geográfica conocida y potencial de *C. dodecandra* en la PY, identificando las principales variables ambientales que afectan su distribución.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La Península de Yucatán, es compartida entre los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán. Es una inmensa plataforma de la época del Eoceno compuesta casi por completo de topografía de piedra caliza kárstica, el clima regional es subhúmedo tropical caliente con lluvias de verano, aumentos anuales promedio de las precipitaciones y disminuciones de temperatura a lo largo de un gradiente de noreste a suroeste (Bautista *et al.*, 2005). En la península, los diferentes tipos de selvas tropicales, se clasifican en seis tipos generales: selva mediana subperennifolia (SMSP), selva mediana subcaducifolia (SMSC), selva alta perennifolia (SAP), selva alta subperennifolia (SASP), selva baja caducifolia (SBC) y selva baja inundable (SBI), cuyos patrones de distribución están determinados por la precipitación pluvial y el tipo de suelo (Flores *et al.*, 2010).

Fenología y caracterización

C. dodecandra es un árbol caducifolio perteneciente a la familia boragináceae, tiene un porte mediano de 8 hasta 12 metros de altura y con un diámetro a la altura del pecho de 40 hasta 60 cm, se observa sin hojas en

los meses de enero, febrero y marzo, periodo que coincide con la floración más abundante. Requerimientos Ambientales: Altitud 0 – 1000 (msnm). Suelo: Vertisol crómico, Rendzina, aunque se adapta a una gran variedad de suelos, con preferencia a los calizos y pedregosos. Características físicas: franca, franco-arcillosa, arcillosa, suelos bien drenados, factores limitantes para su desarrollo son suelos con altas concentraciones de hierro y aluminio. Características químicas: pH: de ligeramente ácido a alcalino, materia orgánica: pobre. Climas cálidos, especie demandante de luz; temperatura (°C): Media: 26, mínima: 13, máxima: 39. Precipitación: 1000-2,150 (mm) (SIRE, 2005). Árbol de uso múltiple (comestible, maderable, medicinal, ornamental, etc.,) con gran importancia económica y cultural en la PY (Pennington y Sarukhán, 2005).

Mapa de distribución conocida

Este mapa se elaboró utilizando los datos de presencia georreferenciados disponibles para *C. dodecandra* compilados del Sistema Nacional de Datos de Biodiversidad (SNIB), los herbarios asociados a esta base de datos, datos en línea y literatura científica (393 registros disponibles para *C. dodecandra* en México, Guatemala y Belice). Se eliminaron los registros de presencia repetidos, información incompleta, georreferencia incorrecta o dudosa, y / o falta de correspondencia con referencias geográficas; quedando 160 puntos (79 en Yucatán, 45 en Campeche y 36 en Quintana Roo). Se realizaron seis salidas de campo, a áreas consideradas idóneas para *C. dodecandra*, en tres municipios del estado de Yucatán (Muna, Tizimin y Tzucacab) donde se registraron 75 individuos de Siricote. En total se utilizaron 235 registros de individuos adultos los cuales fueron representados sobre el mapa base de la PY para obtener el mapa de distribución conocida.

Mapa de distribución potencial (Variables ambientales)

Para elaborar este mapa de proyección, se utilizaron datos cuantitativos y cualitativos ya que estos grupos de datos explicativos se han utilizado con éxito para comparar la riqueza de flora y los patrones de datos de diversidad (Hawkins y Pausas, 2004). Se seleccionaron quince variables (climáticas, geológicas y biológicas) (Cuadro 1), después de un análisis de autocorrelación para reducir la multicolinealidad entre las variables (coeficiente de correlación de Pearson) (Kumar y Stohlgren, 2009), disminuyendo la información redundante producida por los algoritmos (Benito de Pando y Peñas de Giles 2007).

Cuadro 1. Variables ambientales (datos de gabinete).

| Variables ambientales | Fuente | Resolución |
|--|--|--|
| Estacionalidad en la temperatura | WorldClim* | Resolución espacial aproximada de 1 Km ² |
| Temperatura máxima del mes más cálido | WorldClim* | Resolución espacial aproximada de 1 Km ² |
| Intervalo anual de temperatura | WorldClim* | Resolución espacial aproximada de 1 Km ² |
| Temperatura media del trimestre más seco | WorldClim* | Resolución espacial aproximada de 1 Km ² |
| Precipitación anual | WorldClim* | Resolución espacial aproximada de 1 Km ² |
| Precipitación del mes lluvioso | WorldClim* | Resolución espacial aproximada de 1 Km ² |
| Precipitación del trimestre más húmedo | WorldClim* | Resolución espacial aproximada de 1 Km ² |
| Precipitación del trimestre más seco | WorldClim* | Resolución espacial aproximada de 1 Km ² |
| Meses de humedad en el suelo | Climas. 'Intervalo de humedad'. Atlas Nacional de México. Vol. II. Instituto de Geografía UNAM. México. ** | Resolución espacial aproximada de 1 (Grados decimales al cuadrado) Escala 1: 4000000. |
| Tipo de humedad en el suelo | Maples - Vermeersch M. (1992) Regímenes de humedad del suelo. Instituto de Geografía UNAM. * | Escala 1:400000 Precisión: 1 (Grados decimales al cuadrado) |
| Geomorfología | SIG-UADY/SIG-CICY** | Escala 1:250000 |
| Suelo | INEGI-Conjunto de datos vectoriales edafológico (serie II) * | Escala 1:250000 Precisión: 1 (Grados decimales al cuadrado) |
| Altitud | INEGI Modelo Digital del Terreno * | Escala 1:250000 |
| Tipos de clima | García, E. - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998) ** | Escala: 1:1000000 |
| Vegetación potencial | Rzedowski, J. (1990). Vegetación Potencial'. Instituto de Geografía, UNAM. México. * | Escala 1:4000000 |

*Datos originales de la fuente, sin ningún cambio.

**Datos derivados de la fuente original.

Para modelar la distribución potencial de *C. dodecandra* utilizando MaxEnt, se procesaron las variables ambientales en formato ASCII (ráster) dado que las capas presentaron diferentes tamaños de píxel, se estandarizaron de acuerdo a la variable ambiental que tenía la resolución más amplia (70 x 70 m por píxel), a través del remuestreo de las capas con la herramienta *resample* de ArcMap 10 (ESRI, 2010).

Del total de los registros de *C. dodecandra*, el 25% se usó como datos de entrenamiento y el 75% restante como datos de validación. Los parámetros del software fueron los recomendados por Phillips *et al.*, (2006): umbral de convergencia = 10; iteraciones máximas = 500; valor de regularización β = auto; porcentaje de prueba aleatoria = 0; regularización múltiple = 1; y puntos máximos de fondo = 10,000. Los datos se proyectaron en coordenadas UTM (Zona 16-N, Datum WGS1984) utilizando el programa ArcMap 10 (ESRI,

2010) para permitir su inserción en MaxEnt. La imagen ráster obtenida de MaxEnt fue editada y representada en un mapa base de la PY. Se dividió el valor del ráster obtenido por MaxEnt en tres porcentajes: bajo (.01-.33), medio (.34-.66) y alto (.67-.99), con la finalidad de visualizar y cuantificar el número de hectáreas de ocupación de *C. dodecandra*.

Efecto del uso de la tierra en la distribución potencial

Se creó un modelo de Distribución Potencial Corregido (DPC) para conocer el impacto del uso de suelo en *C. dodecandra*, utilizando los registros remanentes en el hábitat natural con el mapa de uso de suelo 2012 de INEGI, Serie V (www.inegi.gob.mx). En otras palabras, solo se consideraron los registros de *C. dodecandra* que aún se encuentran en áreas naturales. Este modelo de distribución asume que el

hábitat transformado en sistemas agrícolas o asentamientos humanos es inadecuado para la presencia a largo plazo de la especie (Sánchez-Cordero *et al.*, 2005).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mapa de distribución conocida

Se analizaron 13,369,929 hectáreas de la superficie continental peninsular. La mayor presencia de registros de *C. dodecandra* se encontró en la Reserva de la Biosfera Calakmul en Campeche, seguida por el estado de Yucatán (Reserva Biocultural Puuc) y el centro de Quintana Roo (cerca del municipio de Felipe Carrillo Puerto) (Figura 1). La especie se encuentra distribuida en mayor parte en áreas con selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia.

Mapa de distribución potencial

El modelo de DP generado por MaxEnt, indicó las áreas donde *C. dodecandra* estaba presente o podría estar presente. Las áreas con bajo nivel de probabilidad representaron el 46% de la superficie peninsular, las áreas de nivel de probabilidad medio, representaron el 35% de las áreas de superficie y el nivel alto de probabilidad (cubrieron el 19% del área total). Los resultados de la cobertura y distribución de *C. dodecandra* (Cuadro 2), mostraron una degradación o pérdida del hábitat potencial causado por cambios en el uso de la tierra. El nivel alto de probabilidad para la DP es 2,501,938 hectáreas, este mismo nivel para DPC pierde el 2% del área de superficie, se distribuye principalmente en los bosques secos tropicales, subcaducifolios y subperennifolios del norte y centro de la PY (Figura 2). Además de las variables ambientales, las características fisiológicas y fenológicas, entre otras, son importantes para evaluar las respuestas de una especie en un modelo de distribución de especies (Moritz y Agudo, 2013).

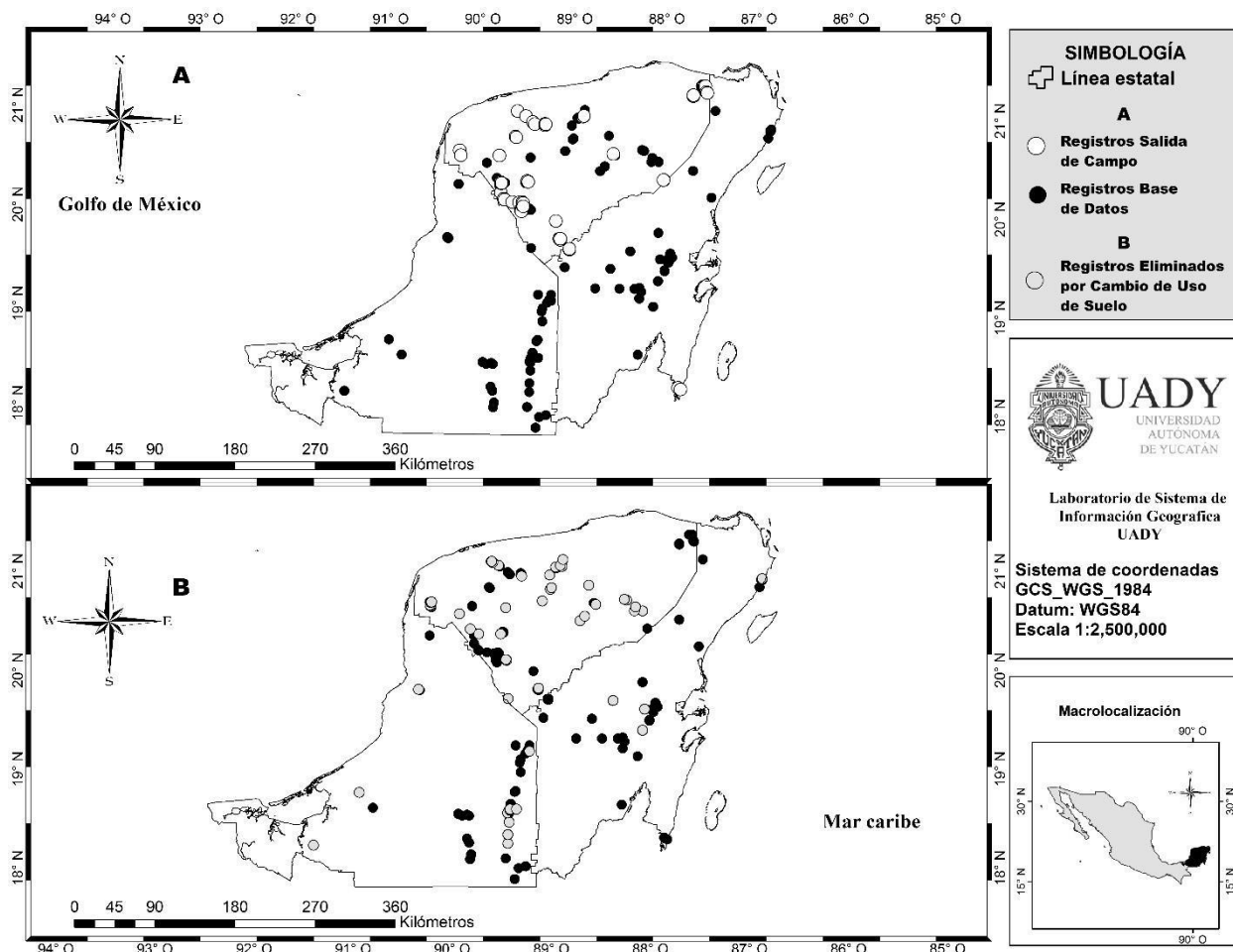


Figura 1. Mapa de distribución conocida (DC) de *C. dodecandra* A) elaborado con todos los registros obtenidos de los herbarios y datos recopilados en el campo (235). B) elaborado con todos los registros obtenidos de los herbarios y datos recopilados en el campo menos registros eliminados (55) después del análisis del uso de la tierra.

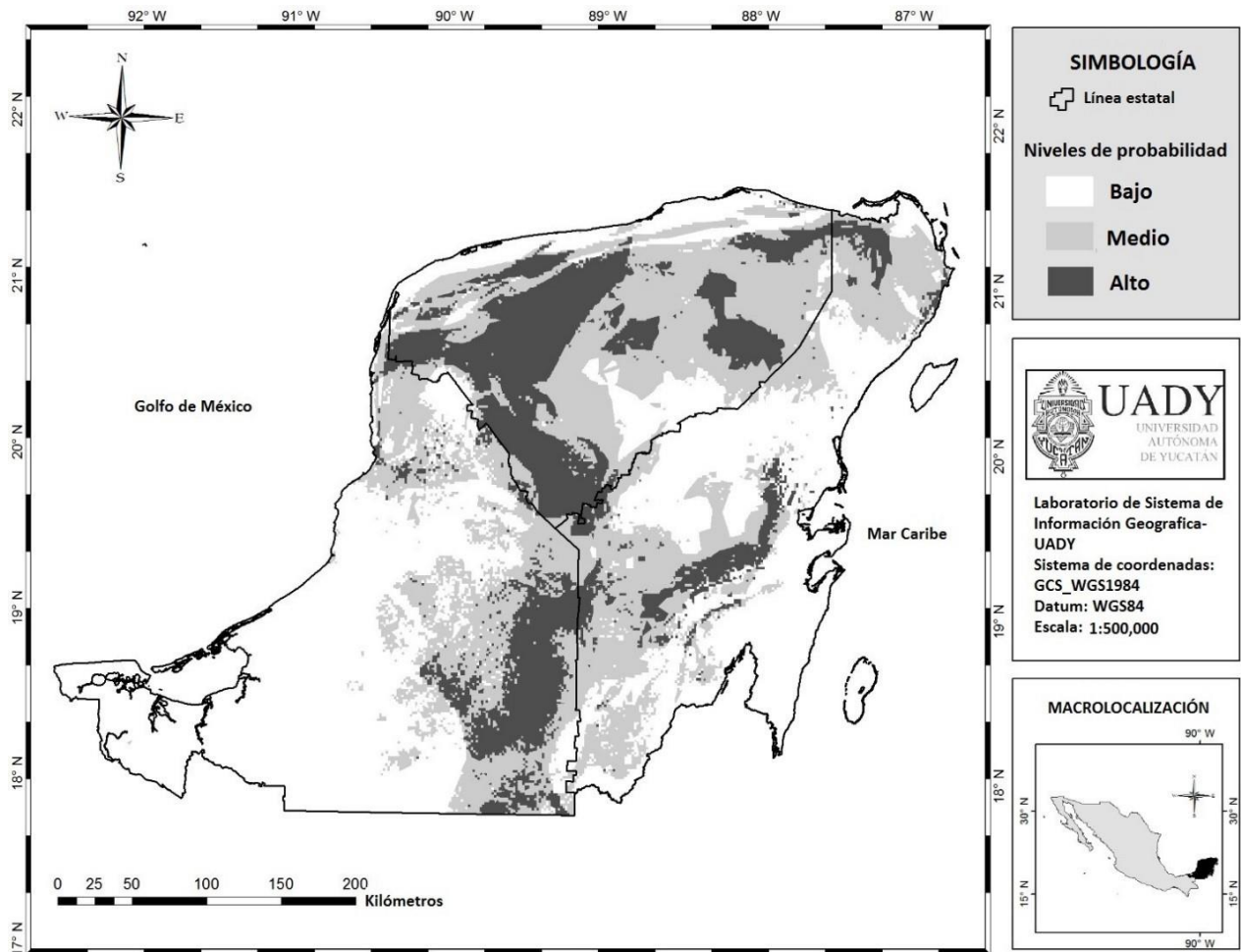


Figura 2. Mapa de distribución potencial de *C. dodecandra* en la PY según lo determinado por MaxEnt (incluye todos los registros de presencia disponibles de la especie). Los niveles indican la probabilidad de encontrar las especies en estas áreas.

Distribución potencial (DP) y distribución potencial corregida (DPC) de *C. dodecandra*

En el mapa de DPC se puede observar que la región del noreste de la PY (municipios de Tizimín y Valladolid) prácticamente pierde todas las áreas con alta probabilidad, lo que es un reflejo de la afectación de la transformación de estas zonas a un uso agrícola. En el estado de Campeche, la especie se distribuyó desde la Reserva de la Biosfera de Calakmul en el sur hasta el centro del estado de Yucatán, donde la fragmentación de la vegetación y la pérdida de conectividad se hicieron claramente visibles. En Quintana Roo, las áreas con niveles promedio de probabilidad aumentaron prácticamente en todo el estado. Los registros de presencia fueron más abundantes en la Reserva de la Biosfera de Calakmul, una de las

regiones mejor conservadas de la PY, lo que conduce a una importante distribución potencial en esta zona.

Las diferencias entre el mapa de DP y el mapa de DPC destacan claramente el daño antropogénico del hábitat en la región, particularmente los cambios en el uso del suelo (Figura 3). De toda la península, la zona norte exhibió la tasa más alta de pérdida potencial de vegetación debido a la deforestación activa en esta zona (Céspedes y Sánchez, 2010). La actividad humana ha reducido la DP de *C. dodecandra*, esto es particularmente notable en el norte de la PY, y a lo largo de un corredor que se extiende desde Calakmul al norte de Mérida. Sin embargo, todavía se observa conectividad entre la Reserva de la Biosfera de Calakmul y el municipio de Felipe Carrillo Puerto.

Cuadro 2. Niveles de probabilidad de distribución del área ocupada para *C. dodecandra*.

| Niveles de Probabilidad | DP (ha) | SO (%) | DPC (ha) | SO (%) |
|-------------------------|------------|--------|------------|--------|
| Bajo (0.1 - .33) | 6,143,806 | 46 | 5,966,093 | 45 |
| Medio (.34 - .66) | 4,724,185 | 35 | 5,167,337 | 38 |
| Alto (.67 - .99) | 2,501,938 | 19 | 2,236,499 | 17 |
| Cobertura total | 13,369,929 | 100 | 13,369,929 | 100 |

SO = Superficie ocupada; DP = Distribución potencial (incluye todos los registros de presencia disponibles de la especie); DPC = Distribución potencial corregida (registros restantes después del análisis del uso de la tierra).

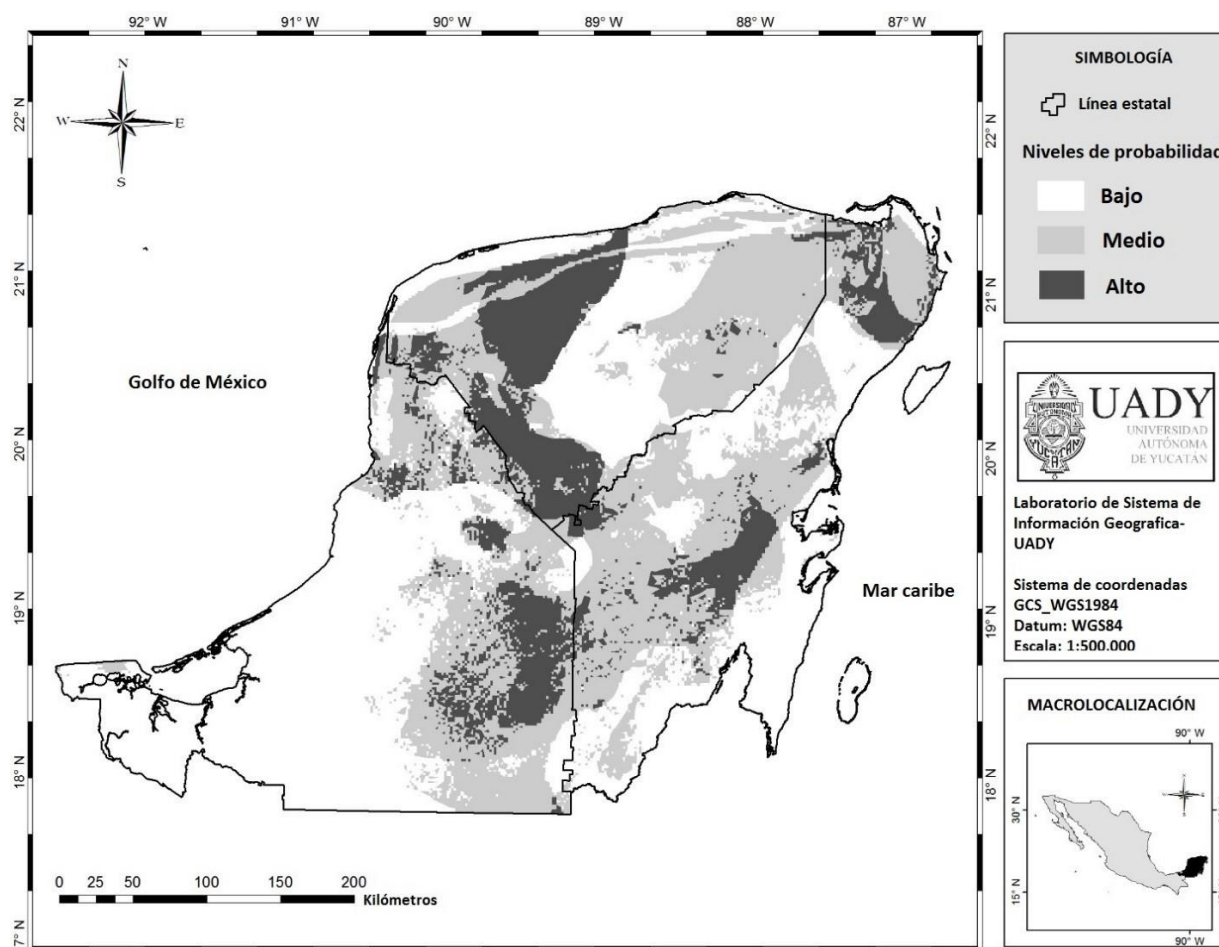


Figura 3. Mapa de distribución potencial corregida de *C. dodecandra* después del análisis del uso de la tierra (INEGI, 2012). Los niveles indican la probabilidad de encontrar las especies en estas áreas.

El modelo de distribución potencial corregido, predice que las áreas con actividades antropogénicas son sitios con nulas probabilidades para la especie, sin embargo, hay que tomar en cuenta que en la actualidad la especie, forma parte importante en la estructura de los huertos familiares en comunidades rurales (Jiménez *et al.*, 1999), creciendo en condiciones diferentes a las de su hábitat natural (Campo, 2015).

Análisis de variables

La curva operacional generada por el modelo MaxEnt, el área bajo la curva (AUC), muestra la alta capacidad para predecir el comportamiento de los datos para la DP, los datos de prueba (UAU) indican el grado de adaptación del modelo a los datos y un valor de 0.5 es lo que se esperaría bajo una predicción completamente aleatoria. Los valores para el AUC que van de 0.7 a 0.9

se consideran modelos con una fuerza de concordancia considerable, aunque este valor estadístico depende del número de registros de presencia, así como del tamaño total del área de estudio (Plischoff y Fuentes, 2011). Los modelos producidos por MaxEnt para los 2 mapas diferentes de DP tuvieron una exactitud aceptable, debido a la confiabilidad de las variables ambientales empleadas y el número de puntos registrados (235 para DP y CC / DP) (Cuadro 3). El rendimiento del modelo mejora cuanto mayor sea el número de registros incorporados en él (Guisan *et al.*, 2006).

Cuadro 3. Área bajo la curva (AUC), capacidad de predicción de los registros, para el modelado de la distribución.

| | DP | DPC |
|------------------------|-----------|----------|
| Datos de entrenamiento | AUC=0.87 | AUC=0.85 |
| Datos de prueba | UAUC=0.74 | UAU=0.71 |
| Predicción aleatoria | AUC=0.5 | AUC=0.5 |

DP = Distribución potencial (incluye todos los registros de presencia disponibles de la especie); DPC = Distribución potencial corregida (registros restantes después del análisis del uso de la tierra).

La prueba de Jackknife (Figura 4) identificó que las principales variables ambientales que afectan la distribución de la especie *C. dodecandra* para los modelos de DP y DPC fueron el tipo de clima, la

precipitación del mes más húmedo, la precipitación del trimestre más húmedo y la precipitación anual.

La variabilidad de la vegetación se debe a requerimientos y condiciones ecológicas específicas que determinan la distribución y biodiversidad de cada especie. Algunas especies se desarrollan en regiones geográficas y hábitats específicos y son propensas a las condiciones ambientales cambiantes (Yilmaz *et al.*, 2017). Esas condiciones están influenciadas principalmente por factores climáticos, antropogénicos y topográficos (Pardo *et al.*, 2018).

Las variables climáticas, geográficas y geológicas utilizadas en el presente modelo son importantes para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Jaramillo-Robledo, 2005). Los parámetros climáticos (por ejemplo, la precipitación del mes más húmedo, la precipitación anual y la precipitación del trimestre más húmedo) son vitales para establecer nuevas zonas de reforestación (Yam-Chin *et al.*, 2014). En los resultados actuales, la variable ambiental del clima tuvo la mayor influencia en el establecimiento de especies. Dos tipos de clima tienen la mayor probabilidad de soportar *C. dodecandra*. El primero fue Aw1 (xi), caracterizado por calor subhúmedo; temperatura media anual > 22 ° C; temperatura en el mes más frío > 18 ° C; precipitaciones en el mes más seco < 60 mm; lluvias de verano; y precipitaciones invernales > 10.2% de la precipitación total anual. El segundo fue Awo, caracterizado por precipitaciones en

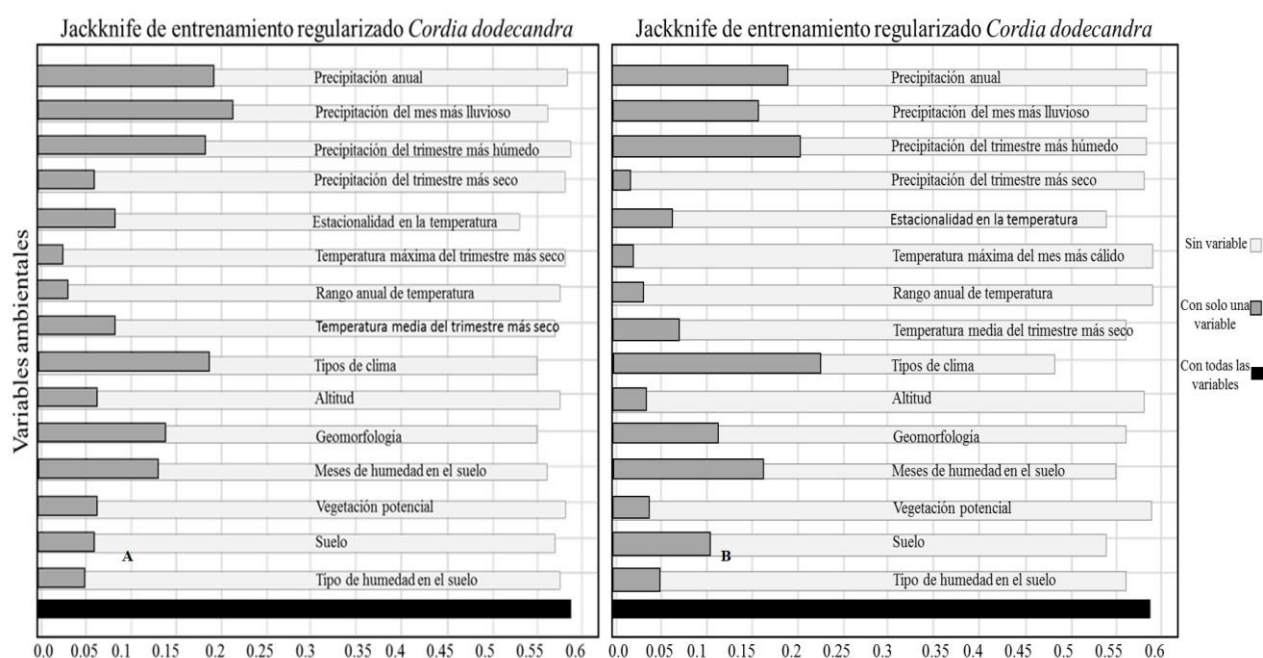


Figura 4. Principales variables ambientales que influyen en la distribución potencial de *C. dodecandra* generada por MaxEnt; A) Incluyendo todos los registros de presencia disponibles de la especie (DP). B) Utilizando los registros restantes después del análisis del uso de la tierra (DPC).

el mes más seco de 0 a 60 mm; lluvias de verano con índice de precipitación / temperatura <43.2; y precipitaciones invernales del 5 al 10,2% de la precipitación total anual. Estos climas tropicales relativamente secos promueven el establecimiento de *C. dodecandra* en la PY, en parte porque es una especie heliófita (Yam-Chin *et al.*, 2014). Estudiar las variables ambientales, topográficas y antropogénicas en la distribución de las especies es indispensable ya que permite entender las relaciones en el desarrollo espacio-temporal de sus poblaciones a una escala local, proporcionando información sobre el efecto potencial de la variabilidad climática para su desarrollo y determinar posibles áreas de refugio o conservación a futuro (González-Cubas *et al.*, 2020).

El tipo de suelo también fue identificado como una variable importante para el establecimiento de *C. dodecandra*. Los más propicios fueron Leptosol, Regosol y Vertisol, que coincide con informes anteriores (Janick y Paull, 2006). De hecho *C. dodecandra* puede establecerse en suelos con pH relativamente alto (7,6-7,8) que contienen carbonatos, en áreas con una precipitación anual de > 500 mm y 900 m sobre el nivel del mar. Campos (2010), señala que *C. dodecandra* se encuentra en peligro inminente de desaparecer de su distribución natural, sin embargo, los modelos predicen que se podría ver afectada positivamente con la variabilidad climática. Los jardines de las casas han funcionado como refugio para *C. dodecandra*, ya que alguna vez fue un cultivo importante (Montañez-Escalante *et al.*, 2012). No obstante, ahora incluso está desapareciendo de las áreas urbanas debido a que los esquemas actuales de desarrollo de viviendas no permiten suficiente espacio para los árboles en los patios. La tolerancia de las especies de plantas a los factores ambientales es uno de los criterios más importantes en la recuperación de bosques, los procesos de reforestación y el enriquecimiento de la vegetación nativa (Rao *et al.*, 2008).

Por otro lado, el conocimiento de la distribución potencial de la especie nos permite predecir los cambios esperados en su distribución, no solo frente a los cambios de uso del suelo sino también a fenómenos naturales o acciones humanas que puedan alterar alguna de las variables consideradas como óptimas para la especie. En este sentido, los modelos de clima, especialmente los modelos de circulación general de la atmósfera (MCG), los cuales se consideran como las herramienta más confiables para simular la respuesta del sistema climático global, frente al incremento de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por acciones humanas, que reflejan en los cambios en la transparencia de la atmósfera a la radiación terrestre, en la temperatura, presiones, nubosidad (Orellana *et al.*, 2010), sugieren que en la PY las mediciones de gases de efecto invernadero seguirán una tendencia del

escenario trayectorias de concentración representativas 8.5 (RCP 8.5) (Appendini *et al.*, 2017), lo que aumentará la temperatura y variabilidad climática de la península con un mayor riesgo de ocurrencia de ciclones y huracanes. Si estas predicciones son correctas la distribución de *C. dodecandra* podría verse favorecida ya que de acuerdo a los resultados de este estudio la especie prefiere condiciones de altas temperaturas y precipitación.

CONCLUSIONES

Las áreas de distribución potencial con mayor probabilidad de presencia de Siricote (*C. dodecandra*) en la PY fueron la Reserva de la Biosfera Calakmul, sur y centro del estado de Yucatán, y el municipio de Felipe Carrillo Puerto en el estado de Quintana Roo.

Las principales variables ambientales que afectan la DP de *C. dodecandra* fueron, precipitación del mes más húmedo, tipo de clima, precipitación anual y la precipitación del trimestre más húmedo, en contraste las variables más importantes para la DPC fueron los tipos de clima, precipitación del trimestre más húmedo y precipitación anual.

La DP de *C. dodecandra* se ve afectada negativamente por el cambio en el uso de la tierra. Por lo tanto, monitorear la distribución natural de esta especie a través del tiempo podría ser un indicador de los efectos de las presiones antropogénicas en la PY.

Agradecimientos

Agradecemos a las siguientes organizaciones e institutos por su asistencia y apoyo: Sistema Nacional de Datos de Biodiversidad (SNIB), Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica-UADY, Comisión Nacional del Agua. (Comisión Nacional del Agua - CONAGUA) y el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY).

Financiamiento. La investigación fue financiada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) a través del proyecto “Efecto de la domesticación en la diversidad biológica y la interacción planta-suelo de los árboles nativos de la Península de Yucatán. Clave: CB2014-236428”.

Conflicto de interés: Los autores declaran que no existe conflicto de intereses relacionados con esta publicación.

Cumplimiento de las normas éticas: No aplica.

Disponibilidad de datos: Los datos están disponibles con (José L. Cámara-Romero¹, josecamara84@gmail.com previa solicitud razonable.

REFERENCIAS

- Ahlers, A., Heske E., and Schooley, R., 2016. Prey distribution, potential landscape supplementation and urbanization affect occupancy dynamics of American mink in streams. *Landscape Ecol*, 31:1601–1613. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0350-5>.
- Appendini, Christian., López, Brenda., Cauich Citlaly., and Meza-Padilla, R., 2017. Ciclones tropicales y cambio climático en la Península de Yucatán. En: Garza-Pérez J.R. y Ize-Lema I.A.R. eds. *Caracterización Multidisciplinaria de la Zona Costera de Sisal, Yucatán*. Yucatán, México. LANRESC. <https://www.lanresc.mx/intranet/noticias/ZONA%20COSTERA%20SISAL.pdf>
- Bautista F., G. Palacio, M Ortiz, E Batllori and M. Castillo., 2005. El origen y el manejo maya de las geoformas, suelos y aguas en la Península de Yucatán. In: F. Bautista y G. Palacio. Eds. *Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: Implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales*. UACAM-UADY-INE. pp 21-32. México D. F., México. ISBN 968 5722-13-7
- Benito de Pando, B., and Peñas de Giles, J., 2007. Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica, *Geo Focus* 7: 100-119.
- Campos B., S.M., J.J. Jiménez-Osornio., and Barrientos, R., 2015. Análisis dasométrico de plantaciones de siricote (*Cordia dodecandra* A. DC.) bajo tres tipos de manejo en Xmatkuil, Yucatán. *Madera y Bosques*, 21(3):47-54. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.213455>.
- Campos, M., 2010. Boraginaceae. In: Villalobos Zapata G.J. y J. Mendoza Vega (Coords), *La Biodiversidad en Campeche. Estudio de Estado*. CONABIO/Gob. Del Estado de Campeche/PPD-PNUD/CBM. Colección Bicentenario. México: 729 p. ISBN: 978-607-7887-22-5. p: 222-227. <https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium-bin/detalle.pl?Id=20201121160328>
- Céspedes, F., and Sánchez, E., 2010. Estimación del valor de la pérdida de recurso forestal y su relación con la reforestación en las entidades federativas de México. *Investigación Ambiental*, 2 (2): 5-13.
- CONAFOR. Comisión Nacional Forestal. 2007. *SIRICOTE (Cordia dodecandra A.DC.). Protocolo para su Colecta, Beneficio y Almacenaje*. Departamento de Conservación y Restauración de Ecosistemas Forestales Programa de Germoplasma Forestal Estado de Yucatán. Comisión Nacional Forestal. Mérida, Yucatán.
- Cruz-Leyva, I., 2014. *Cambio climático y distribución potencial del bosque mesófilo de montaña en el centro de México*. Tesis de doctorado. Colegio de postgraduados, Institución de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas.
- Durán, R., and García G., 2010. Distribución espacial de la vegetación. In: Durán, R. y M. Méndez. eds. *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán*. Yucatán, México. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. p: 131-135. <https://www.cicy.mx/sitios/biodiversidad-y-desarrollo-humano-en-yucatan>
- Elith, J., Phillips, J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y., and Yates, C., 2016. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17(1): 43-57. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>.
- ESRI. Environmental Systems Research Institute. 2010. *ArcGis Professional Gis for desktop, ArcMap version 10.0*. Redlands, California.
- Fick, S., and Hijmans, R., 2017. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. USA.
- Flores, J., Durán, G., and Ortiz, D., 2010. Comunidades vegetales terrestres. In: Durán, R. y M. Méndez. eds. *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán*. Yucatán, México. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. p: 125-129. <https://www.cicy.mx/sitios/biodiversidad-y-desarrollo-humano-en-yucatan>
- Franklin, J., and Miller, J., 2010. Mapping species distributions: Spatial inference and prediction. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511810602>
- Gómez, P., 2011. *Guía para la elaboración de mapas de distribución potencial*. Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad Veracruzana. Boletín Técnico. 39 p.
- González-Cubas, R., Treviño-Garza, J., Aguirre-Calderón, A., and Foroughbakhch-Pournavab, R., 2020. Distribución potencial de *Abies vejarii* (Pinaceae) y su relación con factores ambientales, topográficos y

- antropogénicos en el noreste de México. *Acta botánica mexicana*, (127), e1607. Epub <https://dx.doi.org/10.21829/abm127.2020.1607>.
- Guisan, A., y Zimmermann, N. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135(2-3): 147-186. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00354-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00354-9).
- Guisan, A., Broennimann, O., Engler, R., Vust, M., Yoccoz, N., Lehmann, A., and Zimmermann, N., 2006. Using niche-based models to improve the sampling of rare species. *Conservation Biology*, 20(2): 501-511. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00354.x>.
- Hawkins, B., and Pausas, J., 2004. Does plant richness influence animal richness? The mammals of Catalonia (NE Spain). *Diversity and Distributions*, 10(4): 247-252. <https://doi.org/10.1111/j.1366-9516.2004.00085.x>.
- Janick, J., and Paull, R., 2006. *The Encyclopedia of Fruit & Nuts*. Cambridge University Press, U.K. 160 p.
- Jaramillo-Robledo, A., 2005. La redistribución de la radiación solar y la lluvia dentro de las plantaciones de café (*Coffea arabica* L.). *Revista Académica Colombiana de Ciencia*, 29 (112): 371-382. 2005. ISSN 0370-3908.
- Jiménez-Osornio, J.J., M.R. Ruenes., and Montañez P., 1999. Agrobiodiversidad de los solares de la Península de Yucatán. *Red de Gestión de Recursos Naturales* 14:30-40.
- Kumar, S., and Stohlgren, T., 2009. MaxEnt modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology and natural Environment*, 1(4), 94-98. <https://doi.org/10.5897/JENE.9000071>.
- Montañez-Escalante, P., Ruenes-Morales, M., Jiménez-Osornio, J., Chimal-Chan, P., and López-Burgos, L., 2012. Los Huertos Familiares o Solares en Yucatán. In: Mariaca M.R. ed. *EL Huerto Familiar en el Sureste de México*. Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental del Estado de Tabasco, ECOSUR, México. 1331-147. https://www.academia.edu/8025303/El_huerto_familiar_del_sureste_de_M%C3%A9xico
- Moritz C, Agudo R., 2013. The future of species under climate change: resilience or decline? *Science* 2; 341(6145):504-8. <https://doi.org/10.1126/science.1237190>.
- Orellana, R., Espadas-Manrique, C., Conde, C., and Gay, C., 2010. *Atlas de escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán*. CICY. ISBN: 9786077823018. <http://www.ccpay.gob.mx/agenda-regional/escenarios-cambio-climatico/atlas/>
- Pardo, A., Cáceres, Y., and Pulido, F., 2018. Rangewide determinants of population performance in *Prunus lusitanica*: Lessons for the contemporary conservation of a Tertiary relict tree. *Acta Oecologica*, 86: 42-48. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2017.12.001>.
- Pennington, T., and Sarukhán, J., 2005. *Árboles Tropicales de México: Manual para la identificación de las principales especies*. 3rd ed. Universidad Autónoma de México-Fondo de Cultura Económica. México.
- Peterson, A., Soberón, J., Pearson, G., Anderson, P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., and Araújo, B., 2011. *Ecological niches and geographic distributions*. Princeton, University Press. 314 p. <https://doi.org/10.1515/9781400840670>.
- Phillips, S., Anderson, R., and Schapire, R. 2006., Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4): 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03>.
- Pliscoff, P., and Fuentes-Castillo, T., 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: 61-79. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022011000100005>.
- Quipuscoa, S., Dillon, O., Treviño, Z., Balvin, A., Mejía, R., Ramos, A., Durand V., and Montesinos, T., 2019. Impacto de los cambios climáticos y uso de suelo, en la distribución de las especies de géneros endémicos de Asteraceae de Arequipa. *Arnaldoa*, 26(1), 71-96. <http://dx.doi.org/10.22497/arnaldoa.261.26105>.
- Rao, P., Kaur, A., and Tewary, A., 2008. Drought resistance in seedlings of five important tree species in Tari region of Uttarakhand. *Tropical Ecology*, 49(1):35-42. http://www.tropecol.com/pdf/open/PDF_49_1/05%20Rao.pdf
- Sánchez-Cordero, V., Illoldi-Rangel, P., Linaje, M., Sarkar, S., and Peterson, A., 2005.

- Deforestation and extant distributions of Mexican endemic mammals. *Biological Conservation*, 126(4):465-473. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.06.022>.
- Singh, H., Garg, D., Karnatak, C., and Roy, A., 2018. Spatial landscape model to characterize biological diversity using R statistical computing environment. *Journal of Environmental Management*, 206: 1211-1223. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.055>.
- Sistema de Información para la Reforestación (SIRE). 2005. *SIRE–Paquetes Tecnológicos. Cordia dodecandra*. CONABIO-PRONARE. <https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/catalogo-maderas-tomo2.pdf>
- Skov, F., 2000. Potential plant distribution mapping based on climatic similarity. *Taxon*, 49(3): 503-515. <https://doi.org/10.2307/1224346>.
- Soberón, J., 2007. Grinnellian and Eltonian niche and geographic distributions of species. *Ecology Letters*, 10(12): 1115-1123. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01107.x>.
- Swenson, N., 2008. The past and future influence of geographic information systems on hybrid zone, phylogeographic and speciation research. *Journal of Evolutionary Biology*, 21(2): 421-434. <https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2007.01487.x>.
- Yackulic, C., and Ginsberg, J., 2016. The scaling of geographic ranges: implications for species distribution models. *Landscape Ecol*, 31:1195–1208. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0333-y>.
- Yam-Chin, C., Montañez-Escalante, P., and Ruenes-Morales, R., 2014. Crecimiento de plantas jóvenes de *Cordia dodecandra* (Boraginaceae) en tres etapas sucesionales de vegetación en Calotmul, Yucatán. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 5(2), 589-597. <https://doi.org/10.7550/rmb.34996>.
- Yilmaz, H., Yilmaz, Y., and Akyüz, F., 2017. Determining the factors affecting the distribution of *Muscari latifolium*, an endemic plant of Turkey, and a mapping species distribution model. *Ecology and Evolution*, 7(4): 1112-1124. <https://doi.org/10.1002/ece3.2766>.