



Artículo / Article

## Distribución de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. y *Pinus montezumae* Lamb. ante el cambio climático

### Distribution of *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. and *Pinus montezumae* Lamb. in the face of climate change

Ramiro Pérez Miranda<sup>1</sup>, Francisco Moreno Sánchez<sup>1</sup>,  
Antonio González Hernández<sup>1</sup> y Víctor Javier Arriola Padilla<sup>1</sup>

#### Resumen

En este trabajo se presentan las posibles modificaciones en el paisaje como efecto del cambio climático; para ello, se determinaron los niveles de aptitud del terreno para las especies forestales *Abies religiosa* (oyamel) y *Pinus montezumae* (ocote blanco) en el Estado de México, mediante dos modelos de variación: GFDL 2.0 y HADGEM, con escenarios: A2 y B2, para los años 2030 y 2050. En el caso del oyamel se obtuvo más superficie apta con GFDL 2.0 para 2030 en A2, con aptitud alta y media de 1 220 y 1 687 ha; mientras que con HADGEM en B2, (789 y 1 395 ha). Para el ocote blanco la mayor aptitud se generó con GFDL 2.0 para 2030, con A2, (superior que HADGEM con 740 y 9 689 ha; situación parecida a B2, (alta y media superiores que en HADGEM, con 454 y 8 242 ha, respectivamente). La aptitud alta para *A. religiosa* y *P. montezumae* se reducirá a pequeñas áreas, localizadas en el norte de la entidad, y escasamente en la Sierra Nevada, como consecuencia de la disminución; en contraste, habrá amplias zonas con potencial medio, limitadas por la precipitación, la temperatura y la profundidad del suelo.

**Palabras clave:** *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham., aptitud de terreno, cambio climático, escenarios A2 y B2, *Pinus montezumae* Lamb., superficie potencial.

#### Abstract

Possible changes in the landscape are presented as effect of climate change; for that aptitude levels were determined terrain for religious forest species *Abies* (fir) and *Pinus montezumae* (white ocote) through two patterns of variation: 2.0 and GFDL HADGEM with scenarios: A2 and B2, for 2030 and 2050 in the State of Mexico. For most surface fir aptitude was obtained with 2.0 to 2030 GFDL A2 (with upper and middle of 1 220 and 1 687 has more than similar), while for HADGEM was in B2 (789 and 1 395 ha); in the case of white ocote greater extension was generated with GFDL 2.0 for 2030, A2 (HADGEM greater than 740 and 9 689 ha), similar to situation. B2 (upper and middle HADGEM higher than in 8 242 and 454 ha, respectively). The high ability of these species to these scenarios will be reduced to small areas located north of the state, and scarcely in the *Sierra Nevada*, as a result of the reduced capacity of the ground; in contrast, there will be wide median surface potential but limited rainfall, temperature and soil depth.

**Key words:** *Abies religiosa* (Kunth.) Schltdl. et Cham., suitability soil, climate change, A2 and B2 scenarios, *Pinus montezumae* Lamb., potential areas.

Fecha de recepción/date of receipt: 28 de noviembre de 2011; Fecha de aceptación/date of acceptance: 24 de julio de 2014.

<sup>1</sup> Centro Nacional de investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales, INIFAP. Correo-e: perez.ramiro@inifap.gob.mx

## Introducción

El cambio climático (CC) es un fenómeno en el cual se altera el estado medio del clima o su variabilidad natural durante un periodo prolongado de tiempo (IPCC, 1998). Se considera que una de las consecuencias del CC es el aumento del estrés hídrico en los ecosistemas, provocado por el retraso de las lluvias en primavera, y la consecuente pérdida de humedad en el suelo (Magaña, 2010); sus efectos potenciales impactarán, principalmente, los sectores social, económico, ambiental y de la salud (IPCC, 2007).

Los modelos de circulación general (MCG) describen el comportamiento y las interacciones entre los componentes del sistema climático a nivel global (Sellers y McGuffie, 1987; Trenberth, 1992), y permiten estimar la temperatura en la superficie terrestre en relación con los cuerpos de agua y la orografía continental (McGuffie *et al.*, 1998); en la atmósfera se evalúan los vientos, la humedad, las nubes, así como la concentración de gases, y sus variaciones temporales y altitudinales; en el caso de los océanos, las corrientes marinas, la temperatura, la salinidad y las fluctuaciones en el tiempo y espacio. Las proyecciones de CC emplean distintos contextos de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) con el fin de calcular las concentraciones globales y el forzante radiativo; con estos parámetros se modela el incremento de temperatura en una gama de posibles condiciones para los próximos 100 años, que incluyen variables como el crecimiento demográfico y el económico (Conde *et al.*, 2008).

La distribución geográfica de las especies está determinada por el clima, que influye en el establecimiento y el desarrollo de los individuos (Pearson y Dawson, 2003; Gray, 2005; Lomolino *et al.*, 2005), lo que incide en los patrones de estructura y productividad de la vegetación (Maslin, 2004) y, por lo tanto, en la composición y biología de los seres vivos (Gitay *et al.*, 2002; Rosenzweig *et al.*, 2007).

La comunidad científica tiene sumo interés en conocer las probables modificaciones en la distribución de los ecosistemas forestales, ya que esto es fundamental para la definición de estrategias de manejo eficientes para disminuir la vulnerabilidad y el riesgo de las plantaciones, lo cual es indispensable para tomar acciones de mitigación y adaptación, como la sustitución de taxones y la modificación de prácticas silvícolas en cada región (IPCC, 2007; Magaña, 2010; Lindner *et al.*, 2000).

Los estudios de CC a nivel mundial han proyectado un desplazamiento geográfico de las áreas óptimas para las plantaciones forestales, es por ello que la selección de los sitios para esta actividad debe tomar en cuenta a ese fenómeno, con el fin de asegurar la obtención de los productos esperados (Cervi *et al.*, 2006). Iverson y Prasad (2002) evaluaron 76 especies con

## Introduction

Climate change (CC) is a phenomenon in which the mean state of climate or its natural variability during an extended period (IPCC, 1998) is altered. One of the consequences of the CC is believed to be the increase in hydric stress in the ecosystems, caused by the delay of the rainfalls in the spring, with the resulting loss of soil humidity (Magaña, 2010); its potential effects will affect mainly the social, economic, environmental and health sectors (IPCC, 2007).

General circulation models (GCM) describe the behavior and the interactions between the components of the weather system at a global level (Sellers and McGuffie, 1987; Trenberth, 1992), and they allow estimating the temperature on the land surface compared to that of the water bodies and the continental orography (McGuffie *et al.*, 1998); in the atmosphere, the winds, the humidity, and the clouds are evaluated, as are the gas concentrations and their temporal and altitudinal variations; the estimated features in regard to the oceans are the ocean currents, temperature, salinity and fluctuations in time and space. The CC projections use different greenhouse gas emission (GGE) contexts in order to calculate the global concentrations and the radiative forcing; with these parameters, they model the increase of temperature in a variety of possible scenarios for the next 100 years, which include such variables as demographic and economic growth (Conde *et al.*, 2008).

The geographical distribution of the species is determined by the climate, which influences the establishment and development of the individuals (Pearson and Dawson, 2003; Gray, 2005; Lomolino *et al.*, 2005); these in turn have an impact on the structure and productivity patterns of the vegetation (Maslin, 2004) and, therefore, on the composition and biology of living beings (Gitay *et al.*, 2002; Rosenzweig *et al.*, 2007).

The scientific community is highly interested in knowing the likely potential modifications in the distribution of forest ecosystems, since this is essential to define efficient management strategies that will make it possible to reduce vulnerability and risk levels in the plantations, and is crucial for taking abatement and adaptation actions, such as taxon replacement and the modification of forestry practices in each region (IPCC, 2007; Magaña, 2010; Lindner *et al.*, 2000).

Worldwide CC studies have projected a geographical displacement of optimal areas for the forest plantations; for this reason, the selection of sites for this activity must take into account this phenomenon, in order to ensure the obtainment of the expected products (Cervi *et al.*, 2006). Iverson y Prasad (2002) assessed 76 species with models of climate scenarios in Eastern US, and their results showed a significant variation in (northward) distribution of the considered habitats, ranging

modelos de escenarios climáticos en el este de Estados Unidos de América, y en sus resultados hubo gran variación en cuanto a la distribución (hacia el norte) de los hábitats considerados, desde más de 20 hasta 200 km, en función de los puntos de ocurrencia actuales. El hábitat potencial sería superior (mayor a 10 %) para 43 especies y disminuiría (menor a 10 %) para 31.

En México se han realizado varios trabajos sobre los efectos del CC en la distribución de distintos taxa, se ha estimado que *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. en 2090 cambiará de zona geográfica, debido a que las condiciones de precipitación y temperatura se modificarán (Sáenz *et al.*, 2006); el cedro rojo, en 2050 se localizará en las laderas con exposición este de la Sierra Madre Oriental, en altitudes superiores a las actuales (Gómez *et al.*, 2007); los géneros *Abies* y *Pinus* estarán restringidos a la región de la Sierra Norte de Oaxaca, y habrá mayor abundancia de plantas herbáceas o matorrales xerófilos (Gómez *et al.*, 2008). Se calcula que para *Quercus peduncularis* Née, *Q. laeta* Liebm., *Pinus ayacahuite* C. Ehrenb., *P. chiuhahuana* Engelm., *P. durangensis* Martínez and *P. hartwegii* Lindl. el territorio potencialmente apto disminuirá aproximadamente 30 % (Arriaga *et al.*, 2001).

La superficie potencial apta para el desarrollo del *A. religiosa* a nivel nacional, de acuerdo a Gómez *et al.* (2011), tendrá con el escenario B2 para el 2050 una reducción de 80 % con los modelos de circulación de la atmósfera Had y ECHAM, y de 60 % con el GFDL, todas con respecto a 500 mil hectáreas de la extensión potencial actual. La distribución actual en escenarios de cambio climático del *P. montezumae* según Arriaga y Gómez (2004) presentaría una disminución de 10.59 %.

En general, las investigaciones sugieren un aumento en los climas cálidos húmedos y secos, mientras que serán más sensibles e incluso, con tendencia a desaparecer los templados fríos y semicálidos: por el incremento de temperatura. Se estima que en el futuro habrá más vegetación tropical seca, muy seca y espinosa (Villers y Trejo, 2004); en consecuencia, la aptitud del terreno será a menor para las especies vegetales nativas, por lo cual se afectará su tamaño poblacional, capacidad de dispersión, migración y adaptación (Walther *et al.*, 2002; Martínez *et al.*, 2004). También, se prevé que exista alteración en la dinámica, la frecuencia y la agresividad de los incendios, así como en la ocurrencia de plagas y enfermedades, y todo lo anterior podría derivar en la mortandad de bosques y selvas (Villers y Trejo, 1997; Villers y Trejo, 1998).

Los estudios sobre proyecciones de CC proveen elementos para el diseño de políticas en el sector forestal de adaptación y mitigación ante el cambio climático; de acuerdo con Magaña *et al.* (1997) la comparación entre las condiciones actuales y las potenciales faculta la identificación y cuantificación del grado de vulnerabilidad de un territorio y la distribución adversa y reducida de la superficie adecuada para el desarrollo de las

between over 20 and 200 km, according to the present occurrence points. The potential habitat would be higher (above 10 %) for 43 species, and lower (below 10 %) for 31.

Several researches have been made in Mexico regarding the effects of the CC on the distribution of various taxa; it has been estimated that in 2090 *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl. will change its geographical area as a result of changes in the precipitation and temperature conditions (Sáenz *et al.*, 2006). In 2050, the red cedar will be located on the mountainsides of *Sierra Madre Oriental* with eastward exposure at altitudes above the current ones (Gómez *et al.*, 2007); the *Abies* and *Pinus* genera will be restricted to the region of *Sierra Norte* in Oaxaca, and there will be a greater abundance of herbaceous plants or xerophytic shrubs (Gómez *et al.*, 2008). It is estimated that the potentially suitable land for *Quercus peduncularis* Née, *Q. laeta* Liebm., *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl., *P. chiuhahuana* Engelm., *P. durangensis* Martínez and *P. hartwegii* Lindl. will be reduced by approximately 30 % (Arriaga *et al.*, 2001).

According to Gómez *et al.* (2011), by the year 2050 the potential suitable surface for the development of *A. religiosa* at a national level, with the B2 scenario, will be reduced by 80 % with the Had and ECHAM atmospheric circulation models, and by 60 % with the GFDL, with respect to 500 thousand hectares that constitute the current potential area. The current distribution of *P. montezumae* in climate change scenarios, according to Arriaga and Gómez (2004), will be reduced by 10.59 %.

Generally, the research studies suggest an increase in warm humid and dry climates, while those that will be more sensitive and will even tend to disappear will be the temperate, cold and semiwarm, due to the increase in temperature. It is estimated that there will be more dry tropical vegetation, which will be very dry and thorny (Villiers and Trejo, 2004); consequently, the suitability of the land will be lower for native vegetal species, and therefore their population size and their dispersion and migration capacity, as well as their adaptability, will be affected (Walther *et al.*, 2002; Martínez *et al.*, 2004). It is also foreseen that there will be an alteration in the dynamics, frequency and aggressivity of forest fires, as well as in the occurrence of pests and diseases; all this may result in loss of trees in forests and rain forests (Villers and Trejo, 1997; Villers and Trejo, 1998).

Studies on CC projections foresee certain elements in the design of policies for adaptation and mitigation in the face of climate change in the forestry sector; according to Magaña *et al.* (1997), the comparison between the current and the potential conditions makes it possible to identify and quantify of the degree of vulnerability of a territory and the adverse and limited distribution of the adequate surface for the development of the species within this context. The purpose of this paper was to determine the levels of potential suitability of *Abies religiosa*

especies. En este contexto, el objetivo del presente trabajo fue determinar los niveles de aptitud potencial de *Abies religiosa* (Kunth) Schldt. *et* Cham. (oyamel) y *Pinus montezumae* Lamb. (locote blanco) bajo dos modelos de escenarios de cambio climático en el Estado de México.

Su importancia radica, fundamentalmente, en que el Estado de México posee 48 % de bosques (del total de su superficie territorial de 22 487.67 km<sup>2</sup>). Con especies más comunes del género *Pinus*, *Abies* y *Quercus* (Probosque, 2014). Los bosques de *Pinus montezumae* y *Abies religiosa* en la entidad son para el aprovechamiento de madera. Los principales usos para el primer taxon son para fabricación de muebles, estructuras, celulosa, cajas de empaque, durmientes, postes, duelas, cercas, chapa, triplay y extracción de resina; y para el segundo, la manufactura de cajas, puertas, marcos, techos interiores y de postes para la instalación de cableado eléctrico (Conabio-Pronare, 2006). Trabajos de escenarios de la distribución de cambio climático de esas especies no existen a la escala propuesta, por ello la importancia de llevarse a cabo.

## Materiales y Métodos

### Área de estudio

El Estado de México se sitúa entre las coordenadas 18° 21' 29" a 20° 17' 20" latitud norte y 98° 35' 50" a 100° 36' 34" longitud oeste (Figura 1) y tiene una extensión territorial de 22 499.95 km<sup>2</sup> (INEGI, 2007).

(Kunth.) Schldt. *et* Cham. (oyamel) and *Pinus montezumae* Lamb. (white ocote) under two climate change scenarios in the *Estado de México*.

The importance of this study lies basically in that 48 % of the total surface of the *Estado de México* (22 487.67 km<sup>2</sup>) consists of forests with more common species of the *Pinus*, *Abies* and *Quercus* genera (Probosque, 2014). The *Pinus montezumae* and *Abies religiosa* forests in that state are used for timber. The main uses of the former species is the manufacture of furniture, structures, cellulose, boxes for packing, sleepers, poles, planks, fences, sheets, plywood and the extraction of resin; those of the latter species include the manufacture of boxes, doors, frames and ceilings, as well as of electricity poles (Conabio-Pronare, 2006). There are no papers describing scenarios of the distribution of these species (under study) at this scale at state level in this or any other state; therefore, the importance of carrying out such studies lies in generating sufficient information for decision making by the forest management staff.

## Materials and Methods

### Study area

The *Estado de México* is located between the coordinates 18° 21' 29" to 20° 17' 20" latitude north and 98° 35' 50" to 100° 36' 34" longitude west (Figure 1), and its territory covers a surface of 22 499.95 km<sup>2</sup> (INEGI, 2007).

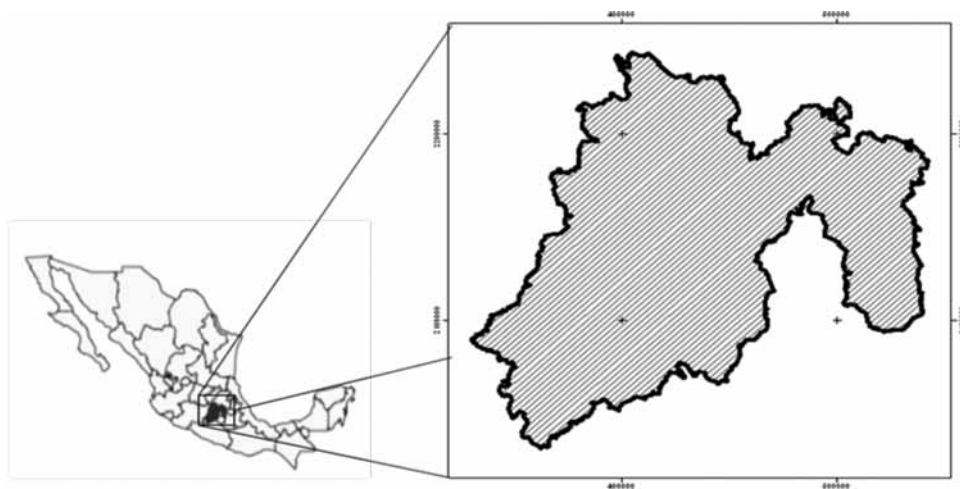


Figura 1. Localización del área de estudio.  
Figure 1. Location of the study area.

Los tipos de suelo de mayor cobertura en el estado son Feozem y Andosol con 45 %; Cambisoles, Luvisoles, Regosoles y Vertisoles con 37 %; Fluvisoles, Gleysol mólico, Histosol éutrico, Ranker y Rendzina, 5.6 % y otros, con 12.4 %. Las texturas predominantes son media y fina (85 % de la superficie) (INEGI, 2007) y el rango altitudinal inicia en los 200 m (al sur) y termina en los 5 500 m en el este. La entidad se divide en dos provincias fisiográficas: el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur, las cinco elevaciones principales son el volcán Popocatepetl (5 500 msnm), volcán Iztaccíhuatl (5 200 msnm), Nevado de Toluca o volcán Xinantécatl (4 680msnm), cerro el Mirador (4 120 msnm) y cerro Telapón (4 060 msnm). Los climas más importantes son: Templado Subhúmedo (Cw), Templado Semifrío Húmedo (Co(w<sub>2</sub>)), Templado subhúmedo (Cw), Cálido Subhúmedo (Aw); Semiárido Templado (BS<sub>k</sub>) y Frío (E(T)CHw) (INEGI, 2007). Respecto a las regiones hidrológicas se localizan la Lerma-Santiago (23.75 % del territorio), Balsas (41.86 %) y Pánuco (34.39 %) (INEGI, 2007).

En el Estado de México hay 609 000 ha forestales, de las cuales 560 000 están cubiertas por bosque templado, de ellas 282 802 están cubiertas por coníferas: *Abies religiosa* (oyamel), *Pinus montezumae* (ocote blanco), *P. leiophylla* Schiede et Deppe (pino chino), *Quercus rugosa* Née (encino quebracho) y *Q. mexicana* Humb. et Bonpl. (encino laurelillo) son los taxa más representativos (INEGI, 2008a).

### Selección de especies

Se escogieron *A. religiosa* (oyamel o abeto) y *P. montezumae* (ocote blanco), que tienen gran importancia socioeconómica en la entidad, sus requerimientos agroecológicos se obtuvieron de la literatura (Sistema de Información de Reforestación (SIRE) (Conabio-Pronare, 2006) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Requerimientos agroecológicos de las especies estudiadas.

| Especie   | Altitud (m)   | Precipitación anual total (mm) | Temperatura media anual (°C) | pH del suelo | Textura del suelo (clase) | Profundidad del suelo (cm) |
|---|---------------|--------------------------------|------------------------------|--------------|---------------------------|----------------------------|
| <i>Abies religiosa</i> (Kunth.) Schldtl. et Cham. | 2 800 - 3 500 | 900 - 1 500                    | 9 - 15                       | 5 - 6        | gruesa / media            | 60 - 120                   |
| <i>Pinus montezumae</i> Lamb.                     | 2 000 - 3 200 | 800 - 1 500                    | 8 - 14                       | 5 - 6        | gruesa / media            | 80 - 130                   |

Table 1. Agroecological requirements of the studied species.

| Species   | Altitude (m) | Total anual precipitation (mm) | Annual mean temperature (°C) | Soil pH | Soil texture (class) | Depth of the soil (cm) |
|---|--------------|--------------------------------|------------------------------|---------|----------------------|------------------------|
| <i>Abies religiosa</i> (Kunth.) Schldtl. et Cham. | 2 800-3 500  | 900-1 500                      | 9-15                         | 5-6     | thick / medium       | 60-120                 |
| <i>Pinus montezumae</i> Lamb.                     | 2 000-3 200  | 800-1 500                      | 8-14                         | 5-6     | thick / medium       | 80-130                 |

The soil types with the broadest coverage in the state are pheozems and andosols, with 45 %; cambisols, luvisols, regosols and vertisols, with 37 %; fluvisols, molic gleysols, eutric histosols, ranker and rendzina, with 5.6 % and others, with 12.4 %. The predominant textures are medium and fine (85 % of the surface) (INEGI, 2007), and the altitude ranges between 200 m (to the south) and 5 500 m, to the east. The state is divided into two physiographic provinces: the Neovolcanic Axis and *Sierra Madre del Sur*; its five most prominent heights are the volcanoes *Popocatepetl* (5 500 masl), *Iztaccíhuatl* (5 200) and *Nevado de Toluca* or *Xinantécatl* (4 680), the mountains *Mirador* (4 120 m) and *Telapón* (4 060 m). The main climates are: Subhumid temperate (Cw), Semicold humid temperature (Co(w<sub>2</sub>)), Subhumid Temperate (Cw); Warm Subhumid (Aw), Semiarid Temperate (BS<sub>k</sub>) and Cold (E(T)CHw) (INEGI, 2007). As for the hydrological regions, the study area includes *Lerma-Santiago* (23.75 % of the territory), *Balsas* (41.86 %) and *Pánuco* (34.39 %) (INEGI, 2007).

In the *Estado de México* there are 609 000 ha of forest, of which 560 000 are covered by temperate forests. 282 802 of these are covered by conifers: *Abies religiosa* (fir), *Pinus montezumae* (white ocote), *P. leiophylla* Schiede ex Schldtl. et Cham. (smooth-leaf or yellow pine), *Quercus rugosa* Née (netleaf oak) and *Q. mexicana* Humb. et Bonpl. (Mexican oak) are the most representative species (INEGI, 2008a).

### Selection of species

*A. religiosa* (fir) and *P. montezumae* (white ocote) were selected. These species have an enormous social-economic importance in the entity; their agroecological requirements were drawn from the literature (*Sistema de Información de Reforestación* (Reforestation Information System, SIRE) (Conabio-Pronare, 2006) (Table 1).



## Determinación de la aptitud actual

Se generó la cartografía digital en función de los requerimientos altitudinales, climáticos (precipitación anual total y temperatura media anual) y edáficos (pH, textura y profundidad del suelo). Los datos referentes a la altitud se obtuvieron del modelo digital de elevación (MED) (INEGI, 2014), con una resolución de 50 m; los de clima, de la base de datos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) actualizada al 2003, con un error de 27 y 33 mm para la precipitación y de 0.5 a 0.8 °C para la temperatura (Díaz, 2007); las edáficas a partir de las cartas edafológicas de INEGI (escala 1:50 000 1:250 000) y la base de datos del INIFAP elaborada para zonas agrícolas del estado con registros cada 1 000 m (González *et al.*, 2006). Se utilizó el método de inverso a la distancia al cuadrado (IDW<sub>2</sub>) con 10 puntos vecinos más cercanos. La cartografía se elaboró con ARCGIS 9.3™ (ESRI, 2009), con la proyección UTM y datum WGS84.

## Cartografía digital para la evaluación de aptitud con Cambio Climático

Los estudios de cambio climático utilizan distintos modelos de clima y escenarios de emisiones, reflejan el intervalo de incertidumbre que causan las distintas suposiciones en cuanto a liberación de GEI, por ello se considera no solo este parámetro, sino también las modificaciones tecnológicas, demográficas y el crecimiento económico, en función de este último existen dos tipos de escenarios: A (alto) y B (moderado); A1 y B1 suponen una globalización con economías convergentes en su desarrollo; A2 y B2 únicamente toman en cuenta el desarrollo en el ámbito local (Conde *et al.*, 2008).

Con el fin de generar los escenarios de cambio climático se utilizaron los MCG de la Atmósfera GFDL 2.0 (estadounidense) y HADGEM (inglés) con una resolución espacial de 10 x 10 km y escenarios A2 y B2, para los años 2030 y 2050. La selección se basó en que son muy recomendados para México, ya que representan bien el territorio nacional (Conde *et al.*, 2008). Los datos mensuales de temperatura y precipitación se interpolaron mediante el IDW<sub>2</sub> con ocho puntos más cercanos en el SIG Arc Map™ 9.3 (ESRI, 2009). Se obtuvieron coberturas mensuales por variable, escenario, periodo y modelo, a los cuales se les aplicaron operaciones de álgebra booleana, para estimar la precipitación total anual y la temperatura media anual.

## Reglas de restricción

En la definición de la categoría "no apto" se consideró la existencia de espacios urbanos, los cuerpos de agua, las zonas agrícolas y el tipo de suelo litosol. Los tres primeros correspondieron a la Serie III Uso de Suelo y Vegetación (INEGI, 2005) escala 1:250 000

## Determining the current suitability

Digital mapping was generated in terms of the altitudinal, climatic (total annual precipitation and mean annual temperature) and edaphic (soil pH, texture and depth) requirements. The altitude data were obtained from the digital elevation model (DEM) (INEGI, 2014), with a 50 m resolution; data on climate were drawn from the 2003 update of the database of the *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias* (INIFAP), with an error of 27 and 33 mm for precipitation and of 0.5 to 0.8 °C for temperature (Díaz, 2007), and the edaphic data were taken from the edaphological maps of INEGI (scale 1:50 000 1:250 000), and from the database of INIFAP, created for agricultural areas of the state, in which records are entered for every 1 000 m (González *et al.*, 2006). Inverse distance squared weighting (IDW<sub>2</sub>) was used with the 20 nearest neighboring points. Mapping was made with the ARCGIS 9.3™ software (ESRI, 2009), using the UTM projection and datum WGS84.

## Digital mapping for the assessment of suitability with climate change

Studies on climate change use different climate models and emission scenarios, reflecting the uncertainty interval resulting from the various assumptions in relation to GGEs. Therefore, they do not only consider this parameter but also take into account the technological and demographic changes, as well as the economic growth. In terms of the latter, there are two types of scenarios: A (high) and B (moderate); A1 and B1 entail a globalization with economies with a convergent development; A2 and B2 only take into account local development (Conde *et al.*, 2008).

The climate change scenarios were generated using the atmosphere GCMs GFDL 2.0 (US) and HADGEM (UK), with a 10 x 10 m spatial resolution and scenarios A2 and B2 for the years 2030 and 2050. The selection was based on their being highly recommended for Mexico, since they provide a good representation of the national territory (Conde *et al.*, 2008). The monthly data for temperature and precipitation were interpolated using IDW<sub>2</sub> with eight of the nearest points in the Arc Map™ 9.3 GIS (ESRI, 2009). Monthly coverages were obtained by variable, scenario, period and model, to which Boolean algebra operations were applied in order to estimate the total annual precipitation and the mean annual temperature.

## Restriction rules

The definition of the "unsuitable" category included urban spaces, water bodies, agricultural areas and lithosols. The first three were drawn from Series III, Soil Use and Vegetation (INEGI, 2005) scale 1:250 000, and the last, from the digital edaphological map of INIFAP - Conabio (1995), scale 1:250 000.

y el último a la carta edafológica digitalizada INIFAP - Conabio (1995), escala 1: 250 000.

### Cartografía de aptitud forestal

Se reclasificaron los valores de las coberturas digitales de cada variable, con base en los requerimientos agroecológicos de las especies evaluadas, para ello se utilizaron dos categorías: apto (1) y no apto (0), además se aplicaron las reglas de restricción. La altitud, la temperatura media anual, la precipitación total anual, así como el pH, la textura y la profundidad del suelo fueron procesados en Arc Map™ 9.3 (ESRI, 2009), mediante el método de lógica booleana. Cada una de las coberturas de aptitud potenciales actual y con escenarios de cambio climático resultantes, se asignaron en tres clases: alta, media y no apta.

### Resultados y Discusión

#### Aptitud actual potencial de *Abies religiosa*

Cubre 166 289.35 ha en el Estado de México y representa 58.79 % de la superficie forestal de coníferas de la entidad (INEGI, 2008b); 101 390.30 ha (35.85 %) se cataloga con aptitud alta, y 64 8 99.05 ha (22.94 %) como media (Figura 2).

### Forest suitability map

Based on the agroecological requirements of the assessed species, the values of the digital coverages for each variable were reclassified into two categories: suitable (1) and unsuitable (0); additionally, restriction rules were applied. The altitude, annual mean temperature, total annual precipitation, and soil pH, texture and depth were processed with Arc Map™ 9.3 (ESRI, 2009), using Boolean logics. The potential suitability of each of the covered areas -both current and with the resulting climate change scenarios- was classified into one of three categories: high, medium and unsuitable.

### Results and Discussion

#### Current potential suitability for *Abies religiosa*

This species covers 166 289.35 ha in the *Estado de México*, which amount to 58.79 % of the coniferous forest surface of the entity (INEGI, 2008b); 101 390.30 ha (35.85 %) are classified as having a high suitability, and 64 8 99.05 ha (22.94 %), as having a medium suitability (Figure 2).

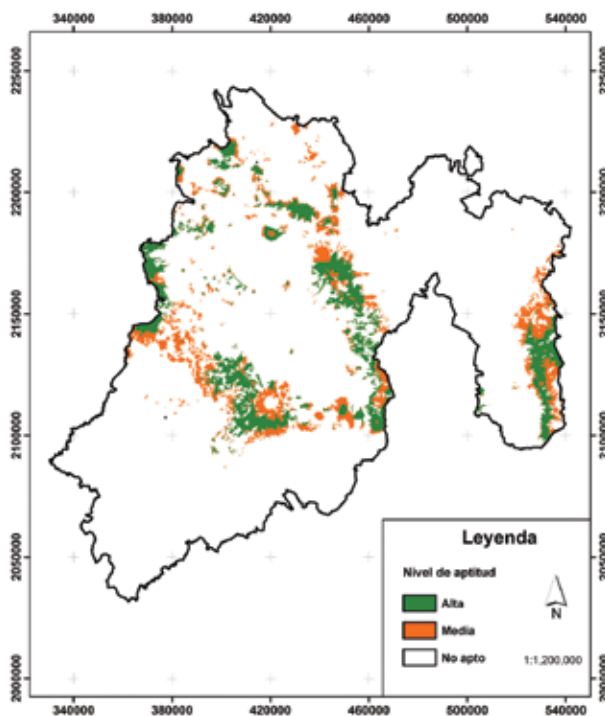


Figura 2. Distribución potencial actual de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. en el Estado de México.

Figure 2. Current potential distribution of *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. in the *Estado de México*.

En el Cuadro 2 se indica la distribución potencial actual de las zonas con aptitud alta y media para *A. religiosa*, las cuales se localizan en las partes altas de los sistemas montañosos. El terreno que tuvo aptitud alta cumplió con todos los requerimientos ambientales evaluados. Por el contrario, la aptitud media estuvo limitada, principalmente, por la altitud, precipitación y pH.

Table 2 shows the current potential distribution of the areas with high and medium suitability for *A. religiosa*. These areas are located in the higher parts of the mountain systems. The surfaces with high suitability met all the assessed environmental requirements. On the other hand, medium suitability was limited mainly by the altitude, precipitation and soil pH.

Cuadro 2. Distribución potencial actual de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. *et Cham.* en los sistemas montañosos del Estado de México.

| Tipo de vegetación              | Sistema montañoso                           |  |  |                |                   |                       |
|---------------------------------|---|--|--|----------------|-------------------|-----------------------|
|                                 | Sierra Nevada-Volcán Popocatepetl (oriente) | Sierra Monte Alto-Sierra Las Cruces-La Marquesa (centro) | Nevado de Toluca (Vertiente sur y oeste) | Valle de Bravo | Sierra Occidental | Montañas del noroeste |
| Bosque de oyamel                | A   | A  | A  |                | A                 |                       |
| Bosque de pino                  | M   | A, M   | A, M                                     |                |                   |                       |
| Bosque de encino                | M   |  |  |                |                   | A, M                  |
| Bosque de encino-pino           | M   | A, M   |  |                | A                 | A, M                  |
| Bosque de pino-encino           |   | M  | M  | M              | M                 | M                     |
| Agricultura de temporal         |   | A, M   | A, M                                     | M              | A, M              | A, M                  |
| Vegetación secundaria de oyamel |   |  | M  |                | A, M              |                       |
| Pastizal inducido               |   |  | A  |                |                   |                       |

A: aptitud alta, M: aptitud media

Table 2. Current potential distribution of *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. *et Cham.* in the mountain systems of *Estado de México*.

| Type of vegetation       | Mountain system                           |  |  |                |                   |                        |
|--------------------------|---|--|--|----------------|-------------------|------------------------|
|                          | Sierra Nevada-Popocatepetl volcano (East) | Sierra Monte Alto-Sierra Las Cruces-La Marquesa (Center) | Nevado de Toluca (South and West Slopes) | Valle de Bravo | Sierra Occidental | Northeastern mountains |
| Fir forest               | H   | H  | H  |                | H                 |                        |
| Pine forest              | M   | H, M   | H, M                                     |                |                   |                        |
| Oak forest               | M   |  |  |                |                   | H, M                   |
| Pine-oak forest          | M   | H, M   |  |                | H                 | H, M                   |
| Pine-oak forest          |   | M  | M  | M              | M                 | M                      |
| Rainfed agriculture      |   | H, M   | H, M                                     | M              | H, M              | H, M                   |
| Secondary fir vegetation |   |  | M  |                | H, M              |                        |
| Induced grassland        |   |  | H  |                |                   |                        |

H= high suitability; M= medium suitability

Los resultados bajo escenarios de cambio climático mostraron una disminución de la superficie adecuada para el establecimiento de *A. religiosa*, con respecto al terreno forestal de coníferas en el estado (INEGI, 2008b) (Cuadro 3).

The results under climate change scenarios showed a reduction of the suitable surface for the establishment of *A. religiosa* in relation to the coniferous forest land surface of the state (INEGI, 2008b) (Table 3).





Cuadro 3. Aptitud del terreno para el desarrollo de *Abies religiosa* (Kunth.) Schltdl. et Cham. ante escenarios de cambio climático en el Estado de México.

| Periodo | Escenario | Aptitud | GFDL 2.0             |        | HADGEM               |        |
|---------|-----------|---------|----------------------|--------|----------------------|--------|
|         |           |         | Superficie apta (ha) | %*     | Superficie apta (ha) | %*     |
| 2030    | A2        | Alta    | 3 374                | 2.12   | 2,154                | 1.35   |
|         |           | Media   | 164 971              | 133.67 | 163 284              | 132.30 |
|         | B2        | Alta    | 2 555                | 1.61   | 1,766                | 1.11   |
|         |           | Media   | 164 516              | 133.30 | 163 121              | 132.17 |
| 2050    | A2        | Alta    | 5 045                | 3.17   | 2,551                | 1.60   |
|         |           | Media   | 155 212              | 125.76 | 149 916              | 121.47 |
|         | B2        | Alta    | 3 516                | 2.21   | 1,939                | 1.22   |
|         |           | Media   | 158 477              | 128.40 | 155 292              | 125.82 |

\*Porcentaje en relación con la superficie forestal de coníferas en el estado (INEGI, 2008b).

GFDL 2.0 = Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Model 2.0; HADGEM = Hadley Centre Global Environment Model

Table 3. Suitability of the land for the development of *Abies religiosa* (Kunth.) Schltdl. et Cham. in the face of climate change scenarios in the *Estado de México*.

| Period | Scenario | Suitability | GFDL 2.0              |        | HADGEM                |        |
|--------|----------|-------------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|
|        |          |             | Suitable surface (ha) | %*     | Suitable surface (ha) | %*     |
| 2030   | A2       | High        | 3 374                 | 2.12   | 2 154                 | 1.35   |
|        |          | Medium      | 164 971               | 133.67 | 163 284               | 132.30 |
|        | B2       | High        | 2 555                 | 1.61   | 1 766                 | 1.11   |
|        |          | Medium      | 164 516               | 133.30 | 163 121               | 132.17 |
| 2050   | A2       | High        | 5 045                 | 3.17   | 2 551                 | 1.60   |
|        |          | Medium      | 155 212               | 125.76 | 149 916               | 121.47 |
|        | B2       | High        | 3 516                 | 2.21   | 1 939                 | 1.22   |
|        |          | Medium      | 158 477               | 128.40 | 155 292               | 125.82 |

\*Percentage in relation to the coniferous forest surface in the state (INEGI, 2008b).

GFDL 2.0 = Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Model 2.0; HADGEM = Hadley Centre Global Environment Model

Aptitudes de terreno para *Abies religiosa* entre escenarios de cambio climático para cada periodo y modelo.

Con el modelo GFDL 2.0 el escenario A2 tuvo mejores resultados que el B2, excepto en el caso de la aptitud media para 2050, donde B2 fue superior por 2 % (3 625 ha). Aquellas proyecciones en las que A2 tuvo valores más altos que B2 fueron: para 2030 las áreas con aptitud alta (por 24 % u 819 ha) y las zonas con aptitud media (455 ha); para 2050 únicamente la aptitud alta (30 % o 1 529 ha).

El HADGEM mostró la misma tendencia (A2 mayor que B2) para 2030, tanto en el caso de la superficie con aptitud alta (18 % o 388 ha) como la de aptitud media (163 ha), y para 2050 solo la aptitud alta (25 % o 612 ha), ya que B2 fue más elevada que A2 para la aptitud media (3 % o 5 376 ha).

Land suitability for *Abies religiosa* between climate change scenarios for each period and model.

With the GFDL 2.0 model, the A2 scenario had better results than B2, except for the medium suitability for the year 2050, in regard to which B2 proved to be better by 2 % (3 625 ha). The projections in which the values of A2 surpassed those of B2 were: areas with a high suitability (by 24 % or 819 ha) and areas with a medium suitability (455 ha) for the year 2030; however, for the year 2050 only the areas with a high suitability in scenario A2 surpassed those of B2, by 30 % or 1 529 ha.

HADGEM showed the same tendency (with higher values for A2 than for B2) for the surface with high suitability (18 % or 388 ha) and the areas with medium suitability (163 ha), for the year 2030, and only for highly suitable areas (25 % or 612 ha)

La reducción de la superficie potencial para el oyamel ante escenarios de cambio climático, en función de los niveles de aptitud potenciales hacia 2030 (Figura 3), para la aptitud alta fue importante con ambos modelos (más de 97 %); no obstante, el GFDL 2.0 evidenció una disminución menor de la predicha con HADGEM (variación mínima). En el caso de la aptitud media del terreno hubo un incremento superior a 33 %, también en este caso GFDL 2.0 fue ligeramente mejor. La proyección hacia 2050 redujo sustancialmente las zonas con aptitud alta (> 96 %), con la misma tendencia del GFDL 2.0 que en 2030, la cual consiste en una mínima diferencia (a la baja), en comparación con el HADGEM; la aptitud media tuvo un crecimiento (mínimo) con el HADGEM, mientras que GFDL 2.0 proyecta uno mayor (hasta 28.40 con el escenario B2).

for the year 2050, as in this case scenario B2 surpassed A2 by 3 % in regard to surfaces with a medium suitability (5 376 ha).

There was a significant reduction (over 97 %) of surfaces with high suitability for fir in both climate change scenarios for the year 2030 (Figure 3); however, GFDL 2.0 evidenced a less significant reduction than the one predicted using HADGEM (minimal variation). In the case of surfaces with a medium suitability, there was an increase of 33 %, and GFDL 2.0 also showed slightly better values. The projection for the year 2050 shows a considerable reduction of highly suitable areas (> 96 %), and the GFDL 2.0 exhibited the same tendency as for the year 2030, i.e. a minimum (downward) difference, compared to HADGEM; medium suitability exhibited a (minimum) growth with HADGEM, while GFDL 2.0 projects a larger growth (up to 28.40 with B2 scenario).

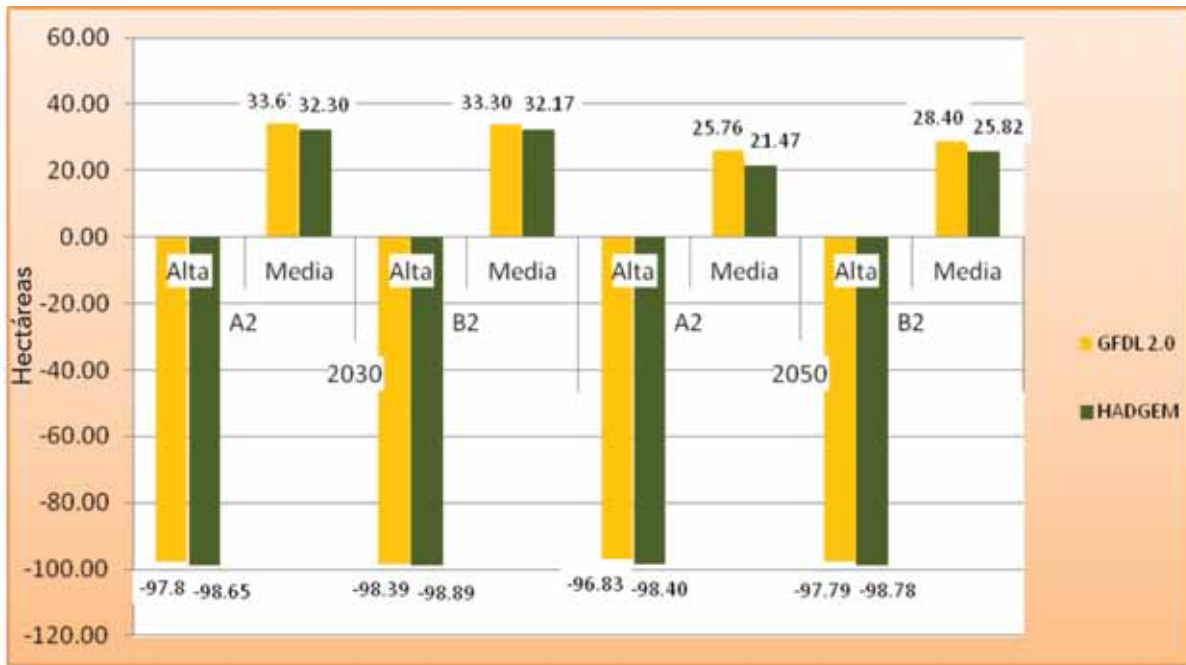


Figura 3. Superficie potencial del terreno para el desarrollo de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. *et Cham.*, afectada, por el cambio climático, por nivel de aptitud en el Estado de México.

Figure 3. Potential land surface for the development of *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. *et Cham.*, affected, by the climate change, by suitability level in the *Estado de México*.

#### Aptitud de terreno actual potencial para el desarrollo de *Pinus montezumae*

El ocote blanco actualmente se distribuye en una superficie de 350 096 ha dentro del Estado de México, equivalente a 70.31 % de la extensión forestal de coníferas en la entidad (INEGI, 2008b), de estas, 70 258.21 ha son de aptitud alta (24.84 %) y 128 612.19 ha de aptitud media (45.47 %) (Figura 4).

#### Current potential land suitability for the development of *Pinus montezumae*

White ocote is currently distributed on a surface of 350 096 has within the *Estado de México*, amounting to 70.31 % of the coniferous forest land in the entity (INEGI, 2008b); of these, 70 258.21 ha (24.84 %) have a high suitability, and 128 612.19 ha (45.47 %), a medium suitability (Figure 4).



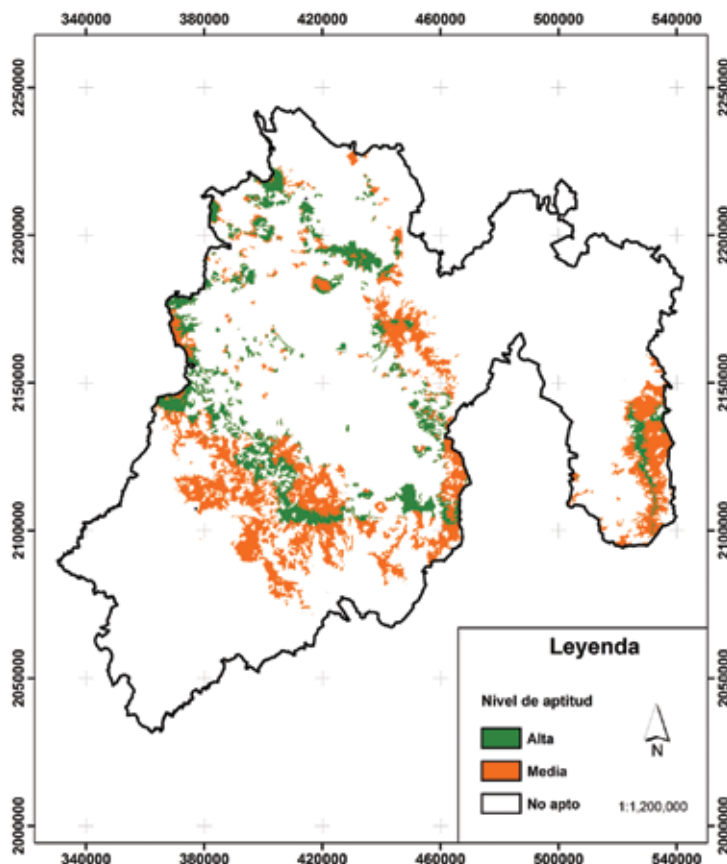


Figura 4. Distribución potencial actual de *Pinus montezumae* Lamb. en el Estado de México.

Figure 4. Current potential distribution of *Pinus montezumae* Lamb. in the Estado de México.

Las áreas que tienen aptitud alta y media para el desarrollo de *P. montezumae* se ubican en los sistemas montañosos del Estado de México (Cuadro 4). La categoría de aptitud alta es más pequeña que la zona con aptitud media, esta última presenta limitaciones por altitud y temperatura.

Areas with a high and medium suitability for the development of *P. montezumae* are located on the mountain systems of the Estado de México (Table 4). The area with a high suitability is smaller than that with a medium suitability, which is limited by the altitude and temperature.

Cuadro 4. Distribución potencial actual de *Pinus montezumae* Lamb. en el Estado de México.

| Tipo de vegetación      | Sistemas montañosos                         |  |  |                   |                       |
|-------------------------|---|--|--|-------------------|-----------------------|
|                         | Sierra Nevada-Volcán Popocatepetl (oriente) | Sierra Monte Alto-Sierra Las Cruces-La Marquesa (centro) | Nevado de Toluca (Vertiente sur y oeste) | Sierra Occidental | Montañas del noroeste |
| Bosque de oyamel        | A, M  | A, M   |  | A, M              |                       |
| Bosque de pino          | A, M  | A, M   | A, M                                     |                   |                       |
| Bosque de encino        | M   |  | A,                                       |                   | A,                    |
| Bosque de encino-pino   |   | A,   |  |                   | A,                    |
| Bosque de pino-encino   | M   | M  | A, M                                     | A, M              | M                     |
| Agricultura de temporal | M   | A, M   | A, M                                     | A, M              | A, M                  |
| Bosque mesófilo         |   | M  |  |                   |                       |

A: aptitud alta, M: aptitud media

Table 4. Current potential distribution of *Pinus montezumae* Lamb. in the *Estado de México*.

| Type of vegetation  | Mountain systems                                 |   |   |                          |                        |
|---------------------|--|---|---|--------------------------|------------------------|
|                     | <i>Sierra Nevada-Popocatepetl</i> volcano (East) | <i>Sierra Monte Alto-Sierra Las Cruces-La Marquesa</i> (Center) | <i>Nevado de Toluca</i> (South and West Slopes) | <i>Sierra Occidental</i> | Northwestern mountains |
| Fir forest          | H, M   | H, M  |   | H, M                     |                        |
| Pine forest         | H, M   | H, M  | H, M  |                          |                        |
| Oak forest          | M  |   | H,  |                          | H,                     |
| Pine-oak forest     |  | H,  |   |                          | H,                     |
| Pine-oak forest     | M  | M   | H, M  | H, M                     | M                      |
| Rainfed agriculture | M  | H, M  | H, M  | H, M                     | H, M                   |
| Mesophytic forest   |  | M   |   |                          |                        |

H= high suitability; M= medium suitability

Los resultados de aptitud bajo escenarios de cambio climático evidenciaron una disminución importante en la aptitud del terreno para *P. montezumae*, en contraste con la superficie forestal de coníferas (INEGI, 2008b) (Cuadro 5).

The results under both climate change scenarios show a significant reduction in the suitability of the land for *P. montezumae* in the area, unlike the coniferous forest surface (INEGI, 2008b) (Table 5).

Cuadro 5. Aptitud de terreno para el desarrollo de *Pinus montezumae* Lamb. ante escenarios de cambio climático en el Estado de México.

| Periodo | Escenario | Aptitud | GFDL 2.0             |       | HADGEM               |       |
|---------|-----------|---------|----------------------|-------|----------------------|-------|
|         |           |         | Superficie apta (ha) | %*    | Superficie apta (ha) | %*    |
| 2030    | A2        | Alta    | 1 676                | 1.36  | 936                  | 0.76  |
|         |           | Media   | 95 932               | 42.35 | 86 243               | 38.07 |
|         | B2        | Alta    | 1 138                | 0.92  | 684                  | 0.55  |
|         |           | Media   | 93 358               | 41.21 | 85 116               | 37.57 |
| 2050    | A2        | Alta    | 1 035                | 0.84  | 593                  | 0.48  |
|         |           | Media   | 59 463               | 26.25 | 43 120               | 19.03 |
|         | B2        | Alta    | 914                  | 0.74  | 551                  | 0.45  |
|         |           | Media   | 65 953               | 29.11 | 53 658               | 23.69 |

\* Porcentaje en relación con la superficie forestal de coníferas en el estado (INEGI, 2008b).

GFDL 2.0 = *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Model 2.0*; HADGEM = *Hadley Centre Global Environment Model*

Aptitudes de terreno para el desarrollo de *Pinus montezumae* entre escenarios de cambio climático para cada periodo y modelo

En general, con el modelo GFDL 2.0 el escenario A2 tuvo mejores resultados que con el B2, excepto en el caso de la aptitud media para 2050, donde B2 fue superior por 12 % (6 490 ha). Aquellas proyecciones en las que A2 registró valores más altos correspondieron a 2030: las de aptitud alta (32.09 % o 538 ha) y media (2.68 % o 2 574 ha); para 2050, solamente, la aptitud alta (12.0 % o 121 ha).

Land suitability for the development of *Pinus montezumae* between climate change scenarios for each period and model

In general, scenario A2 had better results than B2 with GFDL 2.0, except for surfaces with a medium suitability, where B2 surpassed A2 by 12 % (6 490 ha). For the year 2030, the projections in which A2 registered higher values were those for highly suitable surfaces (32.09 % or 538 ha) and areas with a medium suitability (2.68 % or 2 574 ha), and only for highly suitable surfaces (12.0 % or 121 ha) for the year 2050.

Table 5. Suitability of the land for the development of *Pinus montezumae* Lamb. In the face of climate change scenarios in the *Estado de México*.

| Period | Scenario | Suitability | GFDL 2.0              |       | HADGEM                |       |
|--------|----------|-------------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|
|        |          |             | Suitable surface (ha) | %*    | Suitable surface (ha) | %*    |
| 2030   | A2       | High        | 1 676                 | 1.36  | 936                   | 0.76  |
|        |          | Medium      | 95 932                | 42.35 | 86 243                | 38.07 |
|        | B2       | High        | 1 138                 | 0.92  | 684                   | 0.55  |
|        |          | Medium      | 93 358                | 41.21 | 85 116                | 37.57 |
| 2050   | A2       | High        | 1 035                 | 0.84  | 593                   | 0.48  |
|        |          | Medium      | 59 463                | 26.25 | 43 120                | 19.03 |
|        | B2       | High        | 914                   | 0.74  | 551                   | 0.45  |
|        |          | Medium      | 65 953                | 29.11 | 53 658                | 23.69 |

\* Percentage in relation to the coniferous forest surface in the state (INEGI, 2008b).

GFDL 2.0 = Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Model 2.0; HADGEM = Hadley Centre Global Environment Model

Con el modelo HADGEM para 2030 la diferencia entre A2 y B2 para aptitud alta del terreno fue de 27.0 % (251 ha) y para la media de 1.0 % (1 128 ha). La aptitud alta en el periodo de 2050 evidenció que A2 fue superior que B2 por 7.0 % (42 ha) y para la aptitud media, B2 fue mayor que A2 con 20.0 % (105 380 ha).

La reducción de la superficie potencial para el pino ante escenarios de cambio climático, en función de los niveles de aptitud potenciales hacia 2030 (Figura 5), resultó importante con ambos modelos; en el caso de la aptitud alta se calculó en más de 97 % (con GFDL 2.0 fue ligeramente mejor) para la aptitud media del terreno también se proyecta una pérdida, no menor a 25.41 %. En ambos casos, el GFDL 2.0 generó afectaciones de dimensiones más pequeñas. Para 2050 se observó la misma tendencia, una reducción sustancial del terreno con aptitud alta; una tendencia similar se registró para 2030, con respecto a la superficie potencial actual del estado (poco mayor a 98 %). El modelo GFDL 2.0 tuvo una mínima diferencia, en relación con el HADGEM. La aptitud media tuvo una menor afectación, sin embargo, fue poco mayor a 48.72 %.

Las tendencias del cambio climático en el Estado de México apuntan a que habrá aumentos de precipitación y temperatura, lo cual coincide con lo señalado por Arriaga y Gómez (2004), quienes indican que dicho fenómeno afectará a los bosques de clima templado, específicamente, a las coníferas y los encinos.

De acuerdo con los resultados de la distribución potencial ante escenarios de CC, las tierras con aptitud alta para el desarrollo de *Abies religiosa* se reducen a pequeños sitios localizados en las secciones norte y se reducen a pequeños sitios localizados en las secciones norte y este de la Sierra

With the HADGEM model for the year 2030, the difference between scenarios A2 and B2 in regard to highly suitable lands was 27.0 % (251 ha), and 1.0 % (1 128 ha) for surfaces with a medium suitability. Highly suitable lands in scenario A2 surpassed those of B2 by 7.0 % (42 ha), while B2 showed higher values than A2 for lands with a medium suitability, with 20.0 % (105 380 ha).

There was a significant reduction of the potential surface for pine in the face of climate change scenarios with both models, in terms of potential suitability levels for the year 2030 (Figure 5). For highly suitable surfaces, it was estimated in over 97 % (slightly better with GFDL 2.0); for lands with a medium suitability, there is a projected loss of no less than 25.41 %. In both cases, GFDL 2.0 projected slighter impacts. The same tendency was observed for the year 2050 -a significant reduction of highly suitable surfaces-, and also for the year 2030, in regard to the current potential surface of the state (slightly over 98 %). The GFDL 2.0 model showed a minimum difference compared to HADGEM. Surfaces with a medium suitability were less affected, by slightly over 48.72 %.

The tendencies of climate change in the *Estado de México* indicate that there will be an increase in precipitation and temperature; this agrees with the statements by Arriaga and Gómez (2004) in the sense that this phenomenon will affect the forests in temperate climates, specifically coniferous and oak forests.

According to the results of the potential distribution in the face of CC scenarios, the lands with a high suitability for the development of *Abies religiosa* are reduced to small sites located in the northern and eastern sections of *Sierra Nevada*;

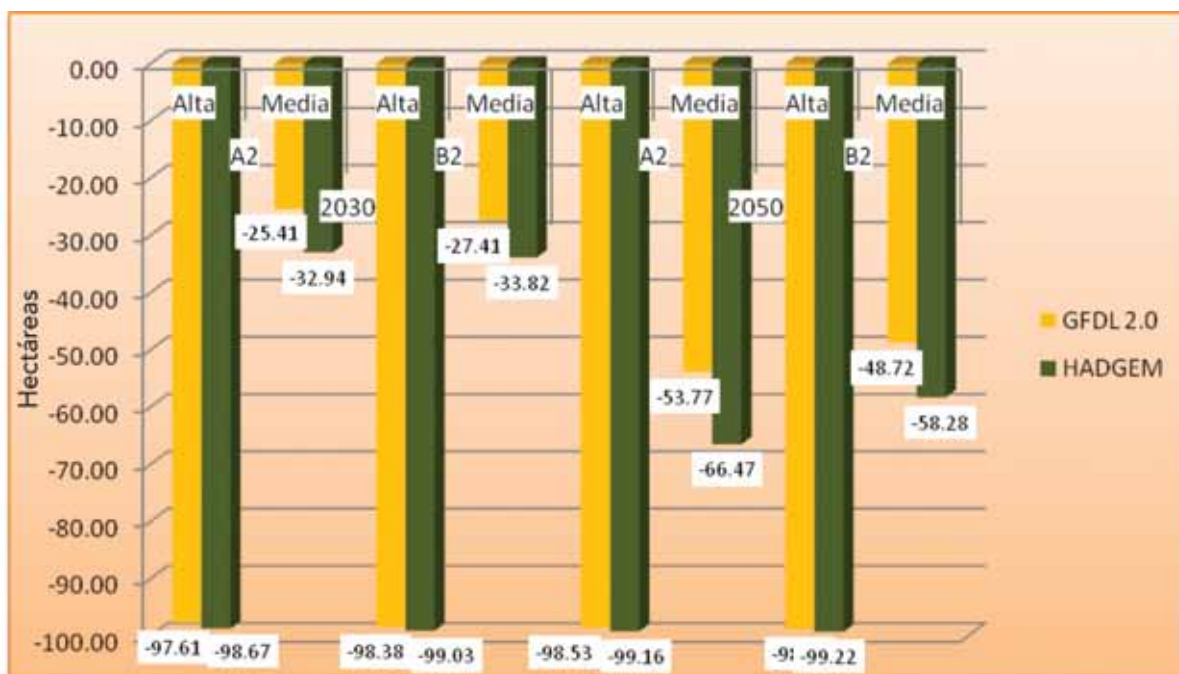


Figura 5. Superficie potencial del terreno del *Pinus montezumae* Lamb., que fue afectada ante escenarios de cambio climático, por nivel de aptitud en el Estado de México.

Figure 5. Potential land surface of *Pinus montezumae* Lamb. affected by the climate change scenarios in the *Estado de México*, by level of suitability.

Nevada; en el caso de la aptitud media, esta cubre una superficie mayor, pero limitada por el aumento de las precipitaciones. Los resultados del presente estudio coinciden con lo citado por Gómez *et al.* (2011), autores que estiman una pérdida con el modelo GFDL 2.0.

En el caso de *Pinus montezumae*, la aptitud alta también se reduce, con respecto a la superficie actual; localizadas en la Sierra Nevada y en el noroeste del estado. La aptitud media presenta un cambio sustancial por las modificaciones en el patrón de la precipitación; resultados similares consignan Arriaga y Gómez (2004).

De acuerdo con Maslin (2004), el incremento en la precipitación y la temperatura generará alteraciones en el suelo (pH, textura y fertilidad) que modificarán la distribución de las especies, con la consecuente perturbación en la estructura y productividad de los ecosistemas forestales. Por lo anterior, la desaparición de las condiciones ambientales propicias para el crecimiento de *A. religiosa* y *P. montezumae* en el estado constituyen una amenaza para sus poblaciones, en particular, por el incremento térmico que modificará los límites de su distribución originando un desplazamiento hacia el norte, fundamentalmente, porque son especies intolerantes a las altas temperaturas (Arriaga y Gómez, 2004).

En general, la distribución potencial de *A. religiosa* y *P. montezumae* bajo escenarios de cambio climático con los

as for the lands with medium suitability, these cover a larger surface which is, however, limited by the increased precipitations. The results of the present study agree with those cited by Gómez *et al.* (2011), who estimate a loss using the GFDL 2.0 model.

In the case of *Pinus montezumae*, there is a reduction of highly suitable lands with respect to the current surface; lands with medium suitability show a significant change due to the changes in precipitation patterns. The results registered by Arriaga and Gómez (2004) are similar.

According to Maslin (2004), the increase in the precipitation and temperature will cause changes in the soil (pH, texture and fertility), which will modify the distribution of the species, with the resulting disturbance of the structure and productivity of forest ecosystems. Therefore, the disappearance of the propitious environmental conditions for *A. religiosa* and *P. montezumae* in the state are a threat to their populations, particularly because of the increase in temperature, which will modify the boundaries of its distribution, causing a northward displacement, primarily because these species are intolerant to high temperatures (Arriaga and Gómez, 2004).

In general, the potential distribution of *A. religiosa* and *P. montezumae* under climate change scenarios with the HADGEM and GFDL 2.0 models show similar tendencies toward land reduction for the years 2030 and 2050. Furthermore, they correspond with those registered by Gómez

modelos HADGEM y GFDL 2.0 muestran tendencias similares, en cuanto a reducción del terreno para los años 2030 y 2050. Asimismo corresponden con las registradas por Gómez *et al.* (2011), quienes indican que el modelo GFDL 2.0 ofrece un panorama potencial menos dramático de las condiciones ambientales futuras, debido a que es menos restrictivo que el HADGEM.

## Conclusiones

La distribución espacial de *A. religiosa* y *P. montezumae* en el Estado de México bajo escenarios de cambio climático en 2030 y 2050 tiende a reducirse en cuanto al área de aptitud y la más afectada es *P. montezumae*. La aptitud del terreno de las dos especies evaluadas se concentrará en áreas reducidas de la región norte de la entidad y, de manera escasa, en la Sierra Nevada.

## REFERENCIAS

Arriaga, C. L., M. L. Gómez y A. T. Feria. 2001. Distribución de especies diagnósticas del bosque de coníferas y enanos bajo escenarios de cambio climático. In: XV. Congreso Mexicano de Botánica. Querétaro, Qro., México 14-19 de octubre 2001. CD-R.

Arriaga, L. y L. Gómez. 2004. Posibles efectos del cambio climático en algunos componentes de la biodiversidad de México. In: Martínez, J. y A. Fernández-Bremauntz (comps.). Cambio climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología (INE)/Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). México, D.F., México. pp. 255-265.

Cervi F., A. P., P. Imbach, A. Vallejo, M. R. Tito y C. J. Pérez. 2006. Zonas edafoclimáticas aptas para especies forestales bajo escenarios de cambio climático: un estudio de caso en Costa Rica. <http://www.catie.ac.cr/Banco/Medios/Documentos%20PDF/Cervi,%20A.P.%202006.%20Zonas%20edafoclim%C3%A1ticas%20aptas%20para%20especies%20forestales.pdf> (30 de agosto de 2010).

Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Diversidad-Programa Nacional de Reforestación (Conabio-Pronare). 2006. Sistema de Información para la Reforestación (SIRE). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad-Programa Nacional de Reforestación. Paquetes tecnológicos. Especies varias. [http://148.223.105.188:2222/gif/snifportal/index.php?option=com\\_content&task=view&id=23&Itemid=24](http://148.223.105.188:2222/gif/snifportal/index.php?option=com_content&task=view&id=23&Itemid=24) (octubre a noviembre de 2009).

Conde, C., B. Martínez, O. Sánchez, F. Estrada, A. Fernández, J. Zavala y C. Gay. 2008. Escenarios de Cambio Climático (2030 y 2050) para México y Centro América. Temperatura y Precipitación. [http://www.atmosfera.unam.mx/gclimatico/index.php?option=com\\_content&view=article&id=61&Itemid=74](http://www.atmosfera.unam.mx/gclimatico/index.php?option=com_content&view=article&id=61&Itemid=74) (11 de agosto de 2009).

Díaz, G. 2007. Potencial agroproductivo de especies forestales en México. In: Fernández, R., C. Ortiz, M. Reyes, F. de J. Legorreta P. y G. García (comps.). Reporte anual de investigación e innovación tecnológica. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). México, D.F., México. 304 p.

Environmental Systems Research Institute. (ESRI). 2009. ArcGIS Desktop Help 9.3. <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=welcome> (5 de agosto de 2011).

Gitay, H., A. Suárez, R. T. Watson and D. J. Dokken. 2002. Climate Change and Biodiversity. Technical Paper V. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-changes-biodiversity-en.pdf> (25 de agosto de 2011).

*et al.* (2001), according to whom the GFDL 2.0 model, being less restrictive than HADGEM, offers a less dramatic potential scenario of future environmental conditions.

## Conclusions

The spatial distribution of *A. religiosa* and *P. montezumae* in the Estado de México under climate change scenarios for 2030 and 2050 tends to decrease in terms of the expanse of suitable areas; the most affected species is *P. montezumae*. The suitability of the land for the two assessed species in the face of this phenomenon will focus primarily on the northern region of the state, where suitable surfaces will be scarce and will be limited to certain areas of Sierra Nevada.

*End of the English version*

Gómez D., J. D., A. I. Monterroso R y J. A. Tinoco R. 2007. Distribución del cedro rojo (*Cedrela odorata* L) en el estado de Hidalgo, bajo condiciones actuales y escenarios de cambio climático. *Maderas y Bosques* 13 (2): 29-49.

Gómez M., L. L. Galicia y S. Aguilar. 2008. Remedios. Sensibilidad de grupos funcionales al cambio climático en la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Investigaciones Geográficas* 67: 76-100.

Gómez D., J. D., A. I. Monterroso R., J. A. Tinoco R. and M. L. Toledo M. 2011. Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in Mexico. *Atmósfera* 24 (1): 31-52.

González, H. A., G. M. Cruz B., F. Moreno S. y E. D. Sotelo R. 2006. Base de datos edafológicos para la planeación y manejo de los recursos forestales del Estado de México. Reunión Nacional de Investigación Forestal. CENID-COMEF. INIFAP. México, D.F., México. Publicación Especial Núm. 1. pp. 89-90.

Gray, P. A. 2005. Impacts of climate change on diversity in forested ecosystems: Some examples. *The Forestry Chronicle* 81: 655-661.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1998. The Regional Impacts of Climate Change. An Assessment of Vulnerability. A special Report of IPCC Workers Group II. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 558 p.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. In: Parry, M. L., O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson (eds.). Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 976 p.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2005. Carta de Uso Actual del Suelo y Vegetación. Serie III. Escala. 1:250 000. Aguascalientes, Ags., México. s/p.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2007. Anuario Estadístico. Aguascalientes, Ags., México. Tomo I. 576 p.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2008a. Anuario Estadístico. Aguascalientes, Ags., México. Tomo I. 532 p.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2008b. Carta de Uso Actual del Suelo y Vegetación. Serie III. Escala. 1:250 000. Aguascalientes, Ags., México. s/p.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2014. Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx> (24 de julio de 2014).



- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (INIFAP-Conabio). 1995. Mapa edafológico. Escala 1:250 000 y 1:1 000 000. México, D. F., México. s/p.
- Iverson, L. R. and A. M. Prasad. 2002. Potential redistribution of tree species habitat under five climate change scenarios in the eastern US. *Forest Ecology and Management* 155: 205-222.
- Lindner, M., P. Lasch and M. Erhard. 2000. Alternative forest management strategies under climatic change-prospects for gap model applications in risk analyses. *Silva Fennica* 34 (2): 101-111.
- Lomolino, M. V., B. R. Riddle and J. H. Brown. 2005. *Biogeography*. Tercera Edición. Sinauer Associates. Sunderland, MA, USA. 868 p.
- Magaña R., V. O. 2010. Guía para generar y aplicar escenarios probabilísticos regionales de cambio climático en la toma de decisiones. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F., México. 79 p.
- Magaña, V., C. Conde, Ó. Sánchez and C. Gay. 1997. Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico. *Climate Research* 9 (2): 107-114.
- Martínez M., E., A. T. Peterson and W. W. Hargrove. 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.
- McGuffie, K., A. Henderson-Sellers and H. Zhang. 1998. Modelling climatic impacts of future rainforest destruction. In: Maloney, B. K. (ed). *Human Activities and the Tropical Rainforest*. Kluwer Academic: Amsterdam, Holland. pp. 169-193.
- Maslin, M. 2004. Atmosphere: Ecological Versus Climatic Thresholds. *Science* 306(5705): 2197-2198.
- Pearson, G. and T. P. Dawson. 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography* 12 (5): 361-37.
- Protectora de Bosques del Estado de México (Probosque). 2014. Antecedentes. Secretaría del Medio Ambiente. Gobierno del Estado de México. <http://portal2.edomex.gob.mx/probosque/acercadeprobosque/antecedentes/index.htm> (3 de octubre de 2014).
- Rosenzweig, C., G. Casassa, D. J. Karoly, A. Imeson, C. Liu, A. Menzel A., S. Rawlins, T. L. Root, B. Seguin and P. Tryjanowski. 2007. Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. In: Parry, M. L., O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson (eds). *Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge, UK. pp. 79-131.
- Sáenz R., C., R. Guzmán R. and G. E. Rehfeldt. 2006. Altitudinal genetic variation among *Pinus oocarpa* populations in Michoacán, México; implications for seed zoning, conservation of forest genetic resources, tree breeding and global warming. *Forest Ecology and Management* 229: 340-350.
- Sellers, H. and K. McGuffie. 1987. *A Climate Modelling Primer*. John Wiley & Sons. Chichester, West Sussex, England. 217 p.
- Trenberth, K. E. 1992. *Climate system modelling*. Cambridge University Press. Cambridge, England. 788 p.
- Villers, R. L. and I. Trejo V. 1997. Assessment of the vulnerability of forest ecosystems to climate change in Mexico. *Climate Research* 9: 87-93.
- Villers, R. L. and I. Trejo V. 1998. Climate Change on Mexican Forests and Natural Protected Areas. *Global Environmental Change Elsevier Science* 2(8): 141-157.
- Villers, R. L. and I. Trejo V. 2004. Evaluación de la vulnerabilidad en los ecosistemas forestales. In: Martínez, J. y A. Fernández B. (eds). *Cambio climático: una fisión desde México*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología (Semarnat-INE). México, D.F., México. pp. 239-254.
- Walther, G. R., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T. J. C. Beebee, J. M. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg and F. Bairlein. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416: 389-395.

