

# DISTRIBUCIÓN DEL *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham. BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN EL EJE NEOVOLCÁNICO, MÉXICO

## DISTRIBUTION OF *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham. UNDER SCENARIOS OF CLIMATE CHANGE IN THE NEOVOLCANIC AXIS, MEXICO

Pérez-Miranda, R.<sup>1\*</sup>; Romero-Sánchez, M.E.<sup>1</sup>; González-Hernández, A.<sup>1</sup>; Pérez-Sosa, E.<sup>2</sup>; Flores-Ayala, E.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales, Inifap. Av. Progreso #5, Colonia Barrio de Santa Catarina, Delegación Coyoacán, Ciudad de México, CP. 04010. <sup>2</sup>Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. <sup>3</sup>Centro Experimental Valle de México, INIFAP. Km.13.5 de la Carretera los Reyes-Texcoco, Coatlínchan, Texcoco, Estado de México, C.P. 56250.

\*Autor de correspondencia: perez.ramiro@inifap.gob.mx.

### RESUMEN

El oyamel (*Abies religiosa*) es una especie de clima templado de altas montañas, localizado en estados centrales de México. La especie sirve de alojamiento de la mariposa monarca, que proviene de Estados Unidos y Canadá, y por ello su importancia ecológica. Se determinó la distribución potencial actual y bajo escenarios de cambio climático (CC) de los bosques de oyamel en el Eje Neovolcánico Transversal. Los modelos de distribución se obtuvieron aplicando el algoritmo GARP en combinación con coberturas climáticas, topográficas, de vegetación, edafológicas y puntos de presencia de la especie. De acuerdo a los resultados, el área de distribución potencial actual del oyamel se concentra principalmente en los estados de México, Morelos, Michoacán, Querétaro, Ciudad de México y Puebla con 5,190,902 ha. La posible distribución bajo escenarios de CC RCP4.5 para el año 2039 sería de 8,060,023.10 ha, esencialmente en Hidalgo, Estado de México, Morelos, Michoacán, Querétaro y Ciudad de México. Los resultados sugieren un incremento potencial de la distribución de la especie en los escenarios actuales y con CC.

**Palabras clave:** oyamel, distribución potencial, modelado espacial, cambio climático.

### ABSTRACT

The sacred fir (*Abies religiosa*) is a species of high mountain temperate climate, found in the central states of México. The species serves as shelter for the monarch butterfly, which travels from the United States and Canada, and therefore has ecological importance. The current potential distribution of the sacred fir forests was determined, as well as under scenarios of climate change (CC), in the Transversal Neovolcanic Axis. The distribution models were obtained by applying the GARP algorithm in combination with climate, topographic, vegetation, soil coverages, and points of presence of the species. According to the results, the current potential distribution area of the sacred fir is concentrated mostly in the states of Estado de México, Morelos, Michoacán, Querétaro, Ciudad de México and Puebla with 5,190,902 ha. The possible distribution under scenarios of CC RCP4.5 for the year 2039 would be 8,060,023.10 ha, essentially in Hidalgo, Estado de México, Morelos, Michoacán, Querétaro and Ciudad de México. The results suggest a potential increase in the species distribution under the current scenarios and with CC.

**Keywords:** sacred fir, potential distribution, spatial modelling, climate change.



## INTRODUCCIÓN

El *A. religiosa* conocida como oyamel, es una especie forestal nativa de las altas montañas de México (2100 a 3500 m) (Conafor, 2014; Farjon, 2013), y crece en suelos de buen drenaje de origen volcánico. Predomina en climas frescos, con precipitaciones media anual mayores a 1000 mm. En elevaciones altas se encuentra en masas puras, pero a veces se mezclan con *Pinus montezumae*, *P. hartwegii*, *Pseudotsuga menziesii* var. *glauca*; en elevaciones bajas con *Quercus* spp., *Alnus acuminata*, *Prunus serotina*, y *Arbutus* spp. (Farjon, 2013). La distribución geográfica de los oyametales es dispersa y localizada. En la mayor parte de los casos la comunidad se presenta en forma de manchones aislados. Los bosques de oyamel se ubican en áreas confinadas en laderas de cerros, por lo regular protegidas de vientos fuertes e insolación intensa. Se hallan en microclimas especiales formadas por cañadas o barrancas más o menos profundas (Rzedowski, 2006). Los bosques de mayor extensión se presentan en el Eje Neovolcánico Transversal, en la Sierra Madre del Sur, y en pequeñas regiones de la Sierra Madre Occidental y escasamente en la Sierra Madre Oriental (Rzedowski, 2006). Ecológicamente, es una especie de gran importancia ya que sirve como árbol de hibernación anual (en la zona centro de México) de la mariposa monarca (*Danaus plexippus*). De acuerdo con la Lista Roja de Especies Amenazadas, se ubica en la categoriza como Preocupación Menor

debido a que aún es una especie extendida y abundante; no obstante, ha tenido una disminución continua de individuos maduros y una población severamente fragmentada (Farjon, 2013). Los trabajos de modelación de la distribución del *A. religiosa* con escenarios de cambio climático como de Gómez *et al.* (2008), Sáenz *et al.* (2012), Pérez *et al.* (2014) Martínez *et al.* (2016) indicando una reducción en su superficie. Con base en lo anterior, se realizó el estudio para conocer la distribución espacial actual del bosque de *Abies religiosa* en el Eje Neovolcánico Transversal y con los nuevos escenarios de cambio climático RCP4.5 aplicados para México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La provincia fisiográfica Eje Neovolcánico (ENV) comprende porciones de los estados de Nayarit, Jalisco, Michoacán, Guanajuato Querétaro, México, Hidalgo, Distrito Federal, Morelos, Tlaxcala, Puebla, Veracruz y pequeñas fracciones de Colima, Aguascalientes, Guerrero, Oaxaca y Zacatecas, México (Figura 1), sus coordenadas extremas de 21° 22' 12" L. N, 18° 23' 24" S, 96° 22' 12" E, y 105° 45' 00" L. O. (Gómez *et al.*, 2005).

En el sistema montañoso del ENV destacan elevaciones como el Citlaltépetl, Cofre de Perote, Iztaccíhuatl, Popocatepetl, Telapón, Tláloc, Xinantécatl, Nevado de Coliman (Yarza, 2003). Los climas que predominan son las variantes de los semicálidos ((A)C), templado subhúmedo C(w), semiárido (BS<sub>0</sub>), templado (C), semifrío (Cb) y frío (E(T)) (García y CONABIO, 1998). La vegetación dominante son la selva baja caducifolia, bosque de pino, bosque de encino, bosque mixto, bosque de oyamel, bosque mesófilo de montaña, táscate, matorral cracicaule, chaparral, mezquital xerófilo, matorral submontano, matorral desértico rose-tófilo, pastizal natural y manglar (INEGI, 2013). Los ríos más importantes están el Lerma, Tula, Necaxa, Armería, Aguascalientes, Tilostoc, Jama-

pa, Verde, Moctezuma,



Figura 1. Localización del Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico Transversal.

Zitácuaro y Cazones (Maderey y Torres, 1990). El bosque de oyamel se encuentra básicamente en el Estado de México, Ciudad de México, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Puebla, Tlaxcala y Veracruz, que en su conjunto suman 124,323.23 ha (INEGI, 2013).

### Generación de variables ecológicas digitales

Se emplearon coberturas topográficas (altura, exposición y pendientes), climáticas (precipitación promedio anual y temperatura media anual), edáfica (pH). Las topográficas se generaron a partir del Continuo Elevación Mexicano 3.0 (CEM) (INEGI, 2014); las climáticas se bajaron del Atlas Climático Digital de México, se usaron interpolaciones por el método inversa a la distancia (Fernández *et al.*, 2016); la edáfica se obtuvo a partir del Conjunto de Datos de Perfiles de Suelos Serie II (INEGI, 2010) y se aplicó interpolación por el método Kriging. El escenario RCP 4.5 de cambio climático usado es de la "Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional", para el horizonte 2039 (Cavazos *et al.*, 2013). Los datos espaciales del escenario se interpolaron por el método de Inversa a la Distancia. Todas las operaciones de coberturas, transformaciones e interpolaciones se llevaron a cabo en el sistema de información geográfica (SIG) ArcGis 10.2.1™; las resoluciones de salida de las coberturas de salida fueron de 100 m. (ESRI, 2016). Se usó el sistema de coordenadas geográficas y datum WGS84.

### Distribución potencial del oyamel mediante el algoritmo GARP

La cobertura de las variables ambientales: climática (actual y con escenarios RCP4.5), topográficas y edáficas, así como una capa de 199 puntos geo referenciados de presencia de *Abies religiosa* de la región bajo estudio, se cargaron en el programa GARP (Programa algoritmo genético basado en reglas). Se hicieron pruebas de los modelos con todas las variables; ejecutando los modelos con diferentes valores de los parámetros de acuerdo a Soberon (2011).

Se consiguió los modelos mejor ajustados utilizando un límite de convergencia de 0.001 y con un valor máximo de iteraciones de 3000. Se mantuvieron las 100 corridas para generar los modelos y se dejó que el programa utilizara los cuatro tipos de reglas. Se empleó la herramienta "Best Subset" para encontrar los mejores modelos con una baja omisión (Soberon, 2011). Los mejores modelos se multiplicaron para obtener un mapa que mostró la presencia/ausencia de la especie.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Distribución potencial de oyamel con escenario actual

Las condiciones ambientales que permitirían la distribución de la especie se encuentran en su mayoría en los estados de México, Morelos, Michoacán, Querétaro, Distrito Federal, Puebla, Hidalgo y Tlaxcala y en menor medida en algunas zonas de Veracruz, Jalisco y Colima. Las áreas con presencia del oyamel bajo este escenario coinciden con las zonas de bosque de oyamel en la región, aunque las áreas con las condiciones óptimas sobrepasan los lugares donde se encuentra la especie (Figura 2).

La Figura 2 muestra el área actual donde la especie se presenta de manera natural (color rojo) que coincide con los resultados obtenidos por el modelo generado en GARP (color verde). A ello le denominan el área de "Movilidad" de los tres factores que intervienen en la dis-

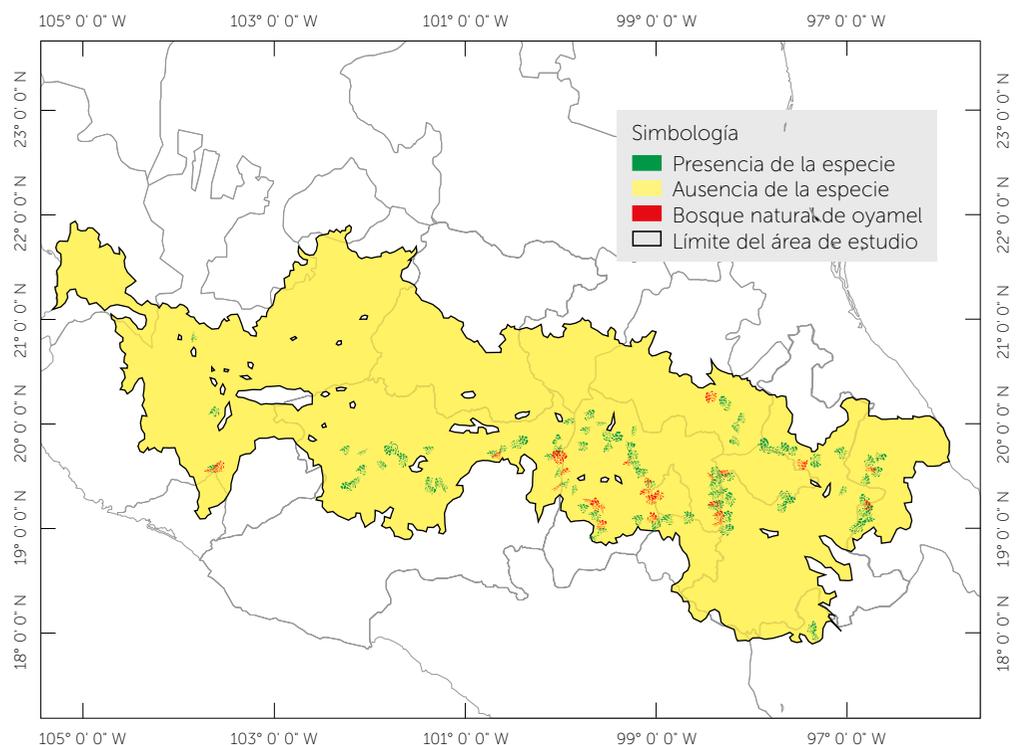


Figura 2. Distribución potencial actual de presencia de *A. religiosa* en el ENT.

tribución de una especie: Biótico, Abiótico y Movilidad (BAM; Soberón y Peterson (2005). Es decir, son lugares con ambientes adecuados para que la especie esté presente, pero se restringe por factores abióticos como el uso del suelo y otros bióticos. De acuerdo al modelo, la superficie con condiciones de presencia de la especie prospere es de 5,190,902 ha (Cuadro 1), de las cuales destacan los estados de México, Morelos, Michoacán, Querétaro, Ciudad de México y Puebla.

**Distribución potencial de oyamel con escenario RCP4.5**

Bajo el escenario de cambio climático RCP4.5 en el año 2039 las entidades con mayor superficie donde se pueden encontrar las condiciones óptimas para *Abies religiosa* son los estados de Hidalgo, México, Morelos, Michoacán, Querétaro, Distrito Federal, Puebla, Tlaxcala y Veracruz y en menor superficie las entidades de Oaxaca, Jalisco, Aguascalientes, Guanajuato, Guerrero y Colima (Figura 3).

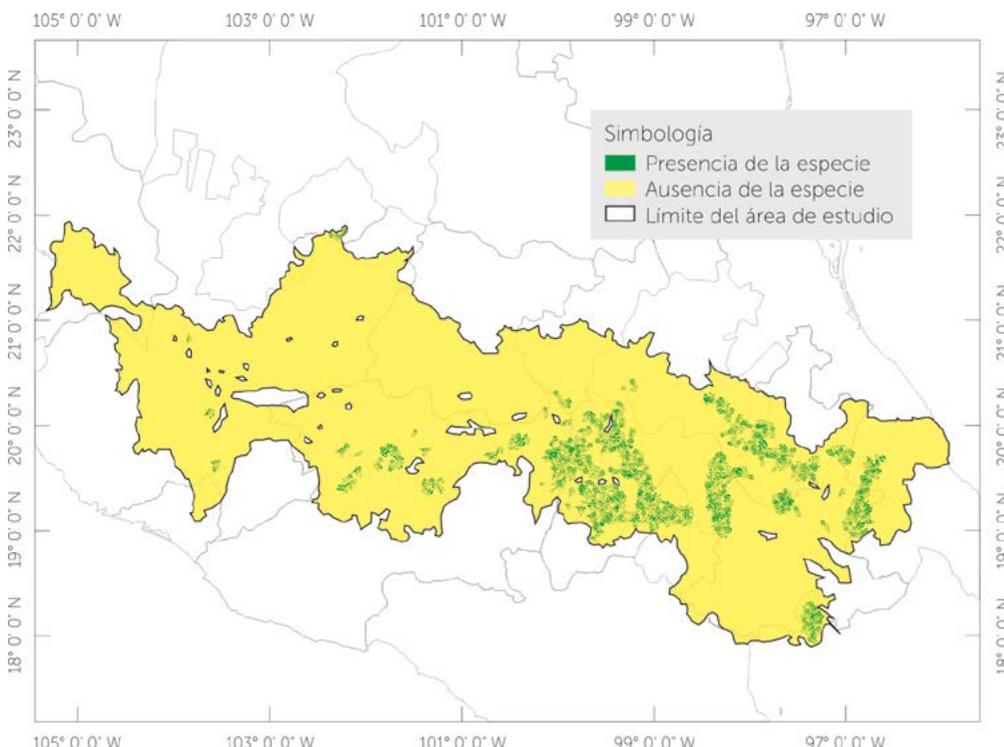
La superficie total donde la especie estaría presente son 8,060,023.10 ha (Cuadro 2).

**Cuadro 1.** Superficie de distribución potencial actual de *Abies religiosa* en el EVT.

Entidad	Escenario Actual (ha)	%	Entidad	Escenario Actual (ha)	%
Colima	12,183.20	0.23	Morelos	813,880.00	15.68
Ciudad de México	637,708.90	12.29	Puebla	545,379.50	10.51
Hidalgo	360,900.90	6.95	Querétaro	638,936.40	12.31
Jalisco	17,307.70	0.33	Tlaxcala	358,528.80	6.91
Estado de México	857,695.10	16.52	Veracruz	171,911.30	3.31
Michoacán	776,470.70	14.96	Total	5,190,902.50	100.00

La superficie de distribución aumentaría considerablemente en todas las entidades bajo estudio, habiendo mayor notoriedad en los estados de Hidalgo, México, Morelos, Michoacán, Querétaro y Ciudad de México. Los estados con baja presencia son en las entidades de Nayarit, Zacatecas, Guerrero, Colima, Guanajuato y Aguascalientes. Los resultados de la distribución potencial bajo escenarios de cambio climático obtenidos coinciden con los de Sáenz *et al.* (2012), ya que la presencia del oyamel con el escenario RCP4.5 tiende a distribuirse hacia las partes altas. Estos autores encontraron en sus modelos que habrá un desplazamiento del *A. religiosa*; de acuerdo al gradiente térmico, alrededor de 0.5 °C cada 100 m de altitud. Situación que ya está sucediendo con otras especies reportadas por Lenoir *et al.* (2008), Parolo y Rossi (2008) y Telwala *et al.* (2013). Los resulta-

dos de distribución espacial generadas en este trabajo, demuestran que la especie efectivamente contará con mayor superficie de extensión, incluyendo zonas de mayor altitud en el ENT y en donde no está presente actualmente, lo cual coincide el modelado de nicho ecológico (Soberón y Peterson (2005), sin embargo, hace falta incluir más variables en el modelo que influyen en el desarrollo natural del oyamel. El área de presencia del oyamel coincide con el espacio que ocupa actualmente, presentándose en general en los lugares de mayor altitud, esto confirma que los modelos generados tuvieron un funcionamiento



**Figura 3.** Distribución de la presencia de *A. religiosa* con escenario de cambio climático RCP4.5 año 2039.

**Cuadro 2.** Superficie de distribución potencial de *Abies religiosa* bajo escenario de cambio climático RCP4.5 horizonte 2039 en el ENT.

Entidad	Escenario RCP4.5 (ha)	%	Entidad	Escenario RCP4.5 (ha)	%
Aguascalientes	23,503.40	0.29	Michoacán	1,058,313.50	13.13
Colima	12,522.80	0.16	Morelos	1,090,639.80	13.53
Ciudad de México	869,629.30	10.79	Oaxaca	71,261.90	0.88
Guanajuato	17,828.70	0.22	Puebla	795,469.80	9.87
Guerrero	14,188.50	0.18	Querétaro	889,755.80	11.04
Hidalgo	1,347,703.90	16.72	Tlaxcala	513,454.80	6.37
Jalisco	48,894.10	0.61	Veracruz	183,133.60	2.27
Estado de México	1,123,723.20	13.94	Total	8,060,023.10	100.00

adecuado, ya que se sabe que la especie está presente en los espacios que generaron los modelos del algoritmo GARP. Los resultados indican que la distribución potencial actual del *Abies religiosa* en el ENV es una superficie mayor que la que existe de manera natural. Todo indica que las variables empleadas para generar el modelo prometen mayor territorio para el establecimiento del oyamel, sin embargo, se tiene que generar información cartográfica de escala menor para poder representar la realidad de manera regional actual, y posteriormente bajo escenarios de cambio climático. Ante el cambio de distribución potencial del oyamel a nuevos sitios en un corto tiempo, Sáenz *et al.* (2012) propone realizar una "migración asistida" o "colonización asistida" hacia altitudes mayores; no obstante, implica riesgos de tipo climático, tales como afectaciones de heladas a las plantas, el relieve y calidad de los suelos, entre otros factores. Por lo anterior, merece especial atención las posibles medidas de mitigación y adaptación forestal ante las modificaciones condiciones climáticas. Otro aspecto importante en la distribución actual y futura de *A. religiosa* es justamente su relación con la mariposa monarca, siendo la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca donde ocurre la hibernación invernal de ésta. Si el desplazamiento de *A. religiosa* por efecto del cambio climático es inminente, la respuesta de las mariposas será probablemente benéfico según Sáenz *et al.* (2012) sólo si en el nuevo hábitat se adaptan los árboles. El desarrollo y uso de los modelos predictivos de distribución de especies ha ido en aumento, ya que es la herramienta disponible que permite estimar lo que se puede encontrar en la realidad (Martínez *et al.*, 2004). El desempeño del algoritmo GARP en distintos estudios ha sido catalogado como aceptable por lo que se ha convertido en uno de los modelos más utilizados para el modelado de distribución de especies. No obstante, se tiene que tener

presente que se trata de un modelo, puesto que los resultados pueden ser preliminares en función a la calidad y resolución cartográfica, datos geográficos de presencia, y optimización de los parámetros en el programa GARP. Así como el conocimiento previo de la especie y de los factores que influyen en su distribución son importantes en la intervención del modelo predictivo del nicho ecológico de la especie.

## CONCLUSIONES

**Actualmente** existe un mayor potencial de distribución actual del oyamel en los estados de Colima, Ciudad de México, Hidalgo, Jalisco, México, Michoacán, Morelos, Puebla, Querétaro, Tlaxcala y Veracruz, superior a la existente de bosques naturales. De acuerdo a las condiciones climáticas futuras, en el escenario de CC RCP4.5 para el horizonte 2039, se aumenta el potencial hasta 64.40% más que el actual, localizándose en los mismos estados mencionados, adicionalmente en Aguascalientes, Guanajuato, Guerrero y Oaxaca.

## LITERATURA CITADA

- Cavazos T., Salinas J. A., Martínez B., Colorado G., Grau P., Prieto G. R., Conde Á. A. C., Quintanar I. A., Santana S. J. S., Romero C. R., Maya M. M. E., Rosario C. J. G., Ayala E. M. R., Carrillo T. H., Santiesteban O., Bravo M. E. 2013. Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional. Informe Final del Proyecto al INECC, 150 p.
- CONAFOR. 2014. *Abies religiosa* (Kunth Schltld. et Cham.), Reforestación-Fichas técnicas. En línea: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/873%20Abies%20religiosa.pdf>. Consultado en: marzo de 2016.
- ESRI. 2016. ArcGIS Desktop. En línea: <http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis-for-desktop>. Consultado en: enero de 2016.
- García E., y CONABIO. 1998. Climas (Clasificación de Köppen, modificado por García). Cobertura digital escala 1:1 000 000. México. En línea: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> Consultado en: marzo de 2016.
- Farjon A. 2013. *Abies religiosa*. The IUCN Red List of Threatened Species. En línea: <http://www.iucnredlist.org/details/39592/0>. Consultado en línea: marzo de 2016.
- Fernández E. A., Zavala H. J., Romero C. R. 2016. Atlas Climático Digital de México. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México. En línea: <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/>. Consultado en: marzo de 2016.

- Gómez T. A., Orozco E. M. T., Ferrari L. 2005. Petrogénesis ígnea de la faja volcánica transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 2 (3): 227-285.
- Gómez D. J. D., Monterroso R. A. I., Tinoco R. J. A., Toledo M. M. L. 2008. Impactos del cambio climático en el sector forestal a nivel país. En línea: [http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2008\\_ecc\\_inf\\_forestal.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2008_ecc_inf_forestal.pdf). Consultado en línea: mayo de 2016.
- INEGI. 2010. Conjunto de Datos de Perfiles de Suelos, escala 1:250,000. Serie II (Continuo Nacional). En línea: [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/vectorial\\_serieii.aspx](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/vectorial_serieii.aspx). Consultado en: marzo de 2016.
- INEGI. 2013. Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000, Serie V (Capa Unión). En línea: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/usuarios/> Consultado en: enero de 2016.
- INEGI. 2014. Continúo de Elevaciones Mexicano 3.0. En línea: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx>. Consultado en: enero de 2016.
- Lenoir J., Gegout J. C., Marquet P. A., de Ruffray P., Brisse H. 2008. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science* 320:1768-1771.
- Maderey R. L. E., Torres R. C. 1990. Hidrografía. Extraído de Hidrografía e hidrometría, IV.6.1 (A). Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1: 4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México. En línea: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>. Consultado en: marzo de 2016.
- Martínez M. N., Aguirre P. E., Eguiarte L. E., Jaramillo C. J. P. 2016. Modelado 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.
- Martínez M. E., Peterson A. T., Hargrove W. W. 2004. Ecological niches as stable distributional constraints on mammal species, with implications for Pleistocene extinctions and climate change projections for biodiversity. *Global Ecology and Biogeography* 13:305-314.
- Pérez M. R., Moreno S. F., González H. A., Arriola P. V. J. 2014. Distribución de *Abies religiosa* (Kunth) Schlttdl. et. Cham. y *Pinus montezumae* Lamb. ante el cambio climático. *Revista mexicana de ciencias forestales* 5(25):18-33.
- Parolo G., Rossi G. 2008. Upward migration of vascular plants following a climate warming trend in Alps. *Basic and Applied Ecology* 9:100-107.
- Rzedowski J. 2006. Vegetación de México. 1ra. Edición digital. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. En línea: [http://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx\\_Cont.pdf](http://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf). Consultado en: marzo de 2016.
- Sáenz R. C., Rehfeldt G. E., Duval P., Lindig R. A. 2012. *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management* 275:98-106.
- Soberón J., Peterson A. T. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics* 2: 1-10.
- Soberón J. 2011. Nichos y áreas de distribución. En línea: <http://nicho.conabio.gob.mx/la-calibracion-del-modelo/garp>. Consultado en: marzo de 2016.
- Telwala Y., Brook B. W., Manish K., Pandit M. K. 2013 Climate-induced elevational range shifts and increase in plant species richness in a Himalayan biodiversity epicenter. *PLoS ONE* 8(2) e57103. e57103. doi:10.1371/journal.pone.0057103
- Yarza de T. E. 2003. Los volcanes del Sistema Volcánico Transversal. *Investigaciones Geográficas* 50:221-234.

