

CAMBIO CLIMÁTICO

Aproximaciones para el estudio de
su efecto sobre la biodiversidad

Editores:

Gerardo Sánchez Rojas

Claudia Ballesteros Barrera

Numa P. Pavón

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Humberto Veras Godoy

Rector

Adolfo Pontigo Loyola

Secretario General

Jorge del Castillo Tovar

Coordinadora de la División de Extensión

Octavio Castillo Acosta

Director del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

Alejandro Vizuet Ballesteros

Director de Ediciones y Publicaciones

Jesús M. Castillo Cerón

Jefe del Área Académica de Biología

Primera edición: 2011

© UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

Abasolo 600, Centro, Pachuca, Hidalgo, México. CP 42000

Correo electrónico: editor@uaeh.edu.mx

Prohibida la reproducción parcial o total de esta obra

sin consentimiento escrito de la UAEH

ISBN: 978-607-482-152-9

A la memoria de Porfirio y Viky
GSR

Con mi afecto y admiración para
mi madre Rita
NPPH

A mis padres y hermanos quienes con su inmenso amor y apoyo han sido como un faro que me guía aún en los momentos más oscuros. Roy, Aldo, Erick y Pecas son mis soles que me impulsan a seguir siempre. A Elizabeth por mostrarme que las palabras incondicionalidad y amor existen en la realidad. A José que me ha enseñado a no perder el camino y que si uno cree en sus sueños la brújula siempre apuntará hacia la Luna. Porque gracias a la honestidad, al trabajo y a la verdad se puede mirar de frente y a los ojos en paz.

CBB

Presentación

Desde el siglo pasado el promedio mundial de la temperatura ha aumentado en 0.7°C , incluso en lugares como el ártico la tasa de cambio es casi del doble y la evidencia muestra que esta tendencia se mantendrá (IPCC, 2007). Las proyecciones realizadas hasta el momento indican que para el año 2100 puede haber un incremento en el promedio de la temperatura global que oscile entre 1.1 hasta 6.4°C . Así mismo vendrán cambios en los regímenes pluviales muy severos a lo largo del planeta (IPCC, 2007). Estos cambios registrados hasta el momento, y los que se proyectan ocurrirán en el futuro son la base del interés del estudio del cambio climático mundial, así como de las alteraciones profundas que generan en el sistema natural que se presenta en la tierra (Lawler, 2009).

Lo anterior ha motivado que los últimos años, se genere una gran cantidad de literatura sobre el cambio climático y sus posibles consecuencias en diferentes aspectos de la vida sobre el planeta, tanto en las especies silvestres como en las sociedades humanas (Putasso *et al.*, 2010; Peterson *et al.*, 2010). Para adentrarnos al tema del cambio climático, es importante distinguir que el *clima* es diferente al *estado del tiempo*, ya que este último término se refiere a cambios locales de escala temporal corta en variables tales como la temperatura, la precipitación, la velocidad del viento y la humedad. Estas variables que conforman el estado del tiempo constantemente se encuentran variando aun a escala de tiempo pequeñas, pero estos cambios se encuentran limitados por un intervalo de valores históricos de cada una de las variables que se utilizan para estimar el estado del tiempo. En escalas más amplias de tiempo las variables presentan una serie de ciclos temporales que pueden ser predecibles con bastante precisión. Estas predicciones de largo tiempo de las fluctuaciones son lo que conocemos como el clima (Van Dyke, 2008).

Los estudios sobre los cambios climáticos no son nuevo, de hecho, el descubrimiento de que las comunidades pueden cambiar drásticamente en un periodo relativamente corto de tiempo, proviene de entre otros estudios, de los restos fosilizados que se almacenan en las madrigueras de las ratas nopaleras (*Genero Neotoma*) que muestra con las especies fosiles registradas de plantas este cambio de la vegetación como consecuencia del cambio de clima que se ha experimentado a lo largo de los últimos 40,000 años (Betancourt *et al.*, 1990). En este libro Ballesteros-Barrera y Rodríguez muestran en su capítulo las diferentes técnicas que se utilizan para hacer reconstrucción paleo-climática así como una serie de localidades y su ubicación geográfica donde se han obtenidos datos de primera mano sobre el cambio climático en México.

Afortunadamente en la actualidad numerosas agencias tienen como objetivo mantener un monitoreo rutinario sobre diferentes aspectos con referente a la conservación de la naturaleza, y además proporcionan una gran cantidad de información de acceso libre para obtener la información de base de estos monitoreos tal es el caso de Millennium Ecosystem Assessment (<http://www.maweb.org/en/index.aspx>), Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) (<http://www.ipcc.ch/>), Group of Earth Observation (<http://www.earthobservations.org/>), United Nations Environment Programme (UNEP) (<http://www.unep.org/>), World Resources Institute (WRI) (<http://www.wri.org/>), Global Biodiversity Information Facility (GBIF) (<http://www.gbif.org/>) etc. Estos esfuerzos y la disponibilidad de su información nos muestran un panorama global del avance en muchos campos de la conservación de la biodiversidad, el cual en la mayoría de los casos, paradójicamente se observa como lento y enfatizan la necesidad de una mayor velocidad en los cambios para aumentar la posibilidad de la permanencia de la biodiversidad en nuestro planeta.

A pesar de ello es evidentemente que los grandes avances que emanan sobre los estudios sobre el cambio climático y su efecto en algunos de los aspectos de la biodiversidad, empiezan por esta filosofía de poner a disposición lo más rápido y en un formato adecuado, mucha información que anteriormente no estaba disponible, pues es evidente que ante la urgencia de contar con las mejores estimaciones sobre las posibles consecuencias de este fenómeno, estas solo pueden ser generadas si se cuenta con la mayor cantidad de información disponible, lo que permitirá a que se puedan tomar mejores cursos de acción por parte de los gobiernos, los planificadores y los investigadores (Gioia, 2010). De esta manera a pesar de que están disponibles las capas (*layers*) de 19 variables ambientales, estimados por interpolación para casi todo el mundo a una escala de 30 arc s lo que equivale a cerca de 0.86 km² en el ecuador y en un poco menos en otras latitudes (comúnmente conocida como la resolución de 1-km) (Hijmans *et al.*, 2005), Tellez y sus colaboradores conscientes de que estas capas de información pueden ser mejoradas, nos describe ampliamente en su capítulo del libro la forma en que ellos generaron un nuevo juego de

capas a partir de información local que abarco en el tiempo desde el año 1898 hasta el año 1995, la base de datos original consistió en más de 7400 estaciones meteorológicas estándar limitadas geográficamente del sur de los Estados Unidos, todo México, el norte de Centroamérica hasta Nicaragua y parte del occidente de Cuba. Producto de estas capas más robustas se han generado un buen número de trabajos sobre diferentes aspectos (referidos en el capítulo).

Evidentemente el cambio climático es una cuestión que ya no solo se plantea como parte de un ejercicio intelectual, hoy es parte de lo cotidiano y se observa que para nuestra sociedad tiene implicaciones muy drásticas, quizás en los próximos años dentro de las ciudades del centro de México (Pachuca-Tula-Tulancingo, Toluca, Puebla-Tlaxcala-Apizaco y Zona Metropolitana de la Ciudad de México), donde se proyecta un incremento importante de la temperatura que ocasionará que estas ciudades con condiciones frescas se tornen más calurosas. Como una de las principales consecuencias de esto, es la necesidad de un incremento del 1.2 % de la energía eléctrica nacional para poder hacer frente a este cambio de la temperatura de nuestras más pobladas ciudades en México, tal y como lo plantean Tejeda y sus colaboradores en su capítulo del libro lo cual tendrá implicaciones en nuestra forma de vivir en un futuro no muy lejano.

Es evidente que la percepción del cambio climático, no solo se presentan en las zonas urbanas, sino que en los ambientes rurales también hay una conciencia de este cambio, y es en estas zonas rurales donde la toma de decisiones de los manejadores será crítica hacia el futuro, pues muchas de las acciones de mitigación y adaptación que deberemos de implementar para reducir el efecto de este cambio, serán precisamente hechas en estas zonas. Magaña y Gómez nos muestran en su contribución al libro un recuento de las amenazas a la biodiversidad asociadas al cambio climático así como los mecanismos de mitigación y adaptación dentro de la conservación, servicios ecosistémicos y aprovechamiento sustentable de los recursos biológicos que perciben los directores de las Áreas Naturales Protegidas en nuestro país, aportando también una serie de escenarios regionales y sus posibles consecuencias hacia el futuro.

Como se mencionó antes, el clima es realmente un concepto complejo incluso en muchas ocasiones, el clima mismo está sujeto a otros fenómenos externos al sitio de interés, tal es el caso del fenómeno conocido como "El Niño". Las variaciones de precipitación ocasionadas por este fenómeno tienen efectos directos en los eventos fenológicos de las plantas, tal como lo muestra el capítulo de Pavón y Briones, los cambios en la fenología de cuatro especies de arbustos dominantes, dos caducifolios y dos perennifolios en la Reserva de Biosfera de Tehuacán-Cuicatlán que se encuentran asociados a este evento. También "El Niño" puede tener un efecto en otros factores abióticos a los que se enfrentan los seres vivos, tales como la intensidad de los incendios forestales, donde se observa que hay una asociación positiva entre esta intensidad de los incendios forestales y la ocurrencia en nuestro territorio nacional de los eventos de "El Niño" para los estados de la República donde el matorral xerófilo es el tipo de vegetación dominante tal y como lo muestran el capítulo de Pavón y Sánchez-Rojas dentro del libro.

Peterson *et al.*, (2010) detecta que la mayor parte de los trabajos sobre el efecto del cambio climático en los seres vivos (al menos al nivel de las poblaciones) se agrupan en dos líneas generales de investigación, el estudio de los cambios fenológicos y la distribución de las poblaciones.

En este sentido Barrada y colaboradores nos muestran en su capítulo dentro del libro, una síntesis de sus investigaciones sobre predicciones de los cambios fenológicos y las posibilidades de extinguirse en dos especies de encinos que se distribuyen en el "Cofre de Perote" ante los posibles escenarios que plantea el cambio climático, basando su análisis en las funciones envolventes de la conductancia estomática en dependencia de las variables micro-climáticas.

Con un enfoque, que combina datos ecofisiológicos y modelos de distribución de las especies, Orellana y sus colaboradores nos muestran un gran cantidad de datos inéditos sobre la ecofisiología de las palmas (arecáceas), cuando las concentraciones de CO₂ se incrementan, además genera posibles efectos en la distribución de estas palmas en la península bajo diferentes escenarios de cambio climático (en función hacia el futuro de un incremento o no de los gases de invernadero).

En los últimos años se ha incrementado el uso de los modelos basados en el nicho ecológico para estimar área de distribución potencial en las diferentes especies (Peterson *et al.*, 2010), utilizando modelos climáticos que aportan información sobre condiciones actuales, pasadas y futuras. Ballesteros-Barrera en su capítulo del libro nos muestra en tres momentos en el tiempo (último ciclo glacial/ interglacial, en el presente y en el futuro), la distribución potencial del arbusto *Larrea tridentata*, una especie dominante en el Desierto Chihuahuense, que en el pasado sufrió una disminución en su distribución, mientras que en el presente y el futuro se plantea que esta especie podría colonizar nuevas áreas, sus resultados apoyan la idea de que las especies conservan su nicho por largo periodos de tiempo.

Finalmente en esta misma línea de investigación, pero tratando de averiguar en qué medida pueden darse los cambios en la distribución de las especies Fera y sus colaboradores nos muestran como las predicciones de cambio climático propuestas pueden explicar en buena medida la presencia de especies de mariposas tropicales en el sur de Texas en los Estados Unidos, al mismo tiempo evaluaron en términos de conservación los posibles escenarios para las dos especies de mariposas estudiadas.

El objetivo principal con el que desarrollo este libro y sus capítulos es que en el futuro sea una contribución de consulta que permita a los estudiantes de las ciencias de la vida introducirse al tema del cambio climático desde diferentes ángulos.

El libro contribuirá entonces a difundir el marco teórico en el que se enmarcan muchas de las investigaciones sobre cambio ambiental, así como ser una muestra representativa de los grupos de investigación que trabajan sobre estos temas y donde se desarrollan. Esta contribución surge sin duda de la buena disposición de los autores quienes en su mayoría asistieron al Simposio de *Cambio Climático y su efecto en la Biodiversidad* en octubre de 2009 y estuvieron de acuerdo en participar en un libro posterior al evento del Simposio.

Evidentemente estas acciones no habrían sido posibles de no haber contado con el apoyo económico del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), del gobierno del Estado de Hidalgo a través del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Hidalgo (COCYTEH) mediante el proyecto FOMIX-HIDALGO Clave 98122, así como del apoyo de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Gerardo Sánchez Rojas
Pachuca de Soto abril de 2011.

Literatura citada

Betancourt, J. L., T. R. Van Devender, & P. S. Martin. 1990. *Packrat middens. The last 40,000 years of biotic change* The University of Arizona Press, Tucson.

Gioia, P. 2010. Managing biodiversity data within the context of climate change: towards best practice. *Austral Ecology* 35:392–405.

Hijmans, R. J., S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones, & A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25:1965–1978.

IPPC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution Working Group I Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.

Lawler, J. J. 2009. *Climate Change Adaptation Strategies for Resource Management and Conservation Planning*. New York Academy of Sciences 1162:79-98.

Pautasso, M., K. Dehnen-Schmutz, O. Holdenrieder, S. Pietravalle, N. Salama, M. J. Jeger, E. Lange, & S. Hehl-Lange. 2010. Plant health and global change – some implications for landscape management. *Biological Review* 85:729–755.

Peterson, A. T., S. Menon, & X. Li. 2010. Recent advances in the climate changes, biology literature: describing the whole elephant. *Wires Climate Changes* 1:548-555.

Van Dyke, F. 2008. *Conservation Biology: Foundations, Concepts, Applications*. Springer, Illinois.

Índice

Capítulo I	
Métodos de reconstrucción paleoclimática	1
<i>Claudia Ballesteros-Barrera y Alejandro Rodríguez Ramírez</i>	
Capítulo II	
Desarrollo de coberturas digitales climáticas para México	15
<i>Oswaldo Téllez, Michael A. Hutchinson, Henry A. Nix y Peter Jones</i>	
Capítulo III	
Confort térmico humano en la megalópolis del valle de México hacia mediados del siglo XXI	25
<i>Adalberto Tejeda-Martínez, Irving R. Méndez-Pérez y Elda Luyando-López</i>	
Capítulo IV	
Escenarios regionales del cambio climático e impactos en Areas Naturales Protegidas:	39
hacia una estrategia de adaptación	
<i>Víctor Magaña Rueda y Leticia Gómez Mendoza.</i>	
Capítulo V	
El efecto de El Niño en ecosistemas semiáridos: un estudio de caso sobre la fenología	
de arbustos en el centro-sur de México	49
<i>Numa P. Pavón y Oscar Briones</i>	
Capítulo VI	
El Niño y los Incendios en Matorrales Semiáridos de México	61
<i>Numa P. Pavón y Gerardo Sánchez Rojas</i>	
Capítulo VII	
Implicaciones del cambio climático en la fisiología ecológica de las plantas	71
<i>Víctor L. Barradas, José Luis Landa y Juan Cervantes Pérez.</i>	
Capítulo VIII	
Las arecáceas de la península de Yucatán ante el cambio climático:	79
aproximación ecofisiológica y de distribución	
<i>Roger Orellana, Lilia Carrillo, y Celene Espadas</i>	
Capítulo IX	
Efecto del cambio climático en la distribución de especies del Desierto	89
Chihuahuense del pleistoceno al siglo XXI	
<i>Claudia Ballesteros-Barrera</i>	
Capítulo X	
Efecto del cambio climático en la distribución de los lepidópteros mesoamericanos <i>Itaballia</i>	101
<i>demophile centralis</i> Joicey & Talbot, 1928 y <i>Pieriballia viardi viardi</i> (Boisduval, 1836)	
<i>Teresa P. Feria Arroyo, Marysol Trujano Ortega, Armando M. Luis Martínez, Jorge Llorente Bousquets,</i>	
<i>Jon M. Dale, y Jesús Muñoz</i>	

Lista de Autores

Claudia Ballesteros-Barrera

Laboratorio de Ecología del Paisaje y Ordenamiento Ambiental. Centro de Investigaciones Biológicas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Apartado Postal 69-1, 42001 Pachuca, Hidalgo, México. Nueva Dirección Departamento de Biología, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, A.P 55-35, C.P. Av. San Rafael Atlixco #186 Col. Vicentina, Del. Iztapalapa CP 09340, México, D.F. Email bbc0711@gmail.com

Víctor L. Barradas

Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, Apdo. Postal 70-275, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510 México, D.F. Email: vbarrada@ecologia.unam.mx

Oscar Briones

Departamento de Biología Evolutiva, Instituto de Ecología, A. C., Apartado 63, 91000, Xalapa, Veracruz, México. Email: oscar.briones@inecol.edu.mx

Lilia Carrillo

Centro de Investigación Científica de Yucatán Calle 43, No. 130, Col. Chuburná de Hidalgo, C.P. 97200, Mérida, Yucatán, México. Email: coloppy@cicy.mx

Juan Cervantes Pérez

Centro de Ciencias de la Tierra y Facultad de Instrumentación Electrónica y Ciencias Atmosféricas, Universidad Veracruzana, Lomas del Estadio, 91000 Xalapa, Veracruz, e Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, Apdo. Postal 70-275, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510 México, D.F. Email: jcervantes@uv.mx

Jon M. Dale

Department of Biology, Texas A&M University-Kingsville, 700 University Blvd., Kingsville, TX 78363; + (956) 244-4198.

Celene Espadas

Centro de Investigación Científica de Yucatán Calle 43, No. 130, Col. Chuburná de Hidalgo, C.P. 97200, Mérida, Yucatán, México. Email: uhkin@cicy.mx

Teresa P. Feria Arroyo

Department of Biology, University of Texas–Pan American, 1201 W. University Drive, Edinburg, TX, 78541. Email: tpferia@utpa.edu.

Leticia Gómez Mendoza.

Colegio de Geografía, UNAM. Facultad de Filosofía y Letras Circuito Escolar S/N. Ciudad Universitaria, Coyoacán, D.F. C.P. 04510, Email: gomez.leticia852@gmail.com

Michael A. Hutchinson

Centre for Resource and Environmental Studies (Actualmente Fenner School of Environment and Society) The Australian National University. Hancock Building 43, Biology Place, City, Canberra, 0201 ACT, Australia.

Peter Jones

Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia.

José Luis Landa

Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, Apdo. Postal 70-275, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510 México, D.F.

Armando M. Luis Martínez

Museo de Zoología 'Alfonso L. Herrera', Departamento de Biología Evolutiva, Facultad de Ciencias, UNAM, México. Apdo. Postal 70-399. México, 04510 D.F.

Elda Luyando-López

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito exterior, Ciudad Universitaria, México D.F. 04510, México.

Jorge Llorente Bousquets

Museo de Zoología 'Alfonso L. Herrera', Departamento de Biología Evolutiva, Facultad de Ciencias, UNAM, México. Apdo. Postal 70-399. México, 04510 D.F.

Víctor Magaña Rueda.

Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. Circuito Exterior S/N. Ciudad Universitaria, Coyoacán, D.F. C.P. 04510. Email: victormr@servidor.unam.mx

Irving R. Méndez-Pérez

Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz.

Jesús Muñoz

Real Jardín Botánico (CSI), Plaza de Murillo 2, E-28007 Madrid, España & Universidad Tecnológica Indoamérica, Quito, Ecuador.

Henry A. Nix

Centre for Resource and Environmental Studies (Actualmente Fenner School of Environment and Society) The Australian National University. Hancock Building 43, Biology Place, City, Canberra, 0201 ACT, Australia.

Roger Orellana

Centro de Investigación Científica de Yucatán Calle 43, No. 130, Col. Chuburna de Hidalgo, C.P. 97200, Mérida, Yucatán, México.

Numa P. Pavón

Laboratorio de Comunidades. Centro de investigaciones Biológicas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, apartado postal 63, plaza Juárez, Pachuca de Soto Hidalgo 4200. npavon@uaeh.edu.mx

Alejandro Rodríguez Ramírez.

Proyecto de Investigación en Limnología Tropical, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México. Tlalnepantla, Edo. de México 54090, México. Laboratorio de Paleolimnología, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. México DF 04510, México. Email: alerdz@unam.mx

Gerardo Sánchez Rojas

Laboratorio de Conservación Biológica. Centro de investigaciones Biológicas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, apartado postal 63, plaza Juárez, Pachuca de Soto Hidalgo 4200. Email: gsanchez@uaeh.edu.mx

Adalberto Tejeda-Martínez.

Licenciatura en Ciencias Atmosféricas, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México Teléfono y fax 228-8421700 extensión 11666. Email: atejeda@uv.mx.

Oswaldo Téllez

Laboratorio de Recursos Naturales. UBIPRO. Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM. Tlalnepantla de Baz, C.P. 54090, Estado de México, México. Email: tellez@servidor.unam.mx

Marysol Trujano Ortega

Museo de Zoología 'Alfonso L. Herrera', Departamento de Biología Evolutiva, Facultad de Ciencias, UNAM, México. Apdo. Postal 70-399. México, 04510 D.F.

Capítulo I

Métodos de reconstrucción paleoclimática

Claudia Ballesteros-Barrera y Alejandro Rodríguez Ramírez

Resumen

Los estudios paleoclimáticos son útiles para la comprensión de la naturaleza y posibles causas de las actuales variaciones climáticas, ya que permiten el análisis de los cambios en el relativamente breve periodo instrumental desde una perspectiva temporal más amplia. En este trabajo se describen algunos de los principales tipos de registros *proxies* que permiten la reconstrucción del clima a lo largo de la historia de la Tierra.

Palabras clave: Registros *proxies*, paleoclima, polen, diatomeas, ostrácodos, nidos de *Neotoma*, barniz de roca, loess.

Abstract

Paleoclimatic studies are useful to understand the nature and possible reasons for present climate variations, because they allow record and analyze changes in the relatively short instrumental period in longer-scale perspectives. In this paper we describe some of the main types of proxy records that allow the reconstruction of climate over Earth's history.

Key words: Proxy records, paleoclimate, pollen, diatoms, ostracodes, Packrat middens, rocky varnish, Loess.

Introducción

Se ha detectado que actualmente el clima de la Tierra está cambiando de una manera rápida. En un lapso de tiempo relativamente corto, se han presentado a nivel mundial alteraciones sensibles en los regímenes climáticos, debidos principalmente a que las concentraciones de los gases de efecto invernadero se han incrementado, alcanzando en las décadas de 1970s y 1990s los niveles más altos (IPCC, 2001). Tomando en cuenta la tasa actual de emisión de gases de invernadero a la atmósfera. Los escenarios climáticos para el siglo XXI predicen un calentamiento global no registrado en los últimos 10,000 años (IPCC, 2001). Ante este escenario poco alentador cabría preguntarse ¿Cómo saber qué tanto puede cambiar el clima?, ¿Estamos entrando a una época de calor extremo? ¿Cómo se ha determinado el clima de nuestro planeta a lo largo de su historia?

Los registros instrumentales del clima abarcan tan sólo una pequeña fracción de la historia terrestre, por lo tanto no proveen una adecuada perspectiva de la variación climática y la evolución del clima en grandes periodos de tiempo. Por ejemplo, las primeras observaciones instrumentales del clima en México fueron hechas en el año 1769, pero duraron solamente 9 meses de ese año, y no fue sino hasta el último tercio del siglo XIX cuando se estableció una red de observatorios que comprendió gran parte del país (Jáuregui, 1979; 2004).

A nivel climático la Tierra ha mostrado relativa inestabilidad a lo largo de la historia, presentándose esta variabilidad de manera gradual o abrupta en el tiempo (Alverson *et al.*, 2003). Con el objetivo de documentar dichas variaciones, los paleoclimatólogos trabajan con datos obtenidos a partir de los llamados "*proxies*" o indicadores naturales indirectos, que pueden ir más allá del registro instrumental y permiten inferir como fueron las condiciones climáticas del pasado y los procesos de cambio de las mismas. La evidencia de dichos cambios queda registrada en indicadores indirectos de variables ambientales no observadas. La naturaleza de estos indicadores puede ser física, química o biológica, con la característica esencial de ser sensibles a los cambios en el ambiente en que se desarrollan, que a su vez, dichos cambios están relacionados con variaciones en el ambiente o el clima de la región (Gall, 1983). De igual manera, los *proxies* deben cumplir con la característica indispensable de poder conservarse a través del tiempo de manera inalterada (Smol, 1992). Además, es de tomar en cuenta que cada material *proxie* tiene características particulares que difieren de acuerdo a su cobertura espacial, al período al cual pertenece, y su capacidad de resolver eventos con exactitud en el tiempo (Follieri *et al.*, 1988).

Los restos morfológicos de organismos así como la mineralogía, la estructura de los sedimentos, los constituyentes químicos orgánicos e inorgánicos, entre otros elementos preservados en los sedimentos, constituyen los *proxies* que permiten interpretar distintas fases en las condiciones climáticas pasadas, tales como fases áridas, fases húmedas (Wetzell, 1981) eventos volcánicos (hidrotermalismo, aporte de materiales piroclásticos, Kurenkov, 1966) y tectónicos (fallamientos, subsidencia, Israde y Garduño, 1999). En la mayoría de

los casos, los sedimentos acumulados presentan restos de organismos, o partes de los mismos, que vivieron en algún momento en él o que fueron arrastrados de la cuenca, y que poseen estructuras resistentes a la descomposición orgánica, así como a la disolución en el propio medio. La información que pueden aportar los microfósiles -polen, esporas, espículas de esponjas, diatomeas, restos de crustáceos, etc.- y otros indicadores ecológicos puede llegar a ser muy considerable (Margalef, 1957, Gall, 1983).

Paleolimnología

Para los ambientes terrestres, los sedimentos que se depositan en los fondos de los lagos son una valiosa fuente de información paleoclimática y paleoecológica, ya que poseen un conjunto de datos o líneas de evidencia sobre el cambio climático (Lozano-García, 2004). La paleolimnología es una ciencia multidisciplinaria que centra su interés en el estudio de la evolución lacustre, y trata con todo aspecto -biológico, químico, físico, geológico, etc.- útil para la reconstrucción e interpretación de la historia. Dicha historia encuentra puntos de aplicación de suma importancia en el cambio climático y el cambio ambiental global, así como en procesos más locales, como eutrofización, acidificación, monitoreo a largo plazo y otros componentes de la ontogenia lacustre (Smol, 1992, Smol *et al.*, 1995). Para realizar dichos estudios es necesario perforar el sedimento del fondo de los lagos y estudiar los minerales y diversos fósiles que contiene (Fig. 1), y a partir del análisis de estos componentes conocer las variaciones naturales del clima que afectaron al planeta durante los últimos siglos a miles de años (Caballero *et al.*, 2007).

La interacción entre geósfera, atmósfera, hidrósfera y biósfera dejan una huella única en los sedimentos de cada lago; por su tamaño y ubicación y a diferencia de los océanos, la respuesta de los lagos a los cambios ambientales es más rápida. La facilidad con que varía los lagos su proporción iónica, salinidad y en general sus parámetros fisicoquímicos con cambios climáticos, hace que los sedimentos lacustres sean registros potenciales que permiten enriquecer el conocimiento sobre la variabilidad ambiental a más grande escala (Anadon *et al.*, 1991). Los sedimentos están conformados por dos tipos de componentes básicos: el material alóctono originado fuera de los lagos, y el material autóctono, propio del mismo lago, que puede ser de origen biogénico o como resultado de la propia precipitación de compuestos en la columna de agua (Bradley, 1999). Dichos sedimentos contienen rocas, tales como carbonatos, evaporitas, fragmentos de roca, además de algunos otros componentes como carbon y restos de plantas, cuyos análisis químicos son usados como elementos para la reconstrucción del clima. Por ejemplo, las capas de tefra (material piroclástico expulsado por erupciones volcánicas) incluidas en los sedimentos pueden dar información detallada acerca de actividad volcánica y son buenos marcadores estratigráficos. Los sedimentos laminados anualmente (varvas) son particularmente importantes, ya que proporcionan un registro cronológico exacto de cambios climáticos, dada su buena calibración en la escala de tiempo. Las varvas pueden revelar abundante información paleoambiental anual, no sólo tratan de la variabilidad interanual del clima, sino que en algunos casos, revelan detalles referentes a cambios estacionales o incluso interestacionales (Zolitschka & Negendank, 1996). La concentración, tamaño y tipo de minerales magnéticos presentes en los sedimentos constituyen un elemento útil en estudios paleoambientales, ya que facilitan el establecimiento de correlaciones entre secuencias sedimentarias provenientes de una misma cuenca y su variación puede estar relacionada con procesos de intemperismo y erosión de la región; dichas variaciones pueden deberse a procesos tales como la sucesión vegetal y el desarrollo de suelos en respuesta a cambios climáticos o actividades humanas (Sandgren & Snowball 2001, Oldfield *et al.* 1978, 1983 en Ortega 1992, Thompson *et al.* 1975). Y a un nivel antropológico, debido a que las orillas de los lagos son atractivas para los humanos, los sedimentos lacustres pueden dar información sobre culturas antiguas y sus relaciones con el ambiente (Caballero *et al.* 2002, Lorenzo & Mirambell 1986, Sugiura, 2000).



Figura 1. A Extracción de secuencias sedimentarias litorales de paleolagos. B. Núcleo de paleolago dividido en tres secciones. Sección izquierda más reciente, sección media y sección derecha más antigua. La escala se muestra en centímetros (Fotografía Alejandro Rodríguez).

Una ventaja de los sedimentos lacustres es que normalmente contienen materia orgánica que pueden ser datada por técnicas de radiocarbono y que además permiten hacer correlaciones entre cuencas para identificar cambios climáticos regionales (Bradley, 1999). Uno de los aspectos más estudiados es que los sedimentos lacustres proporcionan buenos registros para la información paleoambiental, la cual es preservada en los restos de diferentes microfósiles, como diatomeas y ostrácodos; mientras que el polen y las esporas dan un registro de la historia de la vegetación del área, que a su vez puede ser correlacionada con el clima.

Los sedimentos lacustres tienen muchas ventajas sobre otros tipos de registros continentales, incluyendo: 1) distribución geográfica y ambiental amplia, 2) sedimentación que es comúnmente rápida y continua, 3) el hecho de que los sedimentos lacustres se pueden comparar directamente a sus contrapartes modernas en el mismo lago, que a su vez se puede comparar con los registros históricos e instrumentales para calibrar las señales climáticas. Sin embargo, la información obtenida a partir de sedimentos de los lagos mexicanos hasta el momento es escasa debido a: 1) pobre control cronológico por falta de dataciones o debido a la naturaleza de los sedimentos, 2) preservación pobre del registro, 3) sobre representación de ciertas *taxa* o impacto humano que ensombrecen la posible señal ambiental (Caballero-Miranda, 1997).

Dado que sería muy extenso hablar sobre cada uno de los tipos de *proxies* que se encuentran en los sedimentos lacustres, para fines de este capítulo sólo tocaremos de manera sintética estudios palinológicos, de diatomeas y ostrácodos.

Polen: La palinología, se ha convertido en una de las técnicas de mayor importancia para identificar los antiguos ambientes vegetales. Las plantas producen en ciertas épocas una gran cantidad de granos de polen. Estos granos, de tamaño variable, en condiciones favorables resisten la descomposición durante miles de años gracias a su recubrimiento exterior, exina. Su morfología compleja y variable permite la identificación de la familia, género, y a veces, de la especie de planta de la que proviene. Los granos de polen fósil se recuperan, separan e identifican a partir de muestras de sedimentos tratadas en laboratorio (Fig. 2). El estado de conservación de los granos de polen fósil depende del tipo de polen y del tipo de sedimentos que los contienen.

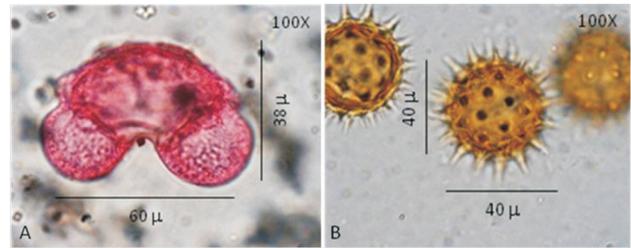


Figura 2.- A. Microfósil de grano de polen de *Pinus* sp. B. Grano de polen actual del mismo paleolago de *Helianthus annuus* (Fotografías: Claudia Ballesteros)

Esta técnica es ampliamente usada para generar datos históricos de la vegetación sobre largos periodos de tiempo (sobre todo para el periodo Cuaternario), siendo extremadamente útiles para predecir el sentido y tasas de cambio en procesos sometidos a perturbación (Lozano-García, 2004). También conforma un registro invaluable del impacto humano, de los ecosistemas, y representa una fuente de información sobre la dinámica de la vegetación, y como evidencia empírica del comportamiento de los *taxa* y comunidades vegetales a lo largo del tiempo y su respuesta a cambios climáticos (Bradbury, 1998). Potencialmente estos registros pueden presentarse en gran cantidad de sitios y en secuencias estratigráficas continuas que pueden registrar cambios de la vegetación durante largos periodos de tiempo, archivando evidencias de cambios en el entorno y que a su vez reflejan cambios ambientales y/o climáticos locales o regionales (Lozano-García, 1996).

Sin embargo, los estudios de polen son escasos en algunos sitios como en las zonas áridas y semiáridas. Ello se debe en parte, a la carencia de sedimentación húmeda continua, así como a la dominancia de especies vegetales polinizadas por insectos. Igualmente, la escasa preservación de granos de polen en sedimentos alcalinos frecuentes en dichas zonas, dificulta la conservación del registro polínico. Estos factores determinan por ejemplo, que *taxa* como *Mezquite* y *Gobernadora*, habituales en zonas áridas, encuentren escasa representación en registros polínicos, a pesar de que ellas dominan la vegetación a nivel local (Challenger, 1998). Otros de los problemas que presentan estos estudios en general es que los granos de polen rara vez pueden ser identificados a niveles taxonómicos inferiores al género. También las diferencias en la tasa de productividad y dispersión del polen exponen un problema significativo para la reconstrucción paleoclimática porque las abundancias relativas de granos de polen en un depósito no pueden interpretarse

directamente en términos abundancia espacial en el área en estudio (Lozano García, 1996). Cuando el polen se ha depositado en agua, se debe tener cuidado en los efectos no climáticos que causan variación en el tipo y abundancia de polen. Estos efectos incluyen asentamientos diferenciales, mezclamiento turbulento y los efectos de enterramiento de organismos (bioperturbación). Desafortunadamente, las dificultades asociadas con el análisis de polen han significado que la mayoría de las reconstrucciones paleoclimáticas han avanzado sólo en una forma cualitativa (Follieri *et al.*, 1988).

Diatomeas: Por otro lado, los sistemas lacustres son las microalgas, las cuales presentan una gran diversidad biológica y fisiológica. Dentro de esta diversidad, las diatomeas juegan un papel muy importante debido a que son organismos extraordinariamente abundantes (Werner 1977), son ecológicamente diversas y están ampliamente distribuidas; su cubierta silíceo rígida (frústula) puede resistir la disolución, con lo cual es frecuente su preservación durante miles o millones de años, siendo posteriormente útiles en la interpretación paleoecológica de los sedimentos lacustres (Bradbury, 1988). El análisis de diatomeas en sedimentos ha sido muy utilizado como herramienta en estudios paleolimnológicos, fundamentado en los conocimientos sobre requerimientos ecológicos de las especies y la composición de las comunidades -a partir de diatomeas contemporáneas- y su relación en el registro estratigráfico (Wetzel, 1981). Al igual que el polen, este tipo de análisis nos permite inferir condiciones paleolimnológicas, que a su vez estarán relacionadas íntimamente con las condiciones ambientales establecidas durante el momento en que habitaron el cuerpo de agua.

Las diatomeas tienen una clara distribución ecológica dada principalmente por la composición iónica, salinidad, pH, nutrientes y temperatura del agua en la que viven (Barron, 1993). Debido a esto y a que tienen una cubierta resistente de silicio (frústula compuesta por dos valvas, Fig. 3), se consideran como uno de los mejores indicadores paleolimnológicos y paleoambientales. Actualmente estas características se han aprovechado en gran medida en este tipo de estudios, donde las variaciones ambientales generan cambios en las comunidades de diatomeas, lo cual a su vez ofrece una evidencia muy precisa de los posibles cambios ocurridos en los lagos así como variaciones del entorno. Existen especies indicadoras de distintas variables limnológicas, que a su vez son dependientes de una combinación de distintos factores ambientales,

esto permite la reconstrucción del clima analizando los cambios en la composición de las comunidades de diatomeas preservadas. Las diatomeas pueden ser identificadas en la mayoría de los casos, hasta nivel específico. (Rodríguez-Ramírez, 2002).

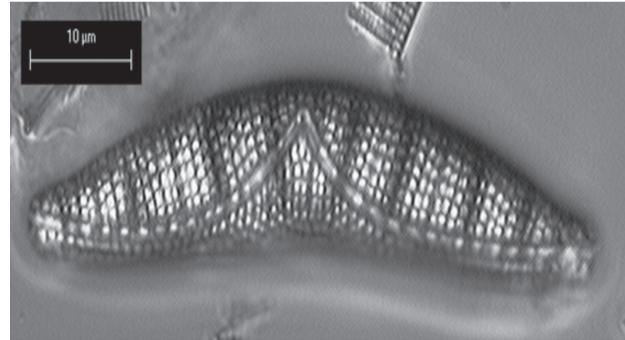


Figura 3. Clásica vista de la frústula de una diatomea (Fotografía Alejandro Rodríguez).

En las regiones áridas, los estudios de diatomeas y ostrácodos se han usado para entender la variabilidad natural de la sequía, debido a que cambios en la composición de las especies de estos organismos sensibles a la salinidad o a la profundidad del agua o de cambios en la química (isotópica o la composición del oligoelemento) de la calcita, reflejan los cambios en la química del agua en la época de humedad o sequía (Stoermer *et al.*, 1995).

Ostrácodos: Los ostrácodos son los microfósiles calcáreos más abundantes en ambientes acuáticos continentales (Lister 1988, Lowe & Walker 1997). Pertenecen al Phylum Arthropoda, Subphylum Crustacea, Clase Ostracoda y su origen se remonta ca. 560 millones de años (m.a.) atrás. La morfología de un ostrácodo está conformada básicamente por un caparazón o concha de Carbonato de Calcio CaCO_3 constituida por dos valvas unidas por la charnela -estructura a manera de bisagra en la parte dorsal- y por la inserción de musculatura que le permite abrirlas o cerrarlas para proteger el cuerpo suave y quitinoso. Dentro de las características más relevantes del caparazón son el tamaño y forma de las valvas, forma y estructura de la charnela, posición y forma del manto valvar, presencia de poros o canales de poros en la superficie valvar, presencia y posición de proyecciones en la valva, número y posición de cicatrices musculares (Fig. 4). Poseen un cuerpo aplanado lateralmente y como en todos los crustáceos, el cuerpo está segmentado, aunque en este caso, únicamente en cabeza y tórax y no muy bien delimitados.



Figura 4. Morfología básica del caparazón de un ostrácodo (superior: valva derecha vista interna, inferior: valva izquierda vista externa. Fotografía Alejandro Rodríguez)

Se puede medir la tasa de ^{18}O a ^{16}O en las valvas fósiles que se encuentran en los sedimentos para reconstruir los cambios en la evaporación/precipitación y por tanto probables cambios en la temperatura a través del tiempo. Lastas de cambio de ^{13}C a ^{12}C analizadas en las valvas pueden inferir –entre otras cosas- cambios en la productividad. El análisis poblacional mediante la identificación de especies con afinidad a distintos parámetros ambientales a lo largo de secuencias sedimentarias permite inferir cambios en la salinidad, temperatura o composición iónica de los lagos. De tal manera que integrando la información que los distintos análisis producen, es posible inferir posibles cambios ambientales y/o climáticos (Hodell et al., 1995).

Nidos de *Neotoma*

Los depósitos conocidos como paleomadrigueras (“middens”), son producidas por una variedad de animales, fundamentalmente roedores. Ellos son capaces de generar acumulación de material biológico en sus madrigueras, las cuales son ricas en restos vegetales (e.g., ramas, hojas, polen, cutículas) y animales (e.g., heces, huesos, insectos). Al evaporarse la orina del roedor, estas acumulaciones se encapsulan, permitiendo la conservación de los materiales depositados, los cuales pueden permanecer intactos durante milenios.

Las paleomadrigueras de roedores han sido ampliamente utilizadas en el estudio de zonas áridas en Norteamérica (Betancourt et al., 1990). Allí los depósitos son producidos exclusivamente por especies del género *Neotoma*. Dicho material ha permitido la reconstrucción precisa de la vegetación y clima sobre todo en desiertos del Norteamérica representando 35 años de estudios regionales realizados por una docena de investigadores, los cuales abarcan un período de tiempo de ca. de 40,000 años, lo que ha permitido además calibrar con precisión los eventos asociados a cada momento de cambio climático.

Este tipo de estudios ha facilitado abordar preguntas en diversas áreas del conocimiento como son botánica, zoología, ecología, biogeografía, arqueología, climatología, entre otras. De las ventajas que tienen es que los macrorestos vegetales contenidos en paleomadrigueras usualmente pueden ser determinados hasta nivel de especie. El supuesto de contemporaneidad y simpatria de los taxa presentes en depósitos de polen puede ser puesto a prueba en los ensambles fósiles de macrorestos vegetales, a través de la datación de especímenes individuales. Asimismo, el problema de la simpatria de los paleorestos vegetales inherente a los estudios de polen, se soluciona al utilizar las paleomadrigueras, por cuanto los macrofósiles vegetales presentes en cada depósito provienen de las inmediaciones de la madriguera (Betancourt & Saavedra, 2002).

Con estos estudios ha sido posible detectar los movimientos de vegetación asociados a las glaciaciones pleistocénicas, los cuales han mostrado la existencia de comunidades más dinámicas de lo que inicialmente se había pensado a partir de estudios biogeográficos (Betancourt et al., 1990). La gran ventaja de las paleomadrigueras es que proporcionan indicaciones no solamente de la cantidad total de precipitación, sino también de su estacionalidad (Metcalf et al. 2000). Las desventajas de las paleomadrigueras reconocidas hasta el momento, incluyen la falta de conocimiento de la duración del episodio deposicional, el cual no puede ser resuelto por fechado radiocarbónico. Una paleomadriguera puede representar desde meses hasta cientos de años de acumulación. A diferencia de los depósitos sedimentarios de lagos, la depositación de paleomadrigueras es discontinua. Ello dificulta las comparaciones temporales. Asimismo, la preservación de las paleomadrigueras se restringe a ambientes rocosos, por lo que la reconstrucción de paleovegetación no incorpora terrenos abiertos o de suelos más profundos (Davis, 1990).

Barniz de roca

El barniz de roca es una capa milimétrica $20 \mu\text{m}$ ($2 - 500 \mu\text{m}$), que aumenta su grosor algunos micrómetros por milenio (Liu y Broecker, 2000). Se presenta en superficies subaéreas expuestas de la roca y consiste principalmente en óxidos de manganeso y de hierro, así como minerales de arcilla (Engel & Sharp, 1958). Aunque se encuentra en virtualmente todos los ambientes terrestres, se desarrolla y se preserva mejor posible en las zonas áridas y semiáridas del mundo. Una explicación para la formación de esta característica involucra el intemperismo, la precipitación y la evaporación, ya que se desarrolla en algunas rocas como resultado de la acción de agua (proveniente de la lluvia) sobre algunos minerales, y debido a su consiguiente evaporación precipita en los óxidos antes mencionados, y apareciendo como una película fina a través de la superficie de la roca.

Aunque también se plantea que son partículas de arcilla que pueden ser transportadas por los vientos y se adhieren a las superficies de la roca formando parte del barniz. Los microbios pueden también desempeñar un papel importante en su producción debido a sus procesos biológicos. El material orgánico encontrado como componente del barniz de la roca consiste en restos de líquenes, hollín, restos de hongos, cianobacterias, algas endolíticas, polen y otros restos orgánicos no identificados. La datación del barniz por radiocarbono, requiere la extracción de una muestra de este material orgánico, lo cual frecuentemente causa problemas, sobre todo por la falta de entrenamiento para la detección de la muestra adecuada (Dorn, 1996); un pretratamiento de los materiales orgánicos extraídos y después, la datación por radiocarbono (Potter & Rossman, 1977; 1979).

La presencia del barniz de la roca y/o de las características del barniz ha demostrado tener valor porque contienen información climática. Por ejemplo, las diferencias en el color y abundancia de los componentes del barniz se han utilizado para asignar condiciones de humedad correlacionadas a los depósitos. El barniz anaranjado (rico en manganeso) es el resultado de la acumulación de los óxidos de manganeso durante períodos más húmedos, mientras que el negro (pobre en manganeso) es acompañado por un aumento de silicio, que refleja cantidades más altas de detritus durante períodos secos. (Liu & Dorn, 1996).

Se han encontrado otras señales paleoambientales en el barniz de la roca que se puede utilizar para indicar tiempo relativo, como variaciones en micromorfología, isótopos estables del carbón, plomo, y otros indicadores dependientes del ambiente (Dorn, 1996). Sin embargo, debido a que las capas del barniz pueden tomar desde 1,000 hasta 10,000 años para crecer en un clima árido, la limitación principal de esta técnica es que no es muy útil en fechar cualquier cosa más allá de esas fechas; sin embargo, tiene gran valor en su capacidad de proporcionar una verificación más precisa para fechas más antiguas que las proporcionadas por el fechado de radiocarbono (Liu & Dorn, 1996).

Loess o polvo

Son depósitos eólicos no consolidados de limos y polvo que no emigran. A menudo se encuentran enterrados en el relieve preexistente cuyos espesores van desde pocos centímetros hasta los 10 metros. Originalmente estas partículas se formaron en antiguos pantanos cuando las condiciones climáticas del lugar fueron afectadas por procesos de glaciación. Posteriormente quedaron ubicadas en zonas desérticas ya que el ambiente eólico es muy importante en estos lugares. El polvo más fino de los desiertos, puede ser elevado miles de metros de altura y transportado centenares de kilómetros, de tal manera que si éste sale del desierto puede formar un *loess*, suelo agrícola muy fértil por no haber estado sometido a un deslavado de bases. Cubren aproximadamente un 10 % de la superficie terrestre actual, especialmente en zonas áridas, semiáridas que, no poseen estratificación y tienen un grado de cohesión importante; no obstante, son fácilmente erosionables. Sus constituyentes principales son fragmentos angulosos de cuarzo, feldespatos, mica y calcita. Los depósitos de *loess* más importantes se encuentran en China (donde alcanzan hasta 60 m de espesor), en Estados Unidos, Sudán y en Argentina (Bradley, 1999).

Los depósitos eólicos existentes en el mundo se investigan por su utilidad en los análisis de señales climáticas, en donde se ha podido establecerse un archivo paleoclimático detallado del último ciclo glacial-interglacial, ya que la secuencia de *loess*-paleosuelos, indica alternancias de períodos secos y húmedos (Frechen, 1999). También los cambios en el tamaño de las partículas se han utilizado como medidas de variaciones en la fuerza del viento a través del tiempo. En algunos trabajos, las unidades sedimentarias con tamaño de partícula relativamente gruesas fueron atribuidas a períodos fríos y secos y el aumento de *loess* se asume que coincide con los períodos glaciales del Pleistoceno del Hemisferio Norte, las unidades más finas del tamaño de grano son

interpretadas como condiciones más calientes y húmedas incluyendo los interglaciales y los interestadiales del Pleistoceno (Liu, 1994).

Las características minerales y geoquímicas se han utilizado para indicar estados de intemperismo de los loess y deducir cambios climáticos. Por ejemplo, el contenido de CaCO_3 y los cocientes de $\text{Fe}_2\text{O}/\text{FeO}_3$ fluctúan con la secuencia del loess-paleosuelos y coinciden con las curvas del tamaño de partícula (Liu *et al.*, 1990). Se ha intentado deducir cambios climáticos por medio de la composición isotópica estable del carbonato de calcio del suelo y del carbón orgánico, así como se han usado los valores del isótopo de oxígeno estable como proxy de paleotemperaturas (Muhs *et al.*, 2003). Los loess son sensibles al equilibrio de la humedad, a la estabilidad de la tierra-superficie y al grado total de la cubierta de la vegetación. Además, son expedientes directos de los últimos patrones atmosféricos de la circulación. Sin embargo, presentan el inconveniente de ser difíciles de fechar y por lo tanto es difícil determinar el tiempo exacto en que ocurrieron eventos de aridez o humedad (Harrison *et al.*, 2003).

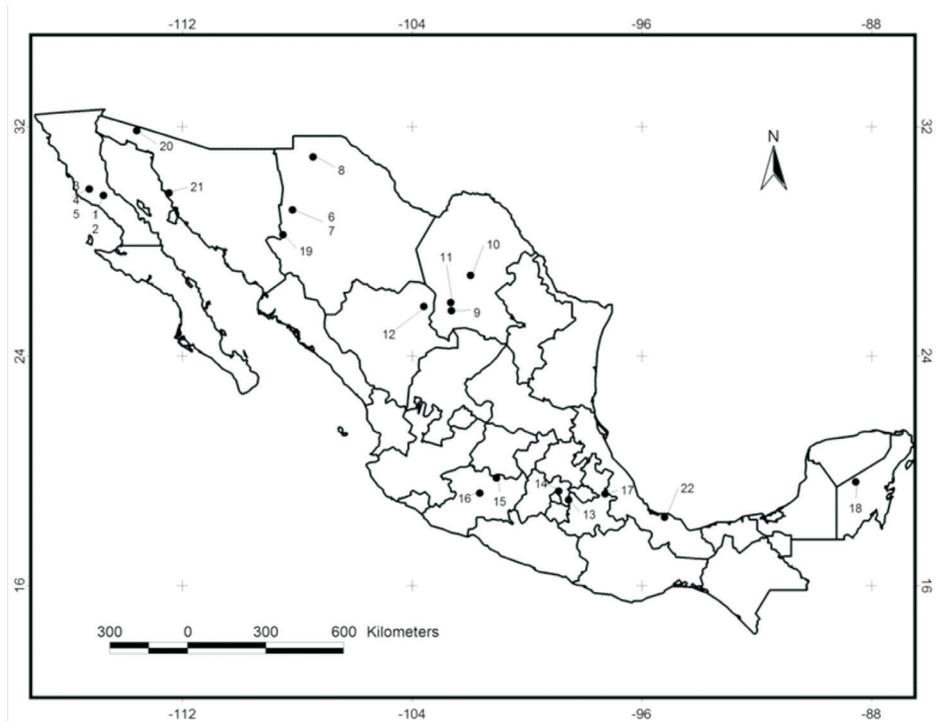
Trabajos paleoclimáticos en México

Gracias a este tipo de evidencias paleoclimáticas entre otras muchas, se ha identificado que durante los últimos

400,000 años el clima de la Tierra ha oscilado entre etapas frías, conocidas como glaciales, durante las cuales la temperatura fue unos 8°C más baja que la temperatura media actual, y etapas similares a la actual, conocidas como interglaciales, en la cual la temperatura del planeta fue hasta unos $2\text{-}3^\circ\text{C}$ por arriba de la moderna (Caballero *et sequia.*, 2007).

El caso de México es importante ya que es una región de interés para la investigación en el ámbito paleoclimático y paleoambiental, pues sus características fisiográficas y localización geográfica lo sitúan en la frontera entre los climas templados y tropicales. Así mismo, es notable por la presencia de abundantes cuencas lacustres, sistemas que, pueden registrar variaciones en el ambiente regional y tendencias de cambio climático a escala global (Street-Perrot y Roberts 1983). Además, debido a la relativa alta velocidad de sedimentación y a una limitada bioturbación, los sedimentos lacustres pueden proveer registros estratigráficos continuos de considerable resolución. No obstante en las zonas tropicales como México, hay pocos estudios paleoecológicos comparados con los de zonas de altas latitudes. Sin embargo, se han realizado diversos estudios utilizando distintos proxies para realizar la reconstrucción paleoclimática de México (Cuadro 1, Fig. 5)

Figura 5.- Los puntos negros sitúan algunos de los lugares en los que se han realizado estudios paleoclimatológicos en México. 1 y 2 Cataviña, Baja California; 3 y 4 Laguna Seca de San Felipe, Baja California; 5 Misión San Fernando Velicata, Baja California; 6 y 7 Laguna Babícora, Chihuahua; 8 Playa El Fresnal, Chihuahua; 9 Cañón La Fragua Coahuila; 10 Cuatro Ciénegas, Coahuila; 11 Puerto Ventanillas, Coahuila; 12 Sierra Misericordia, Durango; 13 Iztacíhuatl, Edo. de México; 14 Texcoco, Edo. de México; 15 Lago de Cuitzeo, Michoacán; 16 Lago de Zirahuén, Michoacán; 17 Alchichica, Puebla; 18, Lago Chichancanab, Quintana Roo; 19 Ciénega las Tunas, Sonora; 20 Montañas Hornoday, Sonora. Los tipos de proxies utilizados y los autores vienen referidos en el Cuadro 1.



Cuadro 1.- Algunos estudios de reconstrucción paleoclimática realizados en nuestro país utilizando distintos proxies.

ID	LOCALIDAD	ESTADO	PROXIE	AUTOR
1	Cataviña	Baja California	Nido de Neotoma	Peñalba y Van Devender, 1997
2	Cataviña	Baja California	Nido de Neotoma	Van Devender, 1990
3	Laguna Seca de San Felipe	Baja California	Polen	Lozano-García et al. 2002
4	Laguna Seca de San Felipe	Baja California	Polen	Ortega-Guerrero et al. 1999
5	Misión San Fernando Velicata	Baja California	Nido de Neotoma	Van Devender, 1997
6	Babícora	Chihuahua	Diatomeas, geoquímica	Metcalfe et al. 1997
7	Babícora	Chihuahua	Sedimentos, Polen, diatomeas	Metcalfe et al. 2002
8	Playa El Fresnal	Chihuahua	Propiedades magnéticas y sedimentología	Ortega-Ramírez et al. 2001
9	Cañon La Fragua	Coahuila	Nido de neotoma	Van Devender, 1990a
10	Cuatro Ciénegas	Coahuila	Polen	Meyer, 1973
11	Puerto Ventanillas	Coahuila	Nido de Neotoma	Van Devender y Burgess, 1985
12	Sierra Misericordia	Durango	Nido de Neotoma	Van Devender y Burgess, 1985
13	Iztaccíhuatl	Edo. México	Polen	Lozano-García & Vázquez Selem, 2005
14	Texcoco	Edo. México	Ostrácodos	Carreño, 1990
15	Lago de Cuitzeo	Michoacán	Diatomeas	Israde et al. 1999, 2001
16	Lago de Zirahuén	Michoacán	Diatomeas	Davies et al., 2004
17	Alchichica	Puebla	Diatomeas	Caballero et al., 2003
18	Lago Chichancanab	Quintana Roo	Ostrácodos	Hodell et al., 2001
19	Ciénega las Tunas	Sonora	Polen	Ortega-Rosas et al., 2008
20	Montañas Hornoday	Sonora	Nido de Neotoma	Van Devender et al. 1990
21	Sierra Bacha	Sonora	Polen	Anderson y Van Devender, 1995
22	Lago Verde, Los Tuxtlas	Veracruz	Polen, diatomeas	Lozano et al., 2007, 2010

Cabe mencionar que durante las últimas décadas se han dado en México gran número de inferencias climáticas a partir del uso de distintos *proxies*. Dentro de los trabajos más relevantes, se tienen los realizados en el sureste de México, específicamente en la Península de Yucatán, siendo los más representativos los realizados por Hodell *et al.* (2001, 2005a, 2005b) donde a través de análisis estratigráficos, de densidad de sedimento, análisis de series temporales y análisis isotópicos en valvas de ostrácodos y gastrópodos logran detectar etapas relevantes en la historia climática de la Tierra, como lo es la Pequeña Edad de Hielo y los principales periodos de sequía registrados alrededor del año 1000 AD en varias regiones geográficas, relacionándolo específicamente con el colapso de la cultura Maya. Un poco más al oeste, en Veracruz, Lozano-García *et al.* (2007, 2010) a partir del análisis palinológico de un núcleo de sedimentos lacustres encuentran evidencias de cambios ambientales y también de impacto humano en la selva baja perenifolia de Los Tuxtlas durante los últimos 2,800 años, además en la secuencia lacustre del Lago Verde en la misma región, por medio del análisis de susceptibilidad magnética (Ortega *et al.* 2006), carbón orgánico total, contenido de polen, partículas de carbón (Lozano *et al.*, 2010) y diatomeas (Caballero *et al.*, 2006) se documentó el impacto humano y su efecto en el ambiente, así como, las condiciones climáticas en la que se desarrollaron. También en la parte oriental del centro de México se realizaron análisis de susceptibilidad magnética, diatomeas, ostrácodos y geoquímica en sedimentos del lago La Preciosa (Juárez 2005, Rodríguez 2002) y lago Alchichica (Caballero *et al.* 2003), en Puebla, donde se muestra la tendencia hacia condiciones más someras en el litoral, aumento en la salinidad y mayor erosión, todo ello consistente con una tendencia reciente a un incremento en la aridez, al menos durante los últimos ca. 100 a 150 años. En la parte central de México se puede mencionar el trabajo de Carreño (1990) en el que realiza un estudio de ostrácodos del paleolago Texcoco registrando abundancias relativas y asociaciones que le permite inferir que en la base del núcleo existía un ambiente de agua dulce y profunda característico de condiciones climatológicas lluviosas y frías, al parecer relacionadas con el final del glacial Illinoniano tardío (hace 130,000 años); más reciente no registra fósiles, por lo que considera se trata de un periodo interglacial, tal vez en el Sangamoniana; después del Winsconsiniano (100,000 años). Otros trabajos más relevantes son los llevados a cabo en la cuenca alta de Lerma (Caballero *et al.*, 2001, 2002, Lozano-García *et al.*, 2005) donde mediante el análisis de diatomeas, polen, propiedades magnéticas, estratigrafía, carbono orgánico e inorgánico registran cambios en los niveles lacustres de la zona,

cambios en la vegetación a lo largo de los últimos 23,000 años, aparentemente relacionados con cambios en las condiciones de humedad y cambios fisiográficos asociados a la actividad volcánica de la zona. También en la parte central del país, el análisis de polen en una secuencia sedimentaria del volcán Iztaccíhuatl, combinado con análisis de cronología glacial y de tefras (Lozano-García & Vázquez-Selem 2005), sugiere que la línea arbórea ha fluctuado en altitud en respuesta a cambios de temperatura y altitud durante los últimos 12,000 años. En la parte occidental del país tenemos el trabajo de Bradbury (2000) donde compara análisis palinológicos, geoquímicos y diatomológicos en sedimentos del lago de Pátzcuaro en Michoacán, con el fin de registrar los impactos climáticos y antropogénicos durante los últimos 48,000 años. En este estudio se concluye que después de los 13,000 AP (antes del presente) las condiciones del lago se vuelven más someras y eutróficas, indicando un régimen climático con un balance hidrológico negativo, con mayor estacionalidad anual y con humedad en el verano, así como una fuerte influencia antropogénica después de los ca. 4,000 años AP. También en Michoacán, Ortega *et al.* (2002) realizan análisis de minerales magnéticos y carbono orgánico total para inferir fluctuaciones de humedad y sequía durante los últimos 52,000 años, así mismo, en el mismo lago Leng *et al.* (2005) realizan análisis isotópico de carbono y oxígeno para detectar fluctuaciones en los niveles lacustres de esta laguna durante los últimos 3,000 años. Por otra parte, en el Lago Zirahuén, también en Michoacán, Davis, *et al.* (2004) a través de análisis de diatomeas, susceptibilidad magnética y metales pesados detectan una etapa de sequía alrededor de los 1000 años y posteriores etapas de impacto humano en la zona hasta tiempos recientes. Ortega *et al.* (2010) obtienen un registro mucho más completo de este lago, abarcando los últimos 17,000 años en los cuales mediante análisis de propiedades magnéticas, diatomeas, fluorescencia de rayos X y contenido de carbón, registran fluctuaciones en la disponibilidad de humedad para esta zona del occidente mexicano. En el lago de Cuitzeo existe registro (Israde *et al.*, 1999, 2001) desde los 120,000 años AP, detectando diversas fluctuaciones en el nivel y química lacustre mediante análisis de magnetismo de rocas, química de sedimentos y diatomeas. En Santa María del Oro, Nayarit se analizó mediante mineralogía magnética, carbono orgánico e inorgánico total y abundancia elemental una secuencia sedimentaria correspondiente a los últimos 2,600 años (Vázquez *et al.*, 2008). Se pudo registrar variaciones en los ciclos de disolución y precipitación de minerales magnéticos por variaciones en las condiciones anóxicas-óxicas en los sedimentos durante épocas cálidas y secas.

Para la parte norte del país existen los trabajos de Peñalba y Van Devender (1997) donde a partir de polen extraído de nidos de *Neotoma* reconstruyen el clima y la vegetación del ahora desierto de Sonora durante el Holoceno temprano (entre los 11,000 a 8,900 AP). Posteriormente McAuliffe y Van Devender (1998) extienden el rango temporal de la reconstrucción para esta misma área hasta los últimos 22,000 años. Lozano-García *et al.* (2002) realizan un análisis polínico en una secuencia al norte del desierto de Sonora, la Laguna San Felipe, obteniendo un registro entre los 44,000 y los 13,000 años AP, encontrando diferencias y alternancia en sus abundancia entre las comunidades vegetales a lo largo del registro. En la Laguna de Babícora en Chihuahua, Palacios-Fest *et al* (2002) estudian la paleoecología de ostrácodos presentes en una secuencia sedimentaria y desarrollan un índice de paleosalinidad a partir de las asociaciones de ostrácodos que encuentra, infiriendo que el lago ha estado fluctuando entre condiciones oligo y mesohalinas durante los últimos 25,000 años, infiriendo con ello, etapas de mayor y menor disponibilidad de humedad en la zona.

Conclusiones

Tomando en cuenta el análisis de distintos componentes bióticos y abióticos (en un enfoque multidisciplinario), es probable detectar las variaciones climáticas de la Tierra a través del tiempo e inferir con mayor precisión los factores que las propiciaron. Por ejemplo, cambios climáticos de corto alcance temporal que incidan en cambio o establecimiento de la vegetación circundante y/o que puedan afectar el régimen de mezcla-estratificación de la columna de agua, los cuales pueden quedar registrados en los sedimentos depositados en el fondo de un lago, conservando potencialmente una evidencia de las fluctuaciones ambientales a corto plazo. Es importante el estudio del cambio climático a través de la historia del planeta para comprender el efecto que ha tenido ese fenómeno global en la biodiversidad, sobre todo porque en la actualidad se percibe de manera clara un calentamiento del planeta. Se requieren datos que abarquen largos periodos de tiempo para calibrar los modelos de cambio climático futuro, con el fin de establecer los efectos que se podrían esperar.

Literatura citada

- Alverson, K. D., Bradley R. S. & T. F. Pedersen. 2003.** Paleoclimate, Global Change and the Future. Springer Verlag, Germany, 221 pp.
- Anadon P., Li. Cabrera & K. Kelts. 1991.** Lacustrine facies analysis. Special publication number 13 of the International Association of Sedimentologists. Blackweel Scientific Publications. Great Britain. 318 pp.
- Anderson, R.S. & T.R. Van Devender. 1995.** Vegetation history and paleoclimates of the coastal lowlands of Sonora, Mexico - pollen records from packrat middens. *J. Arid Env.* 30: 295-306.
- Barron, J.A., 1993.** Diatoms. Fossil Prokaryotes and Protists: Boston. Blackwell Scientific Pubs.
- Betancourt, J. L. & B. Saavedra. 2002.** Paleomadrigueras de roedores, un nuevo método para el estudio del Cuaternario en zonas áridas de Sudamérica. *Rev. Chil. Hist. Nat.* 75: 527-546.
- Betancourt, J. L., Van Devender, T. R. & P. S. Martin. 1990.** Packrat middens. The last 40,000 years of biotic change. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona.
- Bradbury J.P. 1988.** Fossil diatoms and Neogene paleolimnology. *Paleogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology* 62: 299-316.
- Bradbury J.P. 1998.** A book review of: Negendank J.F.W. & B. Zolitschka. 1993. Paleolimnology of european maar lakes. Lecture Notes in Earth Sciences No. 49. Springer-Verlag. Berlin. 513 pp. *Journal of Paleolimnology* 19: 481-482. Bradbury J.P. 2000. Limnologic history of Lake Patzcuaro, Michoacan, Mexico for the past 48 000 años: impacts of climate and man. *Paleogeography, paleoclimatology, palaeoecology* 162: 69-95.
- Bradley, R. 1999.** Paleoclimatic reconstruction. Pp. 397-438 In *Paleoclimatology: Reconstructing climates of the Quaternary*. Academic Press, San Diego
- Caballero Miranda, M. 1997.** The Last Glacial Maximum in the Basin of Mexico: The diatom record between 34,000 and 15,000 years from lake Chalco. *Quaternary International* 43/44: 125-136.
- Caballero, M., Lozano, S. & B. Ortega. 2007.** Efecto invernal, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la Tierra. *Revista Digital Universitaria* 8:1-12.
- Caballero, M.M., J.L. Macías, S. Lozano, J. Urrutia-Fucugauchi and R. Castañeda-Bernal. 2001.** Late Pleistocene-Holocene volcanic stratigraphy and palaeoenvironments of the upper Lerma basin, Mexico. *Special Publications of the International Association of Sedimentologists*, 30 247 – 261.
- Caballero M., Ortega B, Valdez F, Metcalfe S, Macias J.L. & Y. Sugiura. 2002.** Sta. Cruz Atizapán: a 22-Ka lake level record and climatic implications for the late Holocene human occupation in the Upper Lerma Basin, Central Mexico. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 186: 217-235.
- Caballero M., Vazquez G., Lozano S., Rodriguez A., Sosa S., Ruiz A.C., & Ortega B. 2006.** Present limnological conditions and recent (ca. 340 yr) paleolimnology of a tropical lake in the Sierra de los Tuxtlas, Eastern Mexico. *Journal of Paleolimnology* 35:83-97.
- Caballero, M., Vilaclara, G., Rodríguez, A. & D. Juárez. 2003.** Short-term climatic change in lake sediments from lake Alchichica, oriental, Mexico. *Geofísica Internacional* 42:529-537.
- Carreño, A.L. 1990.** Ostrácodos lacustres del paleolago de Texcoco. *Rev. Soc. Mex. Paleont.* 3: 117-135.
- Challenger, A. 1998.** Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México: pasado, presente y futuro. Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad, Instituto de Biología de la UNAM y Agrupación Sierra Madre S.C., México
- Davis, O.K. 1990.** Paleoenvironments of Arid Regions. *Palaeo. Palaeo. Palaeo.* 76:331-348.
- Davies, S. J., Metcalfe, S. E., Mackenzie, A. B., Newton, A. J., Endfield, G. H. & Farmer, J. G., 2004.** Environmental changes in the Zirahuen Basin, Michoacan, Mexico, during the last 1000 years. *Journal of Paleolimnology*, 31: 77-98.
- Dorn, R.I. 1996.** Climatic Hypotheses of Alluvial-fan Evolution in Death Valley are Not Testable, in *The Scientific Nature of Geomorphology*, edited by B.L. Rhoads and C.E. Thorn, John Wiley and Sons Ltd.
- Engel, C.E. & R.P. Sharp. 1958.** Chemical data on desert varnish, *Bulletin of the Geological Society of America* 69: 487-518
- Follieri, M., D. Magri & L. Sadori. 1988.** 250,000-year pollen record from Valle di Castiglione (Roma). *Pollen Spores*, 3: 329-356.
- Frechen, M. 1999.** Upper Pleistocene loess stratigraphy in Southern Germany.- *Quaternary Geochronology*, 18: 243-269.
- Gall, J. C. 1983.** Ancient sedimentary environments and the habitats of living organisms: Introduction to palaeoecology. Springer-Verlag. Germany. 219 pp.

- Harrison, S. P.; Kutzbach, J. E.; Liu, Z.; Bartlein, P. J.; Otto-Bliesner, B.; Muhs, D.; Prentice, I. C. & R. S. Thompson. 2003. Mid-Holocene climates of the Americas: a dynamical response to changed seasonality. *Climate Dynamics* 20: 663-688.
- Hodell, D. A., Brenner, M., Curtis J. H. & Guilderson, T. 2001. Solar forcing of drought frequency in the Maya lowlands. *Science* 292:1367-1370.
- Hodell, D. A., Brenner, M. & Curtis, J. H. 2005a. Terminal Classic drought in the northern Maya lowlands inferred from multiple sediment cores in Lake Chichancanab (Mexico). *Quaternary Science Review* 24:1413-1427.
- Hodell, D. A., Brenner, M., Curtis, J. H., Medina-González, R., Ildelfonso-Chan Can E, Albornaz-Pat A & Guilderson T. P. 2005b. Climate change on the Yucatan Peninsula during the Little Ice Age. *Quaternary Research* 63:109-121.
- Hodell, D. A., Curtis, J. H. & Brenner, M. 1995. Possible role of climate in the collapse of Classic Maya civilization: *Nature* 375: 391-394.
- IPCC, Grupo Intergubernamental De Expertos Sobre El Cambio Climático. 2001. Cambio climático: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. World Meteorological Organization and United Nations Environment Programme.
- Israde A.I. & H. Garduño. 1999. Lacustrine record in a volcanic intra-arc setting: the evolution of the Late Neogene Cuitzeo basin system (central-western México, Michoacán). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 151: 209-227.
- Israde A.I., Garduño M.V.H. & Ortega R. 2001. El Paleambiente lacustre del cuaternario Tardío en el centro del lago de Cuitzeo. *Hidrobiológicas*. 12: 61-78.
- Jáuregui, E. 1979. Algunos aspectos de las fluctuaciones pluviométricas en México, en los últimos 100 años. *Boletín del Instituto de Geografía* 9: 39-64.
- Jáuregui, E. 2004. La variabilidad climática en los registros instrumentales de México. Pp: 279- 289 In: J. Martínez & A. Fernández Bremauntz (eds.) Cambio climático: una visión desde México. SEMARNAT/INE, México, D. F.
- Juárez B.D. 2005. *Registro de cambios paleoambientales en sedimentos del lago "La Preciosa", Puebla, con base en el estudio de ostrácodos*. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología.
- Kurenkov I.I. 1966. The influence of volcanic ashfall on biological processes in a lake. *Limnol. Oceanogr.* 11(3): 426-429.
- Leng M.J., Metcalfe S.E. & S. Davis. 2005. Investigating Late Holocene Climate Variability in Central Mexico using Carbon Isotope Ratios in Organic Materials and Oxygen Isotope Ratios from Diatom Silica within Lacustrine Sediments. *Journal of Paleolimnology*, 34(4), 413-431.
- Lister, G. S. 1988: A 15 000-year isotopic record from Lake Zürich of deglaciation and climatic change in Switzerland. *Quaternary Research* 29, 129-141.
- Liu, T., 1994. Visual microlaminations in rock varnish: a new paleoenvironmental and geomorphic tool in drylands. Ph.D. 1995. thesis, Tempe, Arizona State University, 173 pp.
- Liu, T. & R. I. Dorn. 1996. Understanding the spatial variability of environmental change in drylands with rock varnish microlaminations. *Annals of the Association of American Geographers* 86: 187-212
- Liu, T. & W. S. Broecker. 2000. How fast does rock varnish grow? *Geology* 28: 183-186.
- Liu, X.M., Liu, T.S., Heller, F. & T.C. Xu. 1990. Frequency dependent susceptibility of loess and Quaternary paleoclimate. *Quaternary Sciences*, 2: 41-50.
- Lorenzo J.L. & L. Mirambell. 1986. *Tlacacoya, 35,000 años de historia del lago de Chalco*. INAH, Mexico City.
- Lozano-García, M. S. 1996. La vegetación del Cuaternario Tardío en el centro de México: registros palinológicos e implicaciones paleoclimáticas. *Bol. Soc. Bot. México* 58: 113-127.
- Lozano-García, M. S. 2004. Evidencias del cambio climático: cambios en el paisaje. Pp: 65- 76 In: J. Martínez & A. Fernández Bremauntz (eds.) Cambio climático: una visión desde México. SEMARNAT/INE, México, D. F.
- Lozano-García, M. S. & L. Vázquez-Selem. 2005. A high elevation Holocene pollen record from Iztaccíhuatl volcano, central Mexico. *The Holocene*, 15: 329-338. Lozano-García, M. S., Sosa-Nájera, S & B. Ortega-Guerrero. 2002. Mid to Late Wisconsin Pollen Record of San Felipe Basin, Baja California. *Quat. Res.* 58: 84-92
- Lozano-García, M. S., Sosa-Nájera, S, Sugiura Y. & M. Caballero. 2005. 23,000 yr of vegetation history of the Upper Lerma, a tropical high-altitude basin in Central Mexico. *Quat. Res.* 64: 70-82
- Lozano-García, M. S., Caballero, M., Ortega, Rodríguez, A. & S. Sosa. 2007. Tracing the effects of the Little Ice Age in the tropical lowlands of eastern Mesoamerica. *PNAS* 104:16200-16203.
- Lozano-García, M. S., Caballero, M., Ortega, Rodríguez, A. Sosa, S. & Peter Schaaf. 2010. Late Holocene palaeoecology of Lago Verde: evidence of human impact and climate change in the northern limit of the neotropics during the late formative and classic periods. *Vegetation History and Archaeobotany* 19: 177-190.

- Lowe, J. J. & Walker, M. J. C. 1997.** Temperature variations in NW Europe during the last glacial–interglacial transition (14–914C ka BP) based upon the analysis of coleopteran assemblages – the contribution of Professor G. R. Coope. *Quaternary Proceedings* 5: 165–175.
- Margalef, R. 1957.** Los microfósiles del lago Miocénico de la Cerdaña como indicadores ecológicos. *Cursillos y Conferencias del Ito. "Lucas Mallada"*, fasc. 4: 13-17.
- McAuliffe J.R. & T.R. Van Devender. 1998.** A 22,000 year record of vegetation change in the north-central Sonoran Desert. *Palaeogeography, Palaeoclimatology and Palaeoecology* 141:253-275.
- Metcalfe, S.E., Courtice, A., Bempson, A., O'Hara, S. L. & D. Taylor. 1997.** Climate change at the monsoon/westerly boundary in Northern Mexico, *J. Paleolimnology*, 6:155-171.
- Metcalfe, S.E., O'Hara, S.L., Caballero, M. & S.J. Davies 2000.** Records of late Pleistocene-Holocene climatic change in Mexico- a review. *Quat. Sci. Rev.* 19:699-721.
- Metcalfe, S. E., Say, A., Black, S., McCulloch, R. & S. O Hara. 2002.** Wet conditions during the last glaciation in the Chihuahuan desert, Alta Babicora Basin, Mexico. *Quaternary Research*, 57: 91-101.
- Meyer, E.R. 1973.** Late Quaternary paleoecology of the Cuatro Ciénegas basin, Coahuila, Mexico. *Ecology* 54: 982-995.
- Muhs, D. R., Thomas A., Been, A. J., Bradbury, J. P y W. E. Deanc. 2003.** A late Quaternary record of eolian silt deposition in a mar lake, St. Michael Island, western Alaska. *Quat. Res.* 60: 110–122.
- Ortega G.B. 1992.** *Paleomagnetismo, magnetoestratigrafía y paleoecología del Cuaternario en el lago de Chalco, Cuenca de México.* Tesis de Doctorado. Instituto de Geofísica, UNAM. 161 pp.
- Ortega B., Caballero C., Lozano-García, M. S., Israde I. & G. Vilaclara. 2002.** 52000 years of environmental history in Zacapu basin, Michoacan, Mexico: the magnetic record. *Earth and Planetary Science Letters.* Vol. 202:663-675
- Ortega Guerrero, B., Caballero Miranda, M., Lozano García, M. S. & M. De la O Villanueva, M. 1999.** Palaeoenvironmental record of the last 70 000 yr in San Felipe basin, Sonora Desert, Mexico. *Geof. Intern.* 38 3:153-163.
- Ortega B., Caballero M., Lozano S., Vilaclara G., Rodríguez A. 2006.** Rock Magnetic and Geochemical Proxies for Iron Mineral Diagenesis in a Tropical Lake: Lago Verde, Los Tuxtlas, East-Central Mexico. *Earth and Planetary Sciences Letters* 250:444-45
- Ortega B, Vázquez G., Caballero M., Israde I., Lozano-García S., Schaaf P. & E. Torres. 2010** Late Pleistocene: Holocene record of environmental changes in Lake Zirahuen, Central Mexico. *Journal of Paleolimnology* 44: 745-760.
- Ortega Ramírez, J. R., Valiente Banuet, A., Urrutia Fucugauchi, J., Mortera Gutiérrez, C. A. & G. Alvarado Valdéz. 1998.** Paleomagnetic changes during the Late Pleistocene – Holocene in Laguna Babicora, near the Chihuahuan Desert, México. *Canadian Journal of Earth Science* 35: 168-117.
- Ortega-Ramírez, J. R., Urrutia- Fucugauchi, J., Valiente-Banuet, A., Bandy, W., & R. Martínez-Serrano. 2001.** Tectonic and climate change controls in Late Quaternary alluvial-fan development in the Playa El Fresnal region, north Chihuahuan Desert, Mexico. *Journal of Arid Lands Studies* 11:143- 158.
- Ortega-Rosas, C. I., Peñalba, M. C. & J. Guiot. 2008.** Holocene altitudinal shifts in vegetation belts and environmental changes in the Sierra Madre Occidental, Northwestern Mexico, based on modern and fossil pollen data. *Review of Palaeobotany and Palynology* 151: 1-20.
- Palacios-Fest M.R., A.L. Carreño, J.R. Ortega-Ramírez and G. Alvarado-Valdéz. 2002.** A paleoenvironmental reconstruction of Laguna Babicora, Chihuahua, México based on ostracode paleoecology and trace elements shell chemistry. *Journal of Paleolimnology* 27: 185-206.
- Peñalba, M. C. & T. R. Van Devender. 1997.** Pollen analysis of Late Wisconsin and Holocene packrat (*Neotoma*) middens from San Fernando and Cataviña, Baja California, Mexico. *Second Annual Baja California Botanical Symposium, San Diego Natural History Museum y Universidad Autónoma de Baja California Facultad de Ciencias, Herbario BCMEX*
- Potter R.S. & G. R. Rossman. 1977.** Desert varnish: The importance of clay minerals. *Science* 196: 1446-1448.
- Potter R. S. & G. R. Rossman GR. 1979.** The mineralogy of manganese dendrites and coatings. *American Mineralogist* 64: 1219-1226
- Rodríguez Ramírez, A. 2002.** Aspectos paleolimnológicos de la historia reciente del lago La preciosa, Puebla. Tesis Maestría (Maestría en Ciencias del Mar y Limnología)-UNAM, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología.
- Sandgren P. & I. Snowball. 2001.** Applications of mineral magnetic techniques to paleolimnology. p. 217-237. *In: Last D.W. & J.P. Smol (Eds.). Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Vol. 2: Physical and geochemical methods.* Kluwer Academic Publishers. Netherlands. 504 pp.
- Smol J.P. 1992.** Paleolimnology: an important tool for effective ecosystem management. *Journal of Aquatic Ecosystem Health* 1: 49-58.
- Smol J.P., B.F. Cumming, M.S.V. Douglas & R. Pienitz. 1995.** Inferring Past Climatic Changes in Canada using Paleolimnological Techniques. *Geoscience* 21: 113-118.

Stoermer F.E., M.B. Edlund, C.H. Pilskaln & C.L. Schelske. 1995. Siliceous microfossil distribution in the surficial sediments of Lake Baikal. *Journal of Paleolimnology* 14: 69-82.

Street-Perrot F.A. and N. Roberts. 1983. Fluctuations in closed-basin lakes as an indicator of past atmospheric circulation patterns. In: Street-Perrot F.A., M.A. Beran and R.A.S. Ratcliffe (Eds.). *Variations in the global water budget*. Reidel Publishing Co., Hingham.

Sugiura Y. 2000. Cultura lacustre y sociedad del valle de Toluca. *Arqueol. Mex.* VIII, 32-37.

Thompson R., R.W. Battarbee, P.E. O'Sullivan and F. Oldfield. 1975. Magnetic susceptibility of lake sediments. *Limnology and Oceanography* 20(5): 687-698. Urrutia-Fucugauchi, Ortega-Ramírez J. & R. Cruz-Gatica. 1997. Rock-magnetic study of Late Pleistocene-Holocene sediments from the Babicora lacustrine basin, Chihuahua, northern Mexico. *Geofísica Internacional* página electrónica <http://www.unam.mx/servhem/revistas/fisica/1997/02/ortega.html>

Van Devender, T.R., 1990. Late quaternary vegetation and climate of the Sonoran Desert, United States and Mexico. Pp:135-165 In: J. L. Betancourt, T. R. Van Devender & P. S. Martin, . (eds.), *Packrat middens: The Last 40,000 Years of Biotic Change*. University of Arizona Press.

Van Devender, T. R., & G. L. Bradley. 1990. Late Quaternary mammals from the Chihuahuan Desert: paleoecology and latitudinal gradients. Pp. 350-362 In J. L. Betancourt, T. R. Van Devender, & P. S. Martin (eds.), *Packrat middens. The Last 40,000 Years of Biotic Change*, University of Arizona Press, Tucson.

Van Devender, T. R. & T. L. Burgess. 1985. Late Pleistocene woodlands in the Bolson de Mapimi; a refugium for the Chihuahuan Desert biota? *Quaternary Reserch.*24: 346-353.

Vázquez G., Ortega B., Rodríguez A., Caballero M. 2008. Mineralogía magnética como indicador de sequía en los sedimentos lacustres de los últimos ca. 2,600. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas.* 25(1):21-38.

Werner D. (Eds.). 1977. The biology of diatoms. Botanical Monographs Vol.13. Univ. of California Press. Berkeley-Blackwell Sc. Publ. 498 pp.

Wetzel R.G. 198. *Limnología*. Omega. Barcelona. 679 pp.

Zolitschka, B. & J.F.W. Negendank. 1996. Sedimentology, dating and palaeoclimatic interpretation of a 76.3 kyr record from Lago Grande di Monticchio, southern Italy. - *Quaternary Sience Reviews*, 15: 101-112.

Capítulo II

Desarrollo de coberturas digitales climáticas para México

Oswaldo Téllez, Michael A. Hutchinson, Henry A. Nix y Peter Jones

Resumen. Se describe el desarrollo de una base de datos climática digital de promedios mensuales. Los datos climáticos se obtuvieron adecuando las funciones (thin plate smoothing spline) de longitud, latitud en grados y de altitud en kilómetros para los valores puntuales mensuales promedio de las temperaturas máxima y mínima y de la precipitación. Se usó un modelo digital de elevación a una resolución espacial de 1 km². El algoritmo spline interpola estos datos de una forma progresiva suave y no abrupta con base en el incremento o decremento de la elevación. La incorporación de una dependencia continua a través de la variación espacial de la altitud ha sido un factor crítico en la precisión de las superficies. Se interpolaron valores de temperatura promedio mensual en un intervalo de error de 0.43-0.52° C y precipitación promedio mensual en un intervalo de error entre 8.8-13.9%. La mayor incertidumbre ocurrió en el nororiente de México y en la Península de Yucatán, en donde la densidad de estaciones meteorológicas fue menor y dispersa. Las coberturas fueron adecuadas para un proyecto de evaluación de conservación, sin embargo tienen aplicaciones más allá de los objetivos para los cuales fueron generadas. Los datos facilitarán la planificación de la investigación, el diseño experimental y la transferencia de tecnología. Finalmente, no obstante que existe una base de datos semejante a nivel mundial (www.worldclim), las coberturas para el área de México son menos robustas que las descritas ahora. Palabras clave: ANUSPLIN, coberturas digitales, Precipitación, Temperatura máxima promedio, Temperatura mínima promedio.

Palabras clave: ANUSPLIN, Clima; error; SIG; Interpolación temperatura y precipitación.

Abstract

Interpolated climate surfaces for Mexican land areas at a spatial resolution of 30 arc seconds (often referred as 1 km² of spatial resolution) developed. A digital elevation model of 1 km² spatial resolution was employed. Climate elements considered from a net of standard meteorological stations were: monthly precipitation and minimum, and maximum temperature. Input data were gathered from a variety of sources from 1898 to 1995. We used the thin-plate smoothing spline algorithm implemented in the ANUSPLIN package for interpolation,

using latitude, longitude and elevation as independent variables. This algorithm proposes values in a smoother and progressive way. We quantified uncertainty from input data and interpolation by mapping weather station density, elevation bias in weather stations, and elevation variation within grid cells. Interpolation errors were in the order 0.43-0.52° C for temperature and between 8.8-13.9% for precipitation. Uncertainty was highest in northeastern Mexico and in the Peninsula of Yucatan, where density of climate stations was lower and with a very spread distribution. Compared to previous global climatologies, ours has the following advantages: data are at a higher spatial resolution; more weather station records were used; improved elevation data were used. This kind of data sets will support research in a variety of fields from research planning, experimental design to technology transfer. Finally, despite the existence of a climatic data set to world level (www.worldclim), even produced in a similar way, the climatic information for Mexico produced here is more confident than that in the global climatology referred

KEY WORDS: ANUSPLIN; climate; error; GIS; interpolation; temperature; precipitation.

Introducción

Una de las principales preguntas que el hombre ha tratado de responder está relacionada con el papel que el clima juega sobre los organismos vivos. Desde un punto de vista biológico, la respuesta incluye la forma en la cual la variación ambiental puede modelar la variación morfológica, las interacciones bióticas, los patrones biogeográficos y más aún, los eventos evolutivos (Cicero, 2004; Wiens & Graham, 2005, 2006;). Sin embargo, los registros de las diferentes variables ambientales (precipitación, temperatura máxima y mínima, evaporación o radiación solar) u otros eventos climáticos (congelamiento, sequía, niebla) son extremadamente escasos y no confiables. Ya que típicamente se registran aquellos valores relacionados con la temperatura y precipitación, y otros parámetros no son registrados de manera generalizada a través de todo el país, ni mucho menos de forma sistemática.

Recientemente, la cantidad de datos confiables ha alcanzado un punto que permite su uso y análisis con

diferentes propósitos (IMTA, 1996). Asimismo, el desarrollo de métodos para interpolar datos climáticos de redes de estaciones dispersas ha sido el centro de investigación por muchos años desde el siglo pasado (Thiessen, 1911; Shepard, 1968; Hughes, 1982; Hutchinson & Bischof, 1983; Phillips *et al.*, 1992; Daly, 1994). Algunos eventos, incluyendo la evaluación del Segundo Reporte sobre cambio climático del Grupo Intergubernamental de Expertos de expertos sobre Cambio Climático (IPCC) (Houghton *et al.*, 1996) y el protocolo de Kyoto de 1997, han demostrado interés en la interpolación de datos climáticos. Esto es, la generación de datos o valores de clima para sitios donde no han sido registrados a partir de datos de sitios en donde han sido registrados (estaciones meteorológicas). Así, estudios recientes, han permitido la interpolación tridimensional espacial de datos climáticos (Hutchinson, 1987, 1991, 1995a, 1995b, Hutchinson & Gessler, 1994; Price *et al.*, 2000; Sáenz-Romero *et al.*, 2009).

La posibilidad de usar datos ambientales interpolados a una resolución espacial alta, es decir, la cantidad de superficie de la tierra cubierta por un solo pixel (en este caso 1 km²), para áreas en donde la información no está disponible. Esto podría resultar relevante por ejemplo, si se considera que el conocimiento de la distribución de la biodiversidad es aún más incompleto y fragmentario pero está ligado en muchas maneras a las variables ambientales. De acuerdo con lo anterior, el uso de elementos no biológicos, tales como parámetros ambientales, puede ayudar a explicar los patrones biológicos con un alto grado de confiabilidad, aún sin conocer los patrones de distribución de la mayoría de las especies de plantas y animales (Téllez-Valdés & Dávila-Aranda, 2003; Villaseñor & Téllez-Valdés, 2004; Téllez-Valdés *et al.*, 2006, 2007; Lira *et al.*, 2009).

Los resultados de dichos estudios varían en precisión y confiabilidad, principalmente debido a los métodos y datos empleados. Sin embargo, en general, aunque la información biológica sea incompleta y fragmentaria, datos valiosos han sido producidos al combinarlos y analizarlos como parte de un marco ambiental.

Los datos aquí presentados pretenden de forma inicial generar coberturas digitales de alta resolución, robustas y confiables para México. En segundo término y dado que los productos aquí descritos, incluso ya han sido ampliamente usados en ejercicios de modelado del nicho ecológico y otras aplicaciones (Téllez-Valdés & Dávila-Aranda, 2003; Villaseñor & Téllez-Valdés, 2004; Parra-Olea *et al.*, 2005; Téllez *et al.*, 2004, 2006, 2007; Munguía *et al.*, 2008; Lira *et al.*, 2009), se pretende

brindar una referencia adecuada y formal para referir y/o citar esta base de datos climáticos digital, que con toda certeza diversos autores continuarán empleando.

Métodos

Se usó el paquete ANUSPLIN (Hutchinson, 2004) que ajusta las funciones tri-variadas de longitud y latitud en grados, y altitud en kilómetros con el algoritmo *thin plate smoothing spline*. Este algoritmo propone valores de una forma progresiva suave o no abrupta de acuerdo con el incremento o decremento de la elevación en el MDE y con relación a los valores de precipitación y temperatura de las estaciones meteorológicas empleadas y con relación a su distribución. El procedimiento debe incorporar un modelo digital de elevación (MDE), el cual fue tomado del proyecto GTOPO30 generado por el U.S. Geological Survey's EROS data Centre (<http://edcwww.cr.usgs.gov/landdaac/gtopo30>), en el que las altitudes están regularmente espaciadas a 30 segundos arc (0.008333 - ca. 1 km²). El MDE incluye porciones del sur de Estados Unidos, Belice, El Salvador y Honduras, así como de Nicaragua, con el fin de asegurar la precisión de las superficies en áreas limítrofes entre países. Este es un escalamiento relativo de las variables independientes, el cual hace las superficies efectivamente 100 veces más sensibles a la altitud que a la posición horizontal (Hutchinson, 1991, 1995a; Hutchinson *et al.*, 1995, 1996).

El modelo climático se generó aplicando el algoritmo *spline* (Wahba & Wendelberger, 1980; Wahba, 1990), sobre valores promedios mensuales de precipitación total, temperatura máxima promedio y temperatura mínima promedio considerando desde el año 1898 hasta el año 1995. La base de datos original consistió en más de 7400 estaciones meteorológicas estándar limitadas geográficamente al sur de los Estados Unidos, todo México, el norte de Centroamérica hasta Nicaragua y parte del occidente de Cuba. Los datos fueron obtenidos de tres fuentes principales: National Climatic Data Center I (<http://www.ncdc.noaa.gov/ol/ncdc.html>), la Comisión Nacional del Agua en México (www.cna.gob.mx) y el Centro Internacional de Agricultura Tropical Agricultura en Colombia (<http://www.ciat.cgiar.org>).

Los datos fueron recolectados para todos los años de registro posibles para maximizar la cobertura espacial, por lo que todas las estaciones posibles fueron incluidas en el análisis sin importar el número de años de registro (entre 11 meses y más de 100 años). Alrededor del 70% incluyeron registros de más de 10 años (de estas, alrededor del 40% con un intervalo de 20 a 30 años de

registro), menos del 20% incluyeron registros inferiores a los 5 años o menos. Incluso algunas estaciones erróneamente localizadas geográficamente en el Océano fueron usadas, ya que esto ayuda a una mejor adecuación de las superficies por el algoritmo *spline*.

Los datos climáticos estuvieron sujetos a la detección de errores y su corrección. Los puntos o estaciones erróneos fueron detectados examinando la lista de residuos (residuales) o puntos (estaciones) obtenidos a partir del ejercicio de generación de las superficies con el *thin plate spline*, de acuerdo a cómo éstas fueron categorizadas en la lista resultante del paquete ANUSPLIN, que permite identificar errores. Los errores más comunes están relacionados con la referenciación geográfica o la altitud, que se corrigieron usando mapas topográficos a escalas mayores que 1: 50000, que se puede obtener en gaceteros de México publicados por USGS y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (<http://www.conabio.gob.mx>, <http://www.inegi.gob.mx>). Otros son los errores propios del registro de las variables climáticas, que fueron corregidos o las estaciones fueron eliminadas de los análisis.

Las funciones trivariadas de *thin plate splines* fueron adecuadas para normalizar los promedios mensuales con el paquete ANUSPLIN versión 4.1 (Hutchinson, 2004). De forma inicial, se generó un juego de nudos (juego de estaciones meteorológicas seleccionadas a priori para predecir sus valores y desarrollar el ejercicio de interpolación) empleando la opción SELNOT de ANUSPLIN. Los archivos resultantes fueron usados para generar las superficies usando el comando SPLINB de ANUSPLIN. Siguiendo las instrucciones recomendadas como parte de los procedimientos en el programa ANUSPLIN, para usar los archivos de salida del programa SPLINE que permite eliminar o añadir estaciones al archivo de nudos. Después de ocho iteraciones, el juego final de superficies climáticas fue producido usando 2,550 nudos para la precipitación y de 1,505 nudos para la temperatura máxima y la temperatura mínima. El programa SPLINB también acumula una lista de aquellas observaciones mensuales (estaciones anómalas) denominada de residuales, que en el modelo final no fueron empleadas para producir las superficies climáticas.

Como parte de los procedimientos se calculan estadísticas diagnósticas: la señal (o número de nudos), la raíz cuadrada del error promedio (RTMSE), y la raíz cuadrada de la validación generalizada cruzada (RTGCV). La señal indica los grados de libertad asociados

con las superficies, las cuales en un ejercicio adecuado deberán ser aproximadamente de un-tercio a un-cuarto del número de estaciones (o nudos); RTMSE es una medida del error estándar promedio al cuadrado de los valores de las superficies después que errores en los datos han sido eliminados; y la RTGCV es un error estándar espacialmente promediado que refleja los errores de predicción; el cual es una estimación del “verdadero” error predictivo el cual remueve los componentes erróneos de los datos de la GCV. Además, se produce una lista ordenada de las principales estaciones (puntos) con valores anómalos para facilitar la detección de errores y selección de nudos (Hutchinson, 1995).

En el caso del presente estudio la señal es una herramienta diagnóstica útil, esta normalmente no debe exceder alrededor de la mitad del número de puntos de datos (estaciones meteorológicas) (Hutchinson & Gessler, 1994). Cuando esto ocurre, 1) la red de datos puede ser muy dispersa, 2) el modelo estadístico puede estar erróneamente aplicado o 3) puede haber errores importantes en los datos. Cuando se adecuan superficies con datos mensuales, debe haber una progresión estable en los valores de la señal mes con mes, lo cual indica que no ha habido errores o datos aberrantes en los valores mensuales empleados. Normalmente, los valores fuera de esta progresión pueden indicar errores sistemáticos en los datos en los meses aberrantes. Esto depende de la selección del juego de “nudos” el cual muestrea en forma equivalente u homogénea el espacio tridimensional de la variable independiente.

Al generar coberturas a partir de datos con posibles errores (noisy data), el procedimiento de *thin plate smoothing splines* determina un intercambio óptimo entre la bondad de adecuación y el procedimiento de suavizar progresivamente los valores para minimizar la validación generalizada cruzada (GCV por sus siglas en inglés). Esta validación es una estimación de los errores de interpolación obtenidos al remover cada punto en turno y generar las superficies con los datos restantes para revisar que tan bien el punto omitido ha sido predicho. La GCV es calculada implícitamente, y por lo tanto, es computacionalmente eficiente. Una discusión detallada de los aspectos estadísticos del procedimiento de la aplicación de *thin plate smoothing splines* ha sido descrita por Hutchinson (1991) y Hutchinson y Gessler (1994) o de una forma resumida pero muy clara por Price *et al.* (2000).

Finalmente, el programa SPLINB del paquete ANUSPLIN genera las 12 superficies mensuales

simultáneamente, con cada juego de datos mensuales sopesados uniformemente. Esta es una forma apropiada de sopesar los promedios de temperatura en particular y de precipitación, para los cuales la variabilidad año por año no es un factor de peso que influya en la determinación de errores en los datos.

Resultados

Se interpolaron las superficies mensuales tanto de temperatura máxima como mínima, así como de precipitación, a partir de datos promedio mensuales de precipitación de 6,218 estaciones y de temperatura de 4,262 estaciones referenciadas geográficamente. (Ilustración 1)*

Las estadísticas diagnósticas muestran que las señales fueron marcadamente menores que el número de nudos, indicando que un número adecuado de éstos fue seleccionado. Así mismo, hay una progresión gradual en la señal mes con mes, con los valores mayores durante el verano. La raíz cuadrada de la GCV puede ser interpretada como una validación del error promedio de la raíz cuadrada. Esto es una sobreestimación del verdadero error de interpolación, ya que los puntos de datos (estaciones meteorológicas) para calcular la GCV tienen errores. La raíz cuadrada de la MSE es una estimación del verdadero error de interpolación después que los efectos de los errores sobre los datos de los puntos fueron removidos. La red de datos y su calidad produjeron verdaderos errores de interpolación entre 0.43-0.52° C para la temperatura, aunque los de la temperatura mínima fueron ligeramente menores que los correspondientes a la temperatura máxima. En el caso de la precipitación fueron entre 8.8-13.9% de los datos promedio correspondientes, valores mucho menores del 10-20%; en ambos casos corresponden a errores típicos de redes meteorológicas suficientemente densas (Hutchinson, 1991), que serían semejantes a los porcentajes de error de los instrumentos meteorológicos estándar (Nix, 1986; Nix *et al.*, 2000).

Las estadísticas diagnósticas muestran que las señales están muy por debajo del número de nudos, indicando que un número adecuado de estos fue seleccionado para la generación de las superficies. Los valores de estas estadísticas diagnósticas, excepto la señal, están expresados en unidades de grados centígrados y en milímetros respectivamente. También hay una progresión razonable en los valores de la señal de mes a mes.

Las superficies climáticas generadas están representadas por los mapas que muestran la distribución espacial de las tres variables consideradas, para los meses en que se presentan los valores más extremos. Los cuadros 1 y 2 muestran las estadísticas diagnósticas para las coberturas de los meses intraestacionales de temperatura máxima y temperatura mínima, y las ilustraciones 2* y 3* muestran la distribución espacial de estas variables para los meses de julio y enero, respectivamente. Por su parte, el cuadro 3, muestra las estadísticas diagnósticas para la precipitación y la ilustración 4* muestra la distribución espacial de esta variable para el mes de julio. Estos ejemplos representan los meses en los que se han registrado los valores extremos de estas variables.

Discusión

El algoritmo *thin plate smoothing splines* empleado que incorpora el paquete ANUSPLIN es capaz de generar gradientes más creíbles en localidades en donde la cobertura de estaciones meteorológicas es pobre, sobre todo en sitios con mayor altitud. Esto se debe a que calibra mejor la dependencia que existe con relación a la altitud, la cual varía en forma continua espacialmente, usando los datos de todos los puntos disponibles y su rendimiento es superior a otros algoritmos (Mackey *et al.*, 1996; Daly *et al.*, 1997; Daly & Johnson, 1999; Price *et al.*, 2000).

Las coberturas climáticas obtenidas representan un avance sustancial en el conocimiento detallado de la variación climática a una resolución espacial alta, sobre todo al compararlo con aquellas coberturas cualitativas tradicionalmente empleadas en los distintos estudios relacionados con clima en México (Instituto Nacional de Estadística e Informática INE, 1998) <http://www.inegi.gob.mx>; Comisión Nacional del Uso Manejo y Conservación de la Biodiversidad García, 1998; <http://www.conabio.gob.mx>). En una comparación estimada entre las coberturas vectoriales de García (1998) y las obtenidas en el presente estudio, es evidente que difieren sustancialmente en aspectos relevantes, p.e. la zona de México en donde ocurre lluvia de tipo mediterráneo en el noroccidente del país (Baja California) no se ve reflejada en dichas coberturas cualitativas. En el presente estudio una representación adecuada en esta parte del país se interpoló gracias a la incorporación de los datos de las estaciones meteorológicas del sur de los Estados Unidos en combinación con aquellos de las estaciones meteorológicas mexicanas.

* Nota: Las Ilustraciones se encuentran en las páginas 111 y 112

Cuadro 1. Estadísticas diagnósticas de las superficies mensuales intraestacionales de temperatura máxima

Meses	Promedio	Desviación estándar	Señal	Raíz cuadrada GCV	Raíz cuadrada MSE
Enero	24.03	4.73	878.6	1.24	0.502
Abril	30.24	4.25	888.8	1.31	0.532
Julio	29.88	5.01	889.4	1.24	0.505
Octubre	22.49	4.25	883.2	1.20	0.492

Cuadro 2. Estadísticas diagnósticas de las superficies mensuales intraestacionales de temperatura mínima.

Meses	Promedio	Desviación estándar	Señal	Raíz cuadrada GCV	Raíz cuadrada MSE
Enero	8.83	6.19	851.3	1.32	0.526
Abril	13.76	5.53	873.7	1.25	0.506
Julio	17.39	4.94	907.7	1.06	0.433
Octubre	14.50	5.43	902.8	1.09	0.446

Cuadro 3. Estadísticas diagnósticas de las superficies mensuales intraestacionales de precipitación.

Mes	Promedio	Desviación Estándar	Señal	Raíz cuadrada GCV	Raíz cuadrada MSE	Error predictivo %
Enero	31.16	38.67	1,204.6	10.9	4.26	13.6
Abril	26.95	30.50	1,105.9	9.9	3.77	13.9
Julio	167.45	114.80	1,282.7	36.7	14.80	8.8
Octubre	90.41	93.86	1,251.8	23.9	9.57	10.1

Aunque actualmente, bases de datos similares se encuentran disponibles en línea www.worldclim.com (Hijmans *et al.*, 2002) y <http://forest.moscowfl.wsu.edu/climate/future/> (Sáenz-Romero *et al.*, 2009), habiendo sido desarrolladas en forma semejante y con el mismo algoritmo y que aunque representan una fuente de datos sumamente importante para distintas partes del mundo, son un caso distinto para México. Aquellas de Worldclim fueron generadas con base en los datos de 75,000 estaciones para todo el mundo que fue dividido en 23 unidades de trabajo (Hijmans *et al.*, 2005), por su parte para aquellas generadas por Sáenz-Romero *et al.* (2009), se utilizaron sólo datos de 3,500 estaciones meteorológicas y las que ahora se describen estuvieron basadas en los datos de alrededor de 7,000 estaciones meteorológicas. De una comparación hecha entre todos estos juegos de datos para México, se han detectado diferencias significativas. Estas diferencias reflejan variaciones en algunas zonas del país de hasta 3° C y hasta 1,000 mm de precipitación en el sur de México.

Desafortunadamente, sin contar con los datos pertinentes quizá se puede señalar que estas marcadas diferencias están dadas por los diferentes volúmenes de estaciones procesadas y las estadísticas diagnósticas finalmente obtenidas a través de una serie de iteraciones que las mejoran, y que son las que brindan confiabilidad y hacen robustas las superficies. Sin embargo, los volúmenes de datos en ambos casos hacen una marcada diferencia, por lo que se asume que las estadísticas de las coberturas ahora descritas, tienen estadísticas diagnósticas mejores que las de Worldclim y de Sáenz *et al.* (2006). Una muestra de ello es que, al menos, para México distintos especialistas están empleando preferencialmente las coberturas aquí descritas por sobre aquellas generadas en la iniciativa de Worldclim (<http://www.worldclim.org/>). Es así que estas bases de datos y coberturas digitales, independientemente de sus diferencias, se considera que representan un avance sustancial con relación al conocimiento previo de la variación y distribución espacial del clima.

No obstante, que la distribución espacial de las estaciones meteorológicas, la densidad y la calidad de registro en México, han sido objeto de duda (Figura 1), existe una cobertura razonable a través de todo el país. Pero más importante es que existe una densidad que cubre de una manera razonable y homogénea, la variada topografía incluyendo la mayoría de los numerosos pisos altitudinales con lo que ello pudiera representar. Por lo anterior, los resultados obtenidos en este ejercicio muestran que existen suficientes datos a través de un adecuado periodo de registro y sobre todo una densidad,

que es lo que ha permitido obtener unas coberturas confiables para el país.

A pesar de esto, hay que considerar que las estaciones meteorológicas de porciones del centro-norte, del sureste y del noroeste de México, así como del norte de Guatemala, y del sur de los Estados Unidos, están relativamente dispersas y algunos huecos entre los datos de puntos (distribución de las estaciones) son muy evidentes. En México, estos huecos corresponden principalmente a zonas menos pobladas.

Algunas de estas deficiencias señaladas para México fueron subsanadas por la incorporación de datos de estaciones meteorológicas de los países vecinos. En el caso del norte de México, la incorporación de los datos de las estaciones del sur de los Estados Unidos de Norteamérica representó un complemento extraordinario, brindando una fortaleza al ejercicio que permite sugerir que la interpolación en zonas del norte de México con representación de estaciones pobre, ahora puede ser considerada más robusta y confiable. El mismo caso lo representa la zona centro del país en donde numerosas ciudades importantes se distribuyen y en donde numerosas estaciones meteorológicas ha registrado datos confiables por largos periodos de tiempo y se considera que las coberturas digitales son muy confiables.

Estudios comparativos relativamente recientes entre dos de los métodos considerados como más robustos para interpolar datos climáticos, describen en detalle todos los procedimientos, debilidades y fortalezas del paquete ANUSPLIN y los algoritmos que emplea (Price *et al.*, 2000). Estos métodos son ANUSPLIN (Hutchinson, 1995a), que probó en general ser superior al método de GIDS de Nalder y Wein (1998). La evaluación subjetiva y el análisis estadístico mostraron que ANUSPLIN es generalmente más preciso para predecir variables climáticas en las localidades de las estaciones seleccionadas aleatoriamente de los juegos de datos. Además, ANUSPLIN es capaz de generar gradientes más creíbles en los límites regionales y en localidades en donde la cobertura de estaciones climáticas es pobre, notoriamente en sitios a altitudes mayores. La generalmente mayor precisión de un spline ocurre porque calibra mejor la continua dependencia variante espacial de la altitud usando todos los puntos de datos disponibles. Esto explica porque los métodos de regresión local (tales como GIDS) pueden tener dificultades en áreas con gradientes no-uniformes. No obstante, GIDS se considera una técnica útil, porque es relativamente intuitiva, objetiva y fácil para implementar y predice bien en comparación con la mayoría de los métodos de

interpoladores espaciales conocidos. Provee un estándar útil contra el cual comparar interpoladores más sofisticados tales como ANUSPLIN. Ambos métodos tienen el potencial para incrementar la precisión con la incorporación de variables independientes adicionales que se sepa tienen efectos sobre el clima local.

Aplicaciones y Disponibilidad de las coberturas de México

Los juegos de datos y las coberturas digitales que se describen en este trabajo fueron desarrollados para un análisis de Selección de Áreas Prioritarias de Biodiversidad en México. Sin embargo, el desarrollo de estos juegos de datos digitales de clima permitirá análisis de celda por celda a través de todo el país, para la resolución de problemas relacionados con la influencia del clima no sólo sobre la actividad biológica, sino sobre diversos aspectos más.

Específicamente, estos juegos de datos ya han apoyado análisis en otros campos de estudio relacionados, tales como ecología, aspectos forestales (Téllez *et al.*, 2004) y agricultura, taxonomía, fitogeografía y estudios de la influencia del cambio climático (Téllez-Valdés & Dávila-Aranda, 2003; Villaseñor & Téllez-Valdés, 2004; Parra-Olea *et al.*, 2005;

Téllez *et al.*, 2006, 2007; Munguía *et al.*, 2008; Lira *et al.*, 2009). Incluso, se emplearán en el Instituto de Biología como parte del proyecto UNIBIO, para la generación de perfiles bioclimáticos de las diversas especies representadas entre los especímenes depositados en las colecciones biológicas nacionales, por consulta a través de línea (<http://www.ibiologia.unam.mx>), entre otros.

La disponibilidad de estos datos puede ser a través de solicitud directa al primer autor.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer profundamente el apoyo brindado por Nina Paganas, Janet Stein y John Stein del Centre for Resource and Environmental Studies (actualmente Fenner School of Environment and Society) ANU. Este proyecto fue desarrollado como parte de una estancia posdoctoral en el Institute of Advanced Studies, Centre for Resource and Environmental Studies, The Australian National University por parte del primer autor. A CONACYT y DGAPA-UNAM por el apoyo económico a través de las becas entre septiembre de 1999- febrero de 2001. Al Instituto de Biología por su apoyo para realizar la estancia posdoctoral. A los Dres. Lourdes Villers y Enrique Martínez Meyer por la revisión del manuscrito y sus acertadas y valiosas correcciones y sugerencias.

Literatura citada

- Cicero, C. 2004.** Barriers to sympatry between avian sibling species (Paridae: *Baeolophus*) in local secondary contact. *Evolution* 58:1573–1587.
- Daly, C. 1994.** A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *Journal of Applied Meteorology* 33:140–158.
- Daly, C. & G.L. Johnson. 1999.** PRISM spatial climate layers: their development and use. Short Course on Topics in Applied 94 D.T. Price *et al.* / *Agricultural and Forest Meteorology* 101 (2000) 81–94 *Climatology*, 79th Annu. Meeting Am. Meteorol. Soc., Dallas, TX, 49 pp.
- Daly, C., G.H. Taylor & W.P. Gibson. 1997.** The PRISM approach to mapping precipitation and temperature. Proc. 10th Conf. on Applied Climatology, Reno, NV. Am. Meteorol. Soc., pp. 10–12.
- García, E. 1998.** Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Climas (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México.
- Hijmans, R.J. S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones & A. Jarvis. 2005.** Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965–1978.
- Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A. & Maskell, K. (1996).** *Climate Change 1996. The Science of Climatic Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 572 pp.
- Hughes, D.A. 1982.** The relationship between mean annual rainfall and physiographic variables applied to a coastal region of southern Africa. *South African Geographical Journal* 64:41–50.
- Hutchinson, M. F., 1987.** Methods of generation of weather sequences. In: *Agricultural environments: Characterization, classification and mapping*. A. H. Bunting, Ed.), CAB International, Wallingford, UK, 335 pp.
- Hutchinson, M.F. 1991.** The application of thin-plate smoothing splines to continent-wide data assimilation. In: Jasper, J.D. (ed.), *BMRC Research Report Series*, Bureau of Meteorology, Melbourne, Australia, pp. 104–113.
- Hutchinson, M.F. 1995a.** Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *International Journal of Geographic Information Systems* 9:385–403.
- Hutchinson, M.F. 1995b.** Stochastic space-time weather models from ground-based data. *Agricultural and Forest Meteorology* 73:237–264.
- Hutchinson, M. F. & R. J. Bischof. 1983.** A new method for estimating the spatial distribution of mean seasonal and annual rainfall applied to the Hunter Valley, New South Wales. *Australian Meteorological Magazine* 31:179–184.
- Hutchinson, M.F. & P.E. Gessler. 1994.** Splines – more than just a smooth interpolator. *Geoderma* 62:45–67.
- Hutchinson, M.F., H.A. Nix, J.P. McMahon & K.D. Ord. 1995.** Africa – A topographic and climatic database, version 1.0. Centre for Resources and Environmental Studies, Australian National University, Canberra, Australia.
- Hutchinson, M.F., H.A. Nix, J.P. McMahon & K.D. Ord. 1996.** The Development of a topographic and climatic database for Africa. In: *Proceedings of the Third International Conference/Workshop, NCQFA, University of California, Santa Barbara, U.S.A.*
- Hutchinson, M.F., McIntyre, S., Hobbs, R.J., Stein, J.L., Garnett, S. & Kinloch, J. 2005.** Integrating a global agro-climatic classification with bioregional boundaries in Australia. *Global Ecology and Biogeography* 14(3): 197-211.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (1996).** Estaciones climatológicas. Extraído de ERIC (Extractor rápido de información climatológica). México.
- INE (Instituto Nacional de Ecología). 1998.** Tipos de Vegetación y Uso del Suelo en la República Mexicana según la cartografía de INEGI.
- Lira, R., O. Téllez & P. Dávila 2009.** The effects of climate change on the geographic distribution of Mexican wild relatives of domesticated Cucurbitaceae. *Genetic Resource and Crop Evolution* 56: 691–703.
- Mackey, B.G., D.W. McKenney, Y.Q. Yang, J.P. McMahon & M.F. Hutchinson. 1996.** Site regions revisited: a climatic analysis of Hill’s site regions for the province of Ontario using a parametric method. *Canadian Journal of Forest Research* 26:333–354.
- Munguia, M., A.T. Peterson & V. Sánchez-Cordero. 2008.** Dispersal limitation and geographical distributions of mammal species. *Journal of Biogeography* 35:1879–1887.
- Nalder, I.A. & R.W. Wein. 1998.** Spatial interpolation of climatic Normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 9:211–225.
- Nix, H.A. 1986.** A Biogeographic Analysis of Australian Elaphid Snakes. *Australian Flora and Fauna ser. 7:4–19.*

- Nix, H.A., D.P. Faith, M.F. Hutchinson, J.L. Kesteven, C.R. Margules, G. Natera, R. Smyth, J.L. Stein, W. Slater, P. Walker & J. West. 2000. The BioRap Toolbox. A National Study of Biodiversity Assessment for Papua New Guinea. Consultancy Report to the World Bank. Centre for Resource and Environmental Studies. ANU. Canberra, Australia, 48 p.
- Parra-Olea, G., E. Martínez-Meyer & G. Pérez-Ponce de León. 2005. Forecasting climate change effects on salamander distribution in the highlands of central Mexico. *Biotropica* 37:202—208.
- Phillips, D.L., J. Dolph & D. Marks. 1992. A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. *Agricultural and Forest Meteorology* 58:119—141.
- Price, D.T., Nalder, I.A. & R.M. Siltanen. 1998. A 10-km national climate surface for Canadian global change studies. In: Marceau, D. (Ed.), *Scaling and modelling in forestry: applications in remote sensing and GIS*. Université de Montréal, Montréal, pp. 161—168.
- Price, D.T., D.W. McKenney, I.A. Nalder, M.F. Hutchinson & J.L. Kesteven. 2000. A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data. *Agricultural and Forest Meteorology* 101 (2-3): 81-94.
- Sáenz-Romero, C., G.E. Rehfeldt, N.L. Crookston, P.D. Rémi St-Amant, J. Beaulieu & B.A. Richardson. 2009. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change* DOI 10.1007/s10584-009-9753-5.
- Shepard, D.L. 1968. A two dimensional interpolation function for irregularly spaced data. *Proc. 23rd Nat. Conf., Assoc. Computing Machinery, ACM, Washington*, pp. 517—524.
- Téllez-Valdés, O. & P. Dávila-Aranda. 2003. Protected Areas and Climate change: A case study of the cacti of the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, México. *Conservation Biology* 17:846—853.
- Téllez, V.O., Y.M. Chávez H., A. Gómez-Tagle CH. & M.V. Gutiérrez G. 2004. Modelaje bioclimático, una herramienta para desarrollar estrategias de manejo forestal: estudio de caso en cuatro especies mexicanas de *Pinus* (Pinaceae). *Ciencia Forestal* 29:61-82.
- Téllez-Valdés, O., P. Dávila-Aranda & R. Lira-Saade. 2006. The effects of climate change on the long-term conservation of *Fagus grandifolia* var. *mexicana*, an important species of the Cloud Forest in Eastern Mexico. *Biodiversity and Conservation* 15:1095-1107.
- Téllez, O., P. Dávila, M. Ayala, K. Gutiérrez & I. Melchor. 2007. Case studies on the effect of climate change on the flora of Mexico. *Journal of Botanic Gardens Conservation International* 4:17-21.
- Thiessen, A.H. 1911. Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review* 39:1082—1084.
- Villaseñor, R.J.L. & O. Téllez-Valdés. 2004. Distribución geográfica potencial de las especies del género *Jefea* Strother en México. *Anales Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México* 75:205-220.
- Wahba, G. 1990. Spline models for observational data. CBMS-NSF Regional Conf. Ser. Appl. Math., Philadelphia Society Ind. Applied Mathematics, 169 pp.
- Wahba, G. & J. Wendelberger. 1980. Some new mathematical models for variational objective analysis using splines and cross validation. *Monthly Weather Review* 108:1122—1143.
- Wiens J.J. & C.H. Graham. 2005. Niche conservatism: Integrating Evolution, Ecology, and Conservation Biology. *Annual Review in Ecology, Evolution and Systematics* 36:519—39.
- Wiens J.J. & C.H. Graham. 2006. Evolutionary and Ecological Causes of the Latitudinal Diversity Gradient in Hylid Frogs: Treefrog Trees Unearth the Roots of High Tropical Diversity. *The American Naturalist* 168:579-596.

Capítulo III

Confort térmico humano en la megalópolis del valle de México hacia mediados del siglo XXI

Adalberto Tejeda-Martínez. Irving R. Méndez-Pérez y Elda Luyando-López,

Resumen

Se generaron escenarios de bioclima humano para las zonas metropolitanas de Pachuca-Tula-Tulancingo, Toluca, Puebla-Tlaxcala-Apizaco y Zona Metropolitana de la Ciudad de México, consideradas por separado en el presente y como parte de una megalópolis hacia mediados del siglo. Actualmente sus condiciones son relativamente frescas pero se tornarán ligeramente cálidas en el futuro por efectos del calentamiento global y del calentamiento urbano. Se hicieron estimaciones del bioclima humano para el periodo 1981-2000 y para las décadas de 2030 y 2050 a partir de escenarios climáticos globales. También se calcularon los consecuentes consumos eléctricos domésticos por climatización de viviendas requeridos en el futuro, e implican para medio siglo un incremento del 1.2% de la producción eléctrica nacional actual.

Palabras clave: Megalópolis de la cuenca del valle de México, cambio climático, bioclima humano.

Abstract

Human bio-clima for the metropolitan areas of Pachuca-Tula-Tulancingo, Toluca, Puebla-Tlaxcala-Apizaco and Metropolitan Area of Mexico City, considered separately in the present and as part of a megacity around the middle of the century scenarios were generated. Currently their conditions are relatively fresh, but they will be slightly warmer in the future due to effects of global warming and urban heat. The human bio-clima for the period 1981-2000 and the decades of 2030 and 2050 of global climate scenarios estimates were made. Domestic electrical consumptions were calculated by future air conditioning housing. Their increase is around 1.2 of current Mexican electric energy production.

Keywords: Mexico basin megacity, climate change, human bioclimate.

Introducción

Muy alejadas del problema que enfrentarán los sitios costeros están las ciudades del centro del país, de clima templado, que hacia mediados del siglo podrán ver

modificadas sus condiciones de bienestar térmico, pues se espera un incremento de las condiciones cálidas – ahora muy escasas- pero también una disminución de las condiciones frescas o frías. Así, en términos de confort térmico ¿cómo se prevé que resulte este balance?

El proceso de urbanización generalmente consiste en que las superficies agrícolas o naturales se recubren de materiales más densos, impermeables, con una capacidad y conductividad térmica mayores. Entonces el clima de las ciudades difiere del propio de sus alrededores rurales debido a la forma en que se disipa la energía neta atrapada en la interfaz superficie/atmósfera: durante las primeras horas del día. Los materiales en las ciudades se calientan de forma progresiva e incluso más lentamente que los suelos con vegetación o desnudos de las zonas rurales, pero durante la noche las cubiertas urbanas conservan durante más tiempo el calor ganado durante el periodo diurno.

Además la energía neta retenida por la interfaz superficie/atmósfera, en las ciudades se gasta en mayor proporción como calor sensible turbulento que como calor latente de evaporación. Los edificios y las calles forman los cañones urbanos, donde el calor acumulado en las superficies tiene mayor dificultad para disiparse pues se modifica el movimiento del aire y se reduce su velocidad (Arnfield, 2003).

A ese fenómeno –el excedente de temperatura ambiente de la ciudad respecto a sus alrededores-se le conoce como isla urbana de calor, y se propicia con aire en calma y cielos despejados, condiciones que se producen generalmente durante las madrugadas de las épocas poco húmedas o secas. El primero en documentarlo fue Lucke Howard en 1818 (Howard, 2006), y el libro de Landsberg (1981) ha sido por décadas un texto fundamental. En nuestro país este efecto se observa sobre todo en la región del centro donde suelen presentarse situaciones de estabilidad térmica nocturna. Su intensidad será tanto mayor cuanto mayor sea el área urbana y la población que contiene (Jáuregui & Tejeda, 2004; Tejeda & Luyando, 2010).

Para tratar de entender el efecto combinado del cambio climático global y el urbano en el bioclima

humano de ciudades del centro del país, se presentarán aproximaciones a las evaluaciones del bioclima humano de las conurbaciones de Pachuca-Tula-Tulancingo, Toluca, Puebla-Tlaxcala-Apizaco y Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) para sus condiciones presentes, y para mediados del siglo consideradas como parte de una megalópolis, de la que se excluye el corredor Cuernavaca-Cuatla por estar mil metros abajo que el promedio de las altitudes de las conurbaciones antes citadas.

En este trabajo los autores entienden por megalópolis al conjunto de áreas metropolitanas cuyo crecimiento urbano acelerado pone en contacto a unas con las otras. Es claro que ya desde ahora los tiempos de recorrido por carretera entre los límites de cada zona metropolitana y la ZMCM es de aproximadamente una hora, y posiblemente disminuirán en el futuro por la mejora de la infraestructura carretera y de transporte público, así como por el crecimiento de las manchas urbanas (ver Cuadro 1 y Figura 1).

Los primeros estudios relacionados con el bienestar térmico se efectuaron en Europa a finales del siglo XIX con el fin de establecer criterios adecuados para el trabajo en las industrias mineras y textiles británicas, en las que se producían frecuentes accidentes y enfermedades a consecuencia del calor y humedad, ya que los mineros se encontraban encerrados en galerías sofocantes, y los trabajadores textiles en fábricas cuya humedad atmosférica se mantenía artificialmente alta para reducir la fragilidad de los hilos (Fernández, 1995).

Así pues, el objetivo de los estudios bioclimáticos humanos es el de cuantificar las sensaciones térmicas y establecer escalas que permitan determinar las respuestas del individuo ante condiciones climáticas específicas, caracterizadas mediante el análisis de diversas variables climáticas que condicionan la sensación térmica.

Hasta hace algunas décadas los resultados se expresaban en forma de índices o mediante áreas de confort, ya sea en diagramas o en cartas bioclimáticas

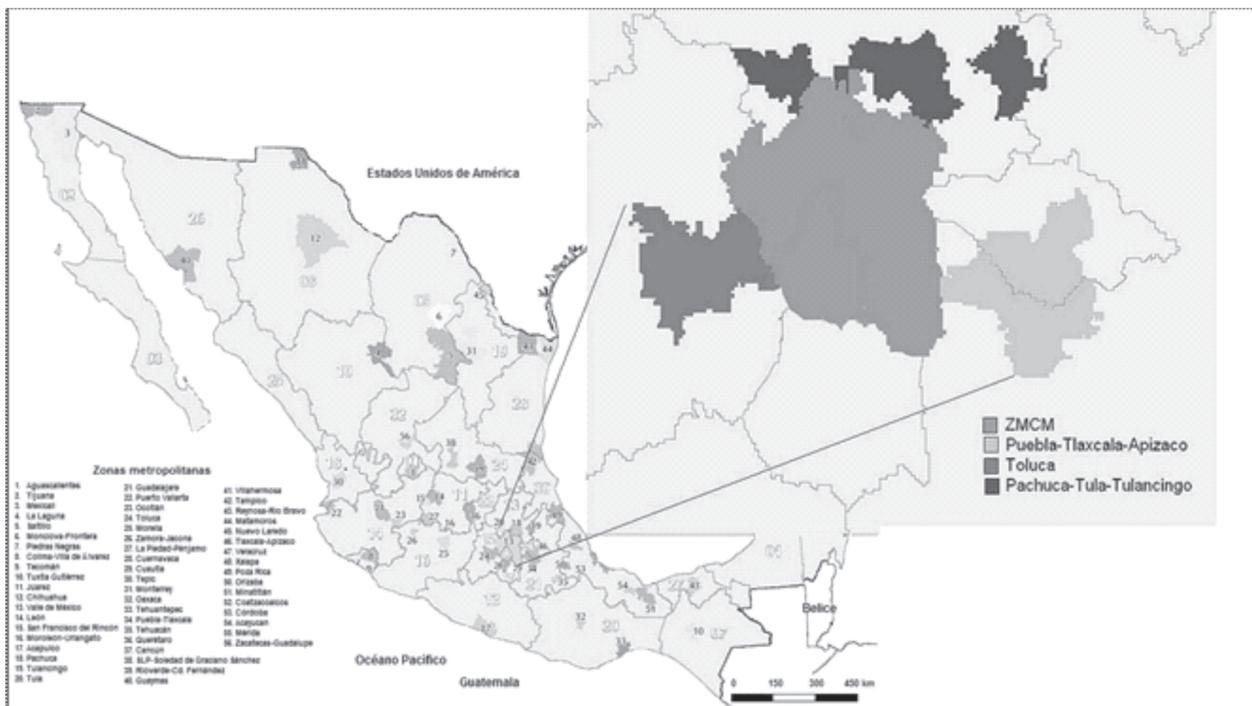


Figura 1. Zonas metropolitanas de estudio. [Tomada de la SEDESOL et al., 2007], donde se incluye la información para el 2005 del INEGI de la población da cada corredor que se estudio.

La bioclimatología humana trata sobre los efectos del clima sobre los seres humanos. Entre sus diversos pendientes de resolver, está la determinación de una zona de bienestar o confort térmico, entendiéndose – según Fanger (1970)- como el conjunto de condiciones en las que la mente expresa satisfacción con el ambiente que le rodea.

(Tudela, 1982); pero cada vez va ganando más terreno el uso de modelos físico-fisiológicos implementados en computadora.

El confort implica el equilibrio energético entre el cuerpo humano y su entorno, aunque la sensación final también depende del tipo de actividad, las costumbres

Cuadro 1. Localización y población (INEGI 2005) de las zonas metropolitanas estudiadas.

Zona metropolitana	Población 2005 en millones de habitantes	Latitud norte	Longitud oeste	Altitud msnm
Ciudad de México	19.2	19.40	99.17	2309
Puebla-Tlaxcala-Apizaco	2.5	19.00	98.17	2187
Toluca	1.6	19.29	99.65	2720
Pachuca-Tula-Tulancingo	0.8	20.13	98.75	2425
Suma/promedio	24.1	19.46	98.94	2410

y las prácticas culturales y sociales, el tipo de vestido, el estado de ánimo, entre otros. El concepto de confort admite varias definiciones –para más detalles ver Méndez y Tejeda (2005)- pero en todas se halla presente el concepto de equilibrio energético entre el cuerpo humano y el medio de su vecindad. La existencia de un equilibrio térmico no necesariamente indica confortabilidad, puesto que puede alcanzarse bajo condiciones de malestar por efecto de los mecanismos autorreguladores del cuerpo humano.

Las principales variables climáticas que influyen sobre el confort térmico de acuerdo a Fanger (1970) son el nivel de actividad, la resistencia térmica de la ropa, la temperatura del aire, la temperatura media radiante, intensidad del viento y la presión del vapor de agua. Landsberg (1972) argumenta que la temperatura, la humedad, el viento y la radiación solar, son los elementos meteorológicos de mayor importancia en el intercambio de calor entre el cuerpo humano y el ambiente. Hentschel (1986) menciona que el grado de importancia de los parámetros anteriores depende de la zona climática que se pretende estudiar: en los trópicos (como en el caso de México) la temperatura y la humedad atmosférica son predominantes.

El papel que juega la humedad atmosférica sobre el confort térmico, consiste en que en cantidades elevadas impide o dificulta la transpiración del cuerpo humano, y en niveles muy bajos propicia la sequedad de las mucosas, irritación de la piel y el cuero cabelludo, etcétera (Jáuregui, 1971). Cuando se combina una alta temperatura y alta humedad se produce una sensación de incomodidad porque se reduce la disipación de calor del cuerpo por evaporación, es decir la humedad relativa elevada disminuye y con ella la capacidad de perder calor por evaporación.

El total de sudor evaporado de la piel depende de tres factores: 1) la superficie expuesta al ambiente, 2) la temperatura y la humedad del aire ambiental, y 3) las corrientes convectivas de aire alrededor del cuerpo. Sin duda la humedad es el factor más importante que determina la eficacia de la pérdida de calor por evaporación (Rhoades & Tanner, 1997). Cuando la humedad es alta, la presión de vapor del ambiente se acerca a la de la piel húmeda (alrededor de 53 hPa) y se reduce mucho la evaporación por lo tanto esta vía para perder el calor se encuentra esencialmente cerrada. El sudor en sí no refresca la piel, es la evaporación la que lo hace (McArdle *et al*, 1990).

La sensación térmica se valora en la práctica a través de modelos computacionales de balance de energía o de índices de confort. Éstos surgieron de la necesidad de estimar los efectos combinados de las variables que intervienen en los intercambios físicos entre el cuerpo humano y el ambiente sobre las respuestas fisiológicas y sensoriales de las personas. En principio, mientras más variables se incluyan más precisa será la evaluación, que es lo que pretenden los modelos de balance de energía, que se basan en el desarrollo de la ecuación 1 (W/m² su unidad es watts por metro cuadrado).

$$M \pm C_d \pm C_v \pm R_d \pm R - S_d = \Delta \quad \text{Ec (1)}$$

M, producción de calor metabólico

C_d, flujo de calor por conducción

C_v, flujo de calor convectivo

R, flujos de calor debido a intercambios respiratorios

Si el resultado Δ es negativo, la persona se está enfriando; de ser positivo, se está calentando, y de ser

nulo, se encuentra en equilibrio térmico. Obsérvese que el calor metabólico M es siempre positivo (producción de calor) y la evaporación del sudor S_d es negativo (pérdida de calor).

Se debe tener cuidado en no confundir confort térmico con equilibrio térmico: si bien el segundo es una condición necesaria para alcanzar el primero, no constituye una condición suficiente.

Según diversos estudios, la sensación térmica varía con arreglo a una serie de variables que pueden clasificarse como sigue (Brager & de Dear, 1998): las variables físicas (temperatura del aire, humedad, rapidez del viento, entorno radiante, entre otros), circunstanciales (como la actividad, la vestimenta y el tiempo de permanencia en el ambiente), fisiológicas (edad, sexo, peso, estatura, actividad hormonal, alimentación), y variables psicológicas y sociológicas (las expectativas, condición social, costumbres, etc.).

Los diversos índices térmicos para la evaluación del bioclima relacionan o intentan relacionar las respuestas psicológicas y fisiológicas con las condiciones ambientales, pero sólo algunas variables fisiológicas y ambientales son susceptibles de medirse cuantitativamente.

Taesler (1986) identifica cuatro líneas de investigación bioclimáticas: la *simulación física*, donde se utilizan "cuerpos" instrumentados para medir los efectos de las variables climáticas sobre el cuerpo humano, como el *Klima-Mitchel-Model* (Jendritzky et al, 1990), entre otros; el *modelamiento matemático*, que calcula los índices térmicos correlacionados a sensaciones térmicas o a reacciones fisiológicas, además de simular el balance de calor en el cuerpo; los *estudios experimentales*, mediante pruebas de desempeño, así como votos subjetivos en condiciones de campo o bien en cámaras climáticas controladas y los *estudios epidemiológicos*, que parten de métodos estadísticos para establecer posibles relaciones entre las condiciones ambientales y la ocurrencia de diversas enfermedades.

Por su parte, Morgan y Baskett (1974) identifican sólo dos enfoques en los estudios bioclimáticos, el *sintético o empírico*, en el cual se combinan diversas variables meteorológicas para expresar el confort térmico; y el *analítico*, el cual explica las bases físicas del confort térmico examinando los intercambios de energía entre el hombre y su ambiente, teniendo como base al balance energético humano.

Como es fácil advertir, amén de la dificultad para hacer acopio de la información detallada para alimentar la ecuación 1, se requeriría que fuera representativa de toda una ciudad, o bien usar condiciones promedio de algunas de las variables, lo que es equivalente a usar un índice de confort más o menos simple (para una revisión sobre índices de bioclima humano, ver Epstein & Morán, 2006). Además, la práctica muestra que a veces los modelos más complicados no son necesariamente los más exactos, principalmente por esa falta de información ya mencionada. Por tanto, este trabajo recurrirá al uso de un índice bioclimático sencillo para las estimaciones de confort presente y ante condiciones de cambio climático, que es hasta ahora el más usado en estudios de bioclima humano en México (Méndez & Tejeda, 2005).

El disconfort térmico y sus consecuentes consumos altos de energía eléctrica que se presentan en las ciudades de climas cálidos (secos o húmedos), representan un problema social, que con el llamado cambio climático global podría agravarlas. En cambio, para ciudades templadas también habrá que considerar la disminución de las condiciones de frío, por lo que ante el calentamiento urbano y el global no necesariamente se esperarían condiciones menos satisfactorias que las presentes.

Cambio climático e isla urbana de calor.

La isla urbana de calor puede significar alrededor de 2°C de incremento en la temperatura del centro de la ciudad respecto de sus alrededores (Zhou & Shepherd, 2009; Tan et al., 2009), para urbes de cien mil o más habitantes, aunque Jáuregui (2000) encontró hasta 10°C de diferencia para la ciudad de México. Por tanto, no sólo es necesario caracterizar el comportamiento de este fenómeno, sino además se deben generar escenarios plausibles para estimar la intensidad futura de la isla urbana de calor. Puesto que para México son realmente escasos los estudios experimentales de este fenómeno, se optó por una parametrización simple.

Para cada ciudad del cuadro 1, se estimó la intensidad máxima de la isla de calor máxima en °C (IC), según la ecuación siguiente (Jáuregui & Tejeda, 2004):

$$IC_{\text{máxima}} = 2 \log_{10} P - 8, \quad Ec (2)$$

donde P es el número de habitantes.

El cálculo se hizo para la poblacional de 2005 y su proyección al 2030. Si se considera que el valor derivado de la ecuación 1 es el máximo esperado, en una primera

aproximación para este trabajo dicho valor se dividió entre cuatro para así estimar un promedio en el espacio y en el tiempo; es decir, que como caso extremo se consideró que el fenómeno puede afectar a la mitad de la ciudad durante la mitad del tiempo.

Los promedios de incrementos térmicos por isla urbana de calor así estimados fueron mantenidos invariantes a partir de 2030, cuando es razonable esperando que se alcance la estabilidad demográfica (Rodríguez *et al.*, 2004). Esta estimación se sumó a los incrementos de temperatura media por el calentamiento global generados por Conde *et al* (2008), usando los modelos HADLEY, GFDL y ECHAM, que en promedio para el país son de 2°C y 3°C, respectivamente para las décadas de 2030 y 2050.

Como es de esperarse, en el cuadro 2 se puede observar que los distintos modelos de circulación general arrojan resultados semejantes en todas las ciudades, mientras que los aumentos asociados a la isla urbana de calor presentan diferencias notorias.

Bioclimogramas

Una forma clara de representación de las condiciones climáticas de un sitio a lo largo del tiempo, son los climogramas. Tienen la ventaja sobre las antiguas clasificaciones climáticas, que se pueden elaborar combinando las variables de interés para cada estudio – no siempre temperatura y precipitación, como mayormente se hace para estudios agroclimáticos- sino incluso índices, como los de confort humano que consisten en combinaciones de variables. Se elaboraron climogramas bioclimáticos –o bioclimogramas- para las

zonas metropolitanas de la Cuadro 1, para las condiciones medias de 1981 a 2000, lo que se considera el escenario base. En cada climograma se representa de forma horaria el valor de un índice bioclimático clásico, la Temperatura Efectiva (Missenard, 1937), definida como el equivalente a la temperatura del aire en calma que experimentaría un sujeto sedentario, sano, a la sombra, vestido con ropa de trabajo, si la humedad relativa fuera del 100%. Su expresión matemática es:

$$TE = (T_o - 0.4 (T_o - 10)) \left(\frac{1 - HR}{100} \right) \quad \text{Ec (3)}$$

donde T_o es la temperatura del aire en grados centígrados y HR la humedad relativa en porcentaje.

Este índice se seleccionó en basa a la disponibilidad de la información climática necesaria para los cálculos en los escenarios futuros, siendo la temperatura y la humedad datos accesibles que, combinados en un índice, se aproximan a representar las sensaciones bioclimáticas (Tejeda & Rivas, 2001). Pero además, si el análisis tiene fines comparativos entre el escenario base y los escenarios futuros, basta con un índice simple que aplica para ambos periodos el mismo procedimiento. Por lo demás los resultados de ese índice sencillo –la *Temperatura Efectiva*- presentan una variabilidad similar a otros más complejo, como el llamado índice de estrés ambiental (en inglés *Environmental Stress Index*) (Moran & Epstein, 2006).

Para elaborar los bioclimogramas de *TE* son necesarios datos horarios medios mensuales de temperatura ambiente (T_{hor}), que fueron estimados a partir de medias mensuales de temperaturas extremas siguiendo el procedimiento propuesto por Tejeda (1991) y Tejeda y Rivas (2001):

Cuadro 2. Población (millones de habitantes) e incrementos térmicos promedio por isla urbana de calor (°C). El incremento de temperatura estimado en la década de 2030 por cambio climático global con los modelos HADLEY, GFDL y ECHAM con escenarios de emisiones A2 y B2 (Conde *et al.*, 2008), en promedio es de **2.3°C**.

Zonas metropolitanas	Población al año 2030 en millones de habitantes (CONAPO, 2009)	Incremento de temperatura (°C) por isla urbana de calor media, según población 2030
Ciudad de México	22.1	1.7
Puebla-Tlaxcala-Apizaco	4.0	1.3
Toluca	3.0	1.2
Pachuca-Tula-Tulancingo	1.5	1.1
	Suma, 30.6	Promedio pesado, 1.6

$$T_{hor} = T_{min} + (at^b e^{ct}) (T_{max} - T_{min}) \quad \text{Ec. (4)}$$

$$HR_{hor} = HR_{min} + (1 - at^b e^{ct}) (HR_{max} - HR_{min}) \quad \text{Ec. (5)}$$

donde HR_{hor} es la humedad relativa horaria promedio mensual, $a=0.096$, $b=2.422$, $c=-0.339$, t es la hora del día a partir del amanecer, T_{max} , T_{min} , HR_{max} y HR_{min} , son los promedios mensuales 1981-2000 de temperaturas máxima y mínima, y de humedades relativas máxima y mínima.

A los valores horarios medios mensuales del escenario base 1981-2000, se les sumaron los incrementos de las salidas de los escenarios para los años 2030's y 2050's de los modelos GFDL, HADLEY y ECHAM (Conde *et. al* 2008), más el resultado de la isla urbana de calor máxima dividida entre cuatro, por los argumentos que se mencionaron anteriormente (Cuadro 2). Esos fueron los datos de entrada usados para la estimación de la Temperatura Efectiva bajo condiciones de cambio climático (global más urbano).

La temperatura neutra o de confort es la preferida por los habitantes aclimatados a un determinado sitio. Existe una diversidad de modelos en la literatura, pero para este trabajo se aplicó el de Auliciems y de Dear (1986):

$$T_n = 17.6 + 0.31T_{em} \quad \text{Ec. (6)}$$

donde T_n es la temperatura neutra y T_{em} es la temperatura media mensual.

Nicol (2004) plantea que el intervalo de confort alrededor de la temperatura neutra depende del tiempo de adaptación que tienen las personas en sus ambientes. Así, propone que $\pm 2^\circ\text{C}$ es una magnitud aceptable para un periodo de adaptación de 24 horas, pero podría ampliarse, por ejemplo hasta $\pm 5^\circ\text{C}$, si el periodo de análisis es mayor a una semana. Auliciems y Szokolay (1997) coinciden en el enfoque, pero difieren en la magnitud, pues proponen $\pm 1.75^\circ\text{C}$ cuando el periodo es mensual o menor y de $\pm 2^\circ\text{C}$ para periodos anuales. Se optó por tomar este último valor, de modo que los límites superior e inferior del intervalo de temperatura de confort son:

$$T_{n\ superior} = 19.6 + 0.31T_{em} \quad \text{Ec. (7)}$$

$$T_{n\ inferior} = 15.6 + 0.31T_{em} \quad \text{Ec. (8)}$$

Sustituyendo el valor de la temperatura media mensual por la temperatura neutra inferior y superior en la ecuación 2 y un valor de 50% para la humedad

relativa, se obtienen los valores de Temperatura Efectiva para el intervalo de confort de cada mes para cada zona metropolitana. Este procedimiento es similar al que fue aplicado para la SET (temperatura efectiva estándar) por la norma ANSI/ASHRAE 55 (2004) o la Norma ISO 7243 (Parsons, 2006).

$$TE_{inferior} = T_{n\ inferior} - 0.4 (T_{n\ inferior} - 10) \quad \text{Ec. (9)}$$

$$TE_{superior} = T_{n\ superior} - 0.4 (T_{n\ superior} - 10) \quad \text{Ec. (10)}$$

Para el escenario base y para las proyecciones a 2030 y 2050 (estas últimas considerando los incrementos atribuidos al cambio climático y a la isla urbana de calor) se calcularon las horas grado calor (HGC), es decir, los "grados de calor" necesarios para acercarse al nivel de confort cuando los valores se situaron por debajo del límite inferior del índice de TE, y las horas grado frío (HGF) para los valores situados por arriba del límite superior de TE.

$$HGC = \sum_{i=1}^n (TE_{inf} - TE_{HOR1i}), \text{ para todo } TE_{HOR1i} < TE_{inf} \quad \text{Ec. (11)}$$

$$HGF = \sum_{i=1}^n (TE_{HOR2i} - TE_{sup}), \text{ para todo } TE_{HOR2i} > TE_{sup} \quad \text{Ec. (12)}$$

donde HGC son las horas grado calor, HGF son las horas grado frío, TE_{inf} es el límite inferior del intervalo de confort para cada la TE, TE_{sup} es el límite superior del intervalo de confort para cada la TE, TE_{HOR1i} son todos los valores medios horarios de los índices menores que TE_{inf} , TE_{HOR2i} son todos los valores medios horarios de los índices mayores que TE_{sup} .

El análisis comparativo de los climogramas muestra diferencias en cuanto a las sensaciones térmicas en la mayoría de las ciudades para todos los modelos y escenarios utilizados respecto al escenario base. En general, el calentamiento aparenta ser benéfico, pues las analizadas en este trabajo son zonas urbanas de clima templado a fresco, incluso con inicios muy fríos, y por tanto posiblemente la energía necesaria para calentar disminuirá su demanda. Las Figuras 2 a 5 muestran los climogramas de las cuatro zonas metropolitanas.

A efecto de comparar las condiciones del escenario base con las proyecciones a futuro, las cuatro zonas metropolitanas muestran las tendencias de las sensaciones térmicas bajo los efectos del cambio climático global y además local por efecto de la

urbanización. La ZMCM (Figura 2) perderá su status de fresca y confortable para ser confortable y más cálida en el verano en los escenarios futuros. Una disminución de las horas frías por una neutralidad térmica en invierno contribuirá a hacer una urbe más cómoda. Sin embargo, durante el verano y a horas más tempranas que en la actualidad, la situación del escenario actual será sensiblemente más calurosa sin llegar aparentemente a la pesadez o al agobio. Es posible que ante este aumento de la temperatura en la ciudad, se opte cada vez más por la utilización de métodos de enfriamiento que conduzcan a un mayor consumo de energía.

Para la zona de Puebla-Tlaxcala-Apizaco, la sensación térmica correspondiente a “cálido” que abarcaba gran

parte del periodo diurno de abril a junio, desaparece ante una expansión de “muy cálido”, al 2030 y 2050. La sensación de confort que representa el “neutro” aparece ligeramente en los meses de abril a junio durante la madrugadas del 2030, y mayormente en el 2050, (Figura 3).

En Toluca y Pachuca-Tula-Tulancingo el calentamiento global tendrá un efecto benéfico en cuanto a la situación de comodidad que el clima pueda brindar (Figuras 4 y 5). Las mañanas muy frías en la temporada invernal tenderán a desaparecer y el ambiente será más confortable, incluso en las horas de medio día en verano, cuando la sensación cálida se extenderá hasta octubre. Es posible entonces que el consumo de energía para calentar reduzca su demanda.

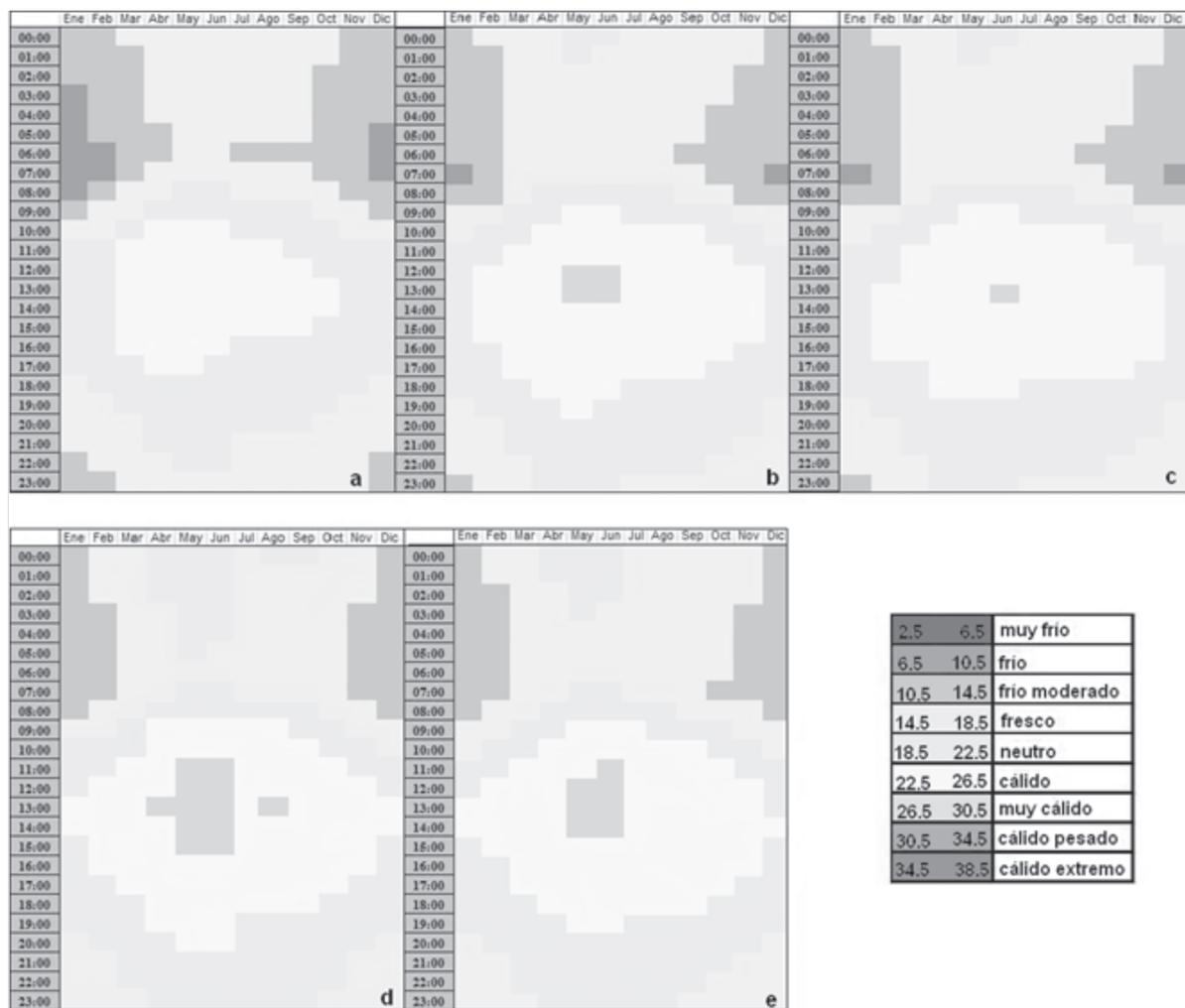


Figura 2. Bioclimogramas de la Ciudad de México. (a) Escenario base 1981-2000 con incremento de la isla urbana de calor urbana, (b) y (c) Escenario A2 y B2 con el modelo ECHAM con incremento de la isla urbana de calor urbana para 2030, respectivamente, (d) y (e) Escenario A2 y B2 con el modelo ECHAM con incremento de la isla urbana de calor urbana para 2050, respectivamente.

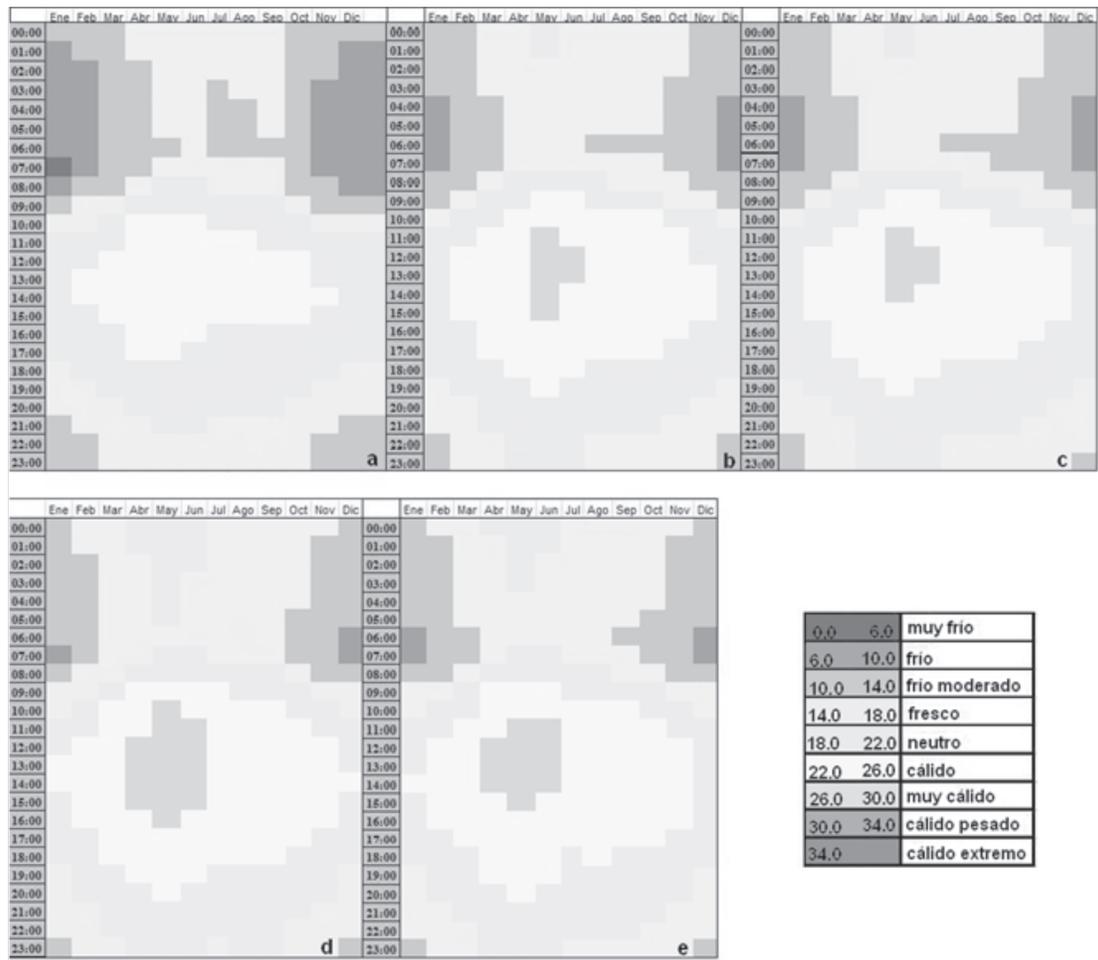


Figura 3. Bioclimogramas de Puebla-Tlaxcala-Apizaco. (a) Escenario base 1981-2000 con incremento de la isla urbana de calor urbana, (b) y (c) Escenario A2 y B2 con el modelo ECHAM con incremento de la isla urbana de calor urbana para 2030, respectivamente, (d) y (e) Escenario A2 y B2 con el modelo ECHAM con incremento de la isla urbana de calor urbana para 2050, respectivamente.

Debe aclararse que Pachuca-Tula-Tulancingo, a diferencia del resto, será la ciudad donde la sensación térmica de “frío” por las madrugadas en invierno, se mantendrán desde el escenario base, a 2030 y 2050, inclusive para el 2050 en B2 se alcanzará a “muy frío” (Figura 5). Al 2050 se alcanzarán al mediodía de mayo algunas horas de “cálido”.

Consumos eléctricos

Los datos y los escenarios generados en la sección anterior se usaron para estimar los consumos eléctricos esperados para el escenario base, y las décadas de 2030 y 2050. Se completó la información con la base de datos del conteo de población INEGI (2005) para las zonas metropolitanas citadas en el cuadro 1.

Cuadro 3. Factores encontrados por García y Tejeda (2008) para la Temperatura Efectiva.

MEDIO (M)	VERACRUZ (V)		HERMOSILLO (H)
	kWh / usuario-año		
Horas- grado de enfriamiento de la	2.80	3.30	3.05

Cuadro 4. Incrementos porcentuales de población y consumos eléctricos para enfriamiento, por usuario y considerando toda la zona metropolitana.

Zona metropolitana	Incremento poblacional al 2030 (y 2050).	Incremento de energía para enfriamiento por usuario a 2030	Incremento de energía para enfriamiento por usuario a 2050	Incremento en consumos 2030 por zona metropolitana	Incremento en consumos 2050 por zona metropolitana
Ciudad de México	15	12	20	30	38
Puebla-Tlaxcala-Apizaco	60	10	15	76	84
Toluca	88	3	7	93	100
Pachuca-Tula-	88	6	11	99	108

Cuadro 5. Incrementos de consumos eléctricos para enfriamiento para cada zona metropolitana en Gw-h.

Zona metropolitana	Incremento en consumos 2030	Incremento en consumos 2050
Ciudad de México	1385	1754
Puebla-Tlaxcala-Apizaco	864	955
Toluca	289	311
Pachuca-Tula-Tulancingo	245	271
Suma	2783	3291

Las necesidades de enfriamiento y de calefacción descritas en la sección anterior se tradujeron en consumos eléctricos siguiendo el procedimiento de García y Tejeda (2008), que a su vez se basa en el de Rodríguez *et al.* (2004). En términos generales, se trata de estimar las horas grado que requieren enfriamiento en el semestre cálido del año, y restarles las horas grado del semestre fresco. Esa diferencia se relaciona proporcionalmente con las diferencias en consumos eléctricos domésticos reportados por la Comisión Federal de Electricidad.

El método parte de estudios de campo para las ciudades de Hermosillo y Veracruz, donde se realizaron encuestas de confort con mediciones simultáneas de las condiciones higrotérmicas del

entorno de los encuestados. Comparando los resultados de temperatura efectiva a la hora de la encuesta y los recibos de consumos eléctricos, se pudo ajustar el dato estimado anteriormente (García & Tejeda, 2008). Así, a las ciudades estudiadas en este trabajo se les aplicaron las condiciones medias resultantes de Hermosillo y Veracruz, pues por el momento no es posible establecer un incremento en consumos eléctricos por climatización de edificios ya que éste es mínimo, además de que sólo existen estudios de campo, hasta ahora, para esas dos ciudades cálidas (Cuadro 3).

Resulta indispensable conocer las condiciones demográficas para especular sobre futuros consumos eléctricos. Puesto que cada habitante requiere de cierto

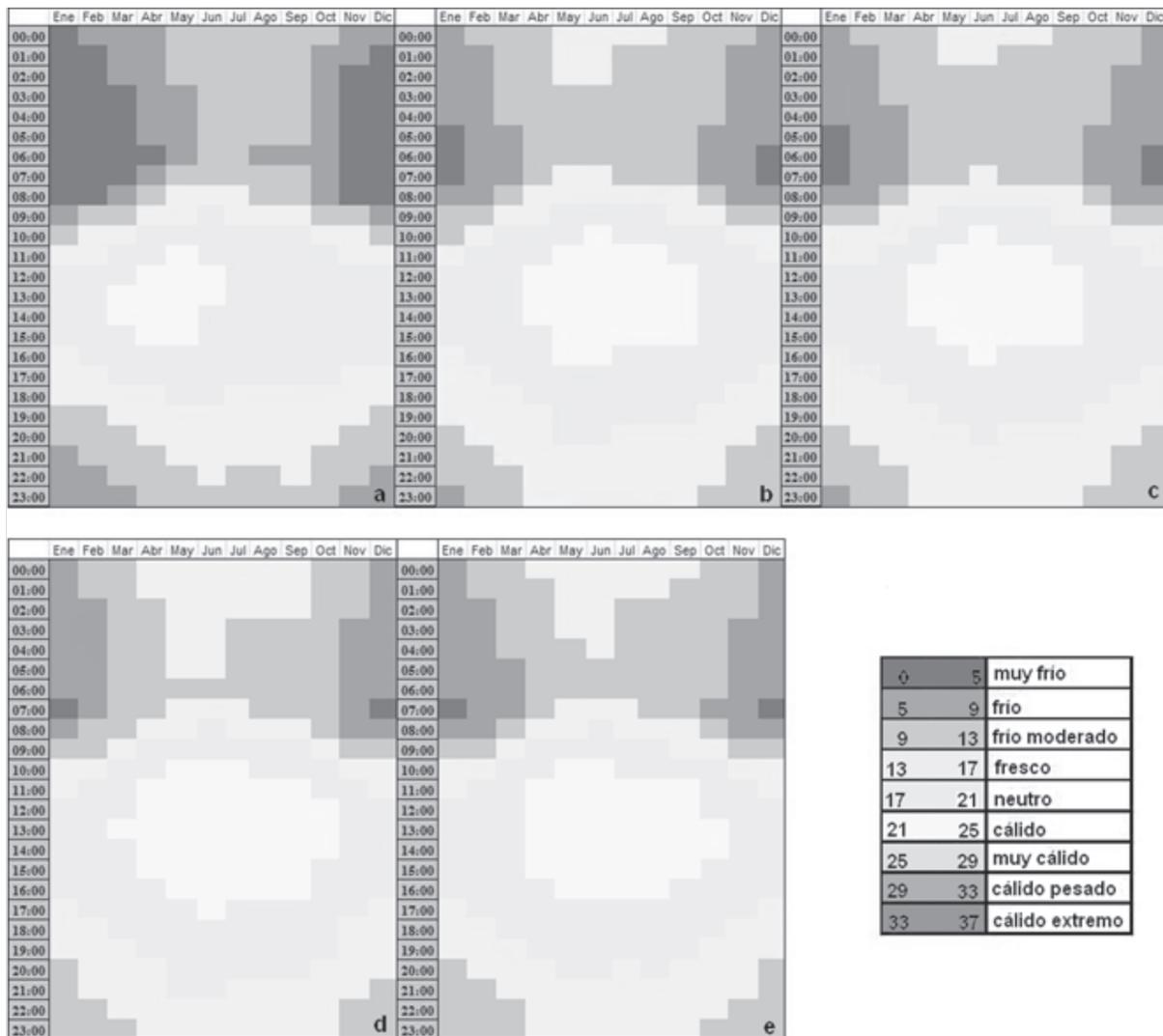


Figura 4. Bioclimogramas de Toluca. (a) Escenario base 1981-2000 con incremento de la isla urbana de calor urbana, (b) y (c) Escenario A2 y B2 con el modelo ECHAM con incremento de la isla urbana de calor urbana para 2030, respectivamente, (d) y (e) Escenario A2 y B2 con el modelo ECHAM con incremento de la isla urbana de calor urbana para 2050, respectivamente.

espacio vital mínimo resulta evidente que la población del país no podrá seguir creciendo indefinidamente en el futuro. Resultados obtenidos por diferentes caminos parecen apuntar que a largo plazo (después del año 2030) la población nacional se acercará a un estado de crecimiento nulo, estabilizándose entre 175 y 250 millones de habitantes (Alonso *et al*, 1994).

Aplicando el procedimiento de Rodríguez *et al.* (2004) con los incrementos por usuario, se consideró que cada toma eléctrica (usuario) dará servicio a cuatro personas. Así los incrementos de consumos eléctricos futuros se pueden estimar con las ecuaciones 13 y 14.

$$ICT_{2030} = \frac{(\Delta P_{2030})}{4} * (C_{actual} + \Delta C_{2030}) \quad \text{Ec. (13)}$$

$$ICT_{2050} = \frac{(\Delta P_{2050})}{4} * (C_{actual} + \Delta C_{2050}) \quad \text{Ec. (14)}$$

Donde *ICT* es el incremento en el consumo total, “*P*”/4 es el incremento en los usuarios, C_{actual} es el consumo medio actual y “*C*” es el incremento en el consumo eléctrico por cambio climático.

En el cuadro 4 se muestran los escenarios obtenidos de consumos eléctricos esperados para las décadas de

2030 y 2050, donde se observa que el mayor incremento poblacional se presentará en las zonas metropolitanas de Pachuca y Toluca con un 88%, mientras que en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, únicamente un incremento del 15%. Para la década de 2050 se prevén incrementos poblaciones nulos a partir de 2030, pero en consumos eléctricos para climatización (enfriamiento) de viviendas se dispara a alrededor del 100% respecto del presente para las zonas metropolitanas de Pachuca y Toluca, del 76 y 84.5 (para 2030 y 2050, respectivamente) para Puebla-Tlaxcala-Apizaco, y apenas rondando el 30% para la ZMCM.

Comentarios finales

Se ha mostrado una metodología práctica para la generación de escenarios bioclimáticos urbanos ante condiciones de cambio climático. Se consideraron los incrementos térmicos esperados por el calentamiento global y los inducidos por la urbanización. El cálculo de las condiciones de neutralidad para el escenario base y para los futuros, permite tomar en cuenta la aclimatación de los sujetos.

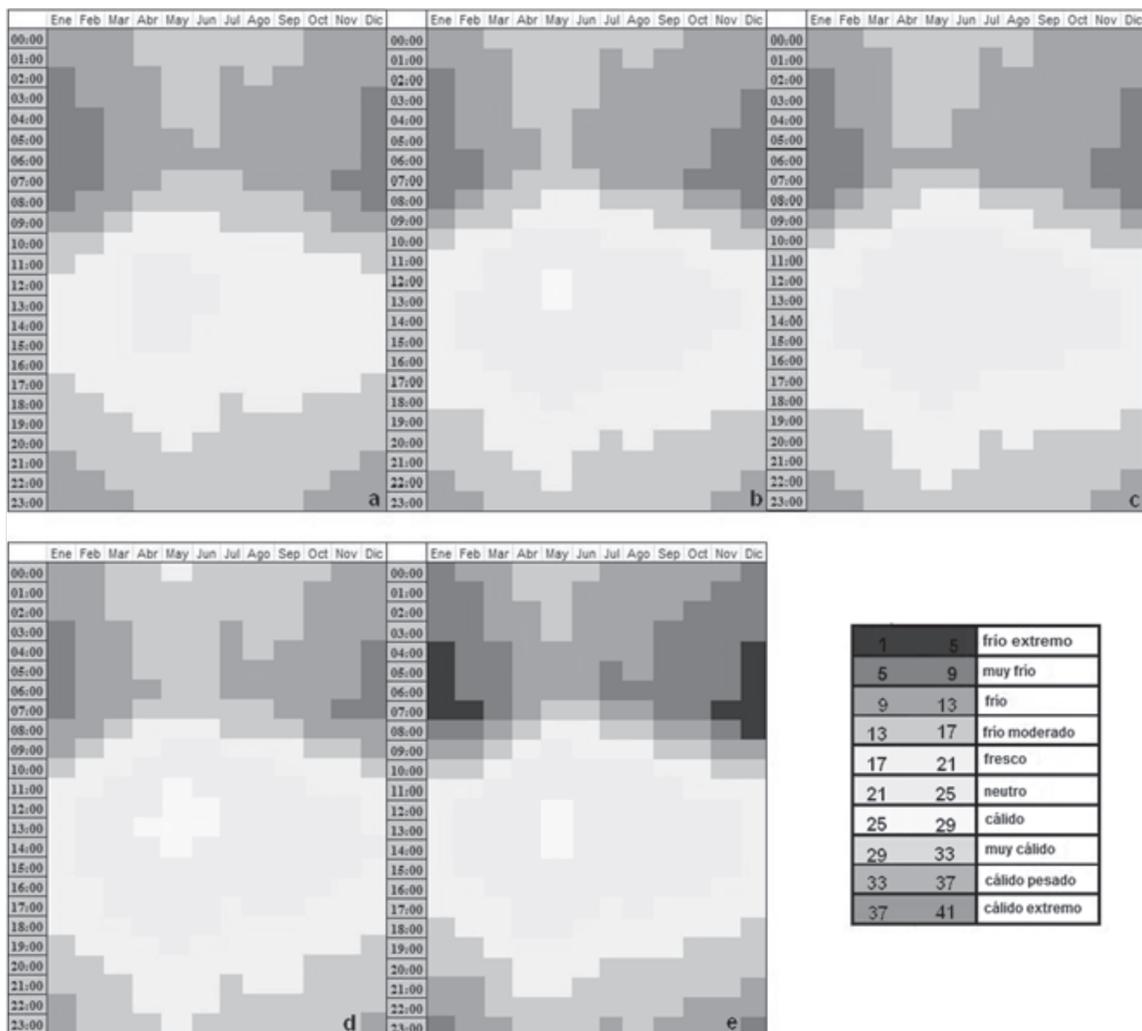


Figura 5. Bioclimogramas de Pachuca-Tula-Tulancingo. (a) Escenario base 1981-2000 con incremento de la isla urbana de calor urbana, (b) y (c) Escenario A2 y B2 con el modelo ECHAM con incremento de la isla urbana de calor urbana para 2030, respectivamente, (d) y (e) Escenario A2 y B2 con el modelo ECHAM con incremento de la isla urbana de calor urbana para 2050, respectivamente.

El calentamiento urbano estimado a partir del escenario base y hacia el primer cuarto de siglo, va de 1.1°C a 1.7°C, dependiendo del tamaño de la zona metropolitana. El promedio para la parte alta de la megalópolis -es decir, excluyendo el corredor Cuautla/Cuernavaca- es de 1.6°C, equiparable al calentamiento global.

El resultado final se puede ver en los consumos eléctricos esperados. La Figura 6 muestra los incrementos por usuario de la demanda eléctrica en las ciudades estudiadas para las décadas de 2030. Debe recordarse que para la estimación de estos incrementos se ponderó tanto el calentamiento global, como el urbano y el crecimiento poblacional, descontado el efecto de aclimatación. Los incrementos más importantes se dan para las zonas metropolitanas de Pachuca y Toluca, con alrededor del 100% para la segunda mitad del siglo.

En términos absolutos se presentan los incrementos esperados en giga-watt-hora (Gw-h) en la Cuadro 5. Como se ve, la suma del incremento de energía requerida para cubrir las necesidades de enfriamiento en la megalópolis de la cuenca del Valle de México hacia la mitad del siglo es de alrededor de tres mil Gw-h, es equivalente al 1.2% de la producción nacional actual.

Nótese que por el crecimiento urbano, las conurbaciones que rodean a la actual ZMCM contribuyen con alrededor del 50% del incremento de energía requerida.

Finalmente debe reconocerse que en este análisis no se ha considerado la mejora en la tecnología de climatización de edificios, lo que podría bajar las estimaciones presentadas aquí para escenarios futuros.

Agradecimientos

Los autores agradecen al proyecto *Generación de Escenarios de Cambio Climático a Escala Regional, al 2030 y 2050; Evaluación de la Vulnerabilidad y Opciones de Adaptación de los Asentamientos Humanos, la Biodiversidad y los Sectores Ganadero, Forestal y Pesquero, ante los Impactos de la Variabilidad y el Cambio Climáticos; y Fomento de Capacidades y Asistencia Técnica a Especialistas Estatales que Elaborarán Programas Estatales de Cambio Climático, cuyos informes finales son parte de las investigaciones realizadas para la Cuarta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Guillermo García Grijalba y Mario Casasola ayudaron en la realización de cálculos.

Literatura citada

- Alonso, A., Cruz, R. & E. Fugarolas 1994.** Futuros de los recursos energéticos, en *El sector eléctrico de México* (Daniel Reséndiz Núñez coordinador), Comisión Federal de Electricidad y Fondo de Cultura Económica, México: 427-475.
- ANSI/ASHRAE 55 2004.** *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers / 16-Apr-2004 / 30 pages*
- Arnfield, A.J. 2003.** Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology* 23:1-26
- Auliciems, A. & R. de Dear 1986.** Air- conditioning in Australia: Human thermal factors. *Architectural Science Review* 29:67-75.
- Auliciems, A. & S. Szokolay 1997.** *Thermal Comfort. Notes of Passive and Low Energy Architecture International. No. 3.* Brisbane: PLEA – University of Queensland.
- Brager, G. S & R. J. de Dear 1998.** Thermal adaptation in the built environment: A literatura review. *Energy and Buildings.* 27:83-96.
- CONAPO. (2009).** Proyecciones de la población de México 2005-2050. http://www.conapo.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=36&Itemid=234 Consultada en julio 2009.
- Conde, C., B. Martínez, O. Sánchez, F. Estrada, A. Fernández, J. Zavala & C. Gay 2008.** Escenarios de Cambio Climático (2030 y 2050) para México y Centro América. Temperatura y Precipitación. [Documento en línea]. http://www.atmosfera.unam.mx/cclimatico/escenarios/Escenarios_de_cambio_climatico_Mexico_2008.html
- Epstein, Y. & D.S. Moran 2006.** Thermal comfort and the heat stress indices. *Industrial Health* 44: 388-398.
- Fanger, P.O. 1970.** Thermal comfort. Danish Technical Press., New York, 244pp.
- Fernández, F. 1995.** Clima y confortabilidad humana. En *Manual de climatología aplicada. Clima, medio ambiente y planificación.* Editorial Síntesis. Madrid, España. 199-222pp.
- García, G. & A. Tejada. 2008.** Consumos eléctricos para climatización de viviendas ante escenarios de cambio climático en el estado de Veracruz, México. *Palapa*, III (II): 39-45.
- Hentschel, M.A. 1986.** A human biometeorology classification of climate for large and local scales. En *Climate and Human Health.* Preceedings of the Symposium in Leningrad, Volume I. 22-26 september. pp. 120-138.
- Howard, L. 2006.** The climate of London. Int. Ass. for urban Climate (edición facsimilar del original). Gotemburg, Suiza, 221 p.
- INEGI, 2010.** Página del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. "II Conteo de población y vivienda 2005". Consultado el 4 de noviembre de 2010, de <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2005/Default.aspx>
- Jáuregui, E. 1971.** Evaluación del bioclima en dos clínicas de la ciudad de México. *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, Vol. IV, 23-36
- Jáuregui, E. 2000.** *El clima de la ciudad de México.* Plaza y Valdés Editores, México. 131 p.
- Jáuregui, E. & A. Tejada. 2004.** Cuatro décadas de climatología urbana en México. *Estudios de Arquitectura Bioclimática*, Vol VI: 163-178. UAM Iztapalapa y Editorial Limusa, México.
- Jendritzky, G., G. Menz, H. Schirmer & W. Schmidt 1990.** Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen. (Fortgeschriebenes Klima-Miche-Modell). Beitr. d. Akademie Für Raumforschung und Landesplanung, Hannover. 114p
- Landsberg, H. E. 1972.** The assessment of human bioclimate. Technical Note No. 123, WMO-No.331. WMO, Geneva, 36p
- Landsberg, H. E. 1981.** The urban climate. Academic pres, Nueva York, 277 p.
- McArdle, W., F. Katch & V. Katch 1990.** El ejercicio y el estrés térmico. En: *Fisiología del ejercicio. Energía, nutrición y rendimiento humano.* Alianza Editorial. 469-495p.
- Méndez, I.y A. Tejada. (2005).** Conceptos e índices de confort térmico humano. En *Estudios de arquitectura bioclimática. Anuario 2005 Vol. VII.* Limusa-UAM. México. 117-129p.
- Missenard, A. (1937).** *L'Homme et le climat*, Eyrolles, París.
- Moran, D.S. & Y. Epstein. (2006).** Evaluation of the Environmental Stress Index (ESI) for hot/dry and hot/web climates. *Industrial Health* 44: 399-403.
- Morgan, D.L. & R.L. Baskett 1974.** Comfort of man in the city. An energy balance model of man-environment coupling. *International Journal Biometeorology*, 18:184-198.
- Nicol, J.F. 2004** Adaptive thermal comfort standards in the Hot-Humid Tropics. *Energy and Buildings* 36:628-637

Parsons, K. 2006. Heat stress Standard ISO 7243 and its global application. *Industrial health*, 44: 368-379.

Rhoades, R. & G. Tanner 1997. *Fisiología Médica*. Masson-Little. 974pp.

Rodríguez, L., A. Tejada & G. Utrera 2004. Demanda eléctrica para enfriamiento residencial en el estado de Veracruz ante la duplicación de CO₂ atmosférico. *Estudios de Arquitectura Bioclimática*, 6: 325-338.

Secretaría de Desarrollo Social, Consejo Nacional de Población e Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2007. Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2005. 183pp.

Taesler, R. 1986. Climate characteristic and human health the problem of climate clasification. En *Climate and Human Health*. Preceedings of the Symposium in Leningrade Volume I. 22-26 September. pp. 81-109.

Tan, J., Y. Zheng, X. Tang, Ch. Guo, L. Li, G. Song, X. Zhen, D. Yuan, A. J. Kalkstein, F. Li & H. Chen 2009. The urban heat island and its impact to heat wave and human health in Shanghai. *International Journal of Biometeorology* DOI 10.1007/s00484-009-0256-x

Tejada, A. 1991. An exponential model of the curve of mean monthly hourly air temperature. *Atmósfera* 4: 139-144.

Tejada, A. & D. Rivas 2001 Un escenario de bioclima humano en ciudades del sur de México, bajo condiciones de 2CO₂ atmosférico, en *El tiempo del clima* (A.J. Pérez-Cueva, E. López-Baeza & J. Tamayo-Carmona, editores). Asociación Española de Climatología Serie A, No. 2, 574 p: 551-562.

Tejada, A. & E. Luyando 2010. Condiciones medias de estrés térmico en ciudades mexicanas mayores a un millón de habitantes ante cambio climático. *Atmósfera* .

Tudela, F. 1982. Ecodiseño. Univ. Aut. Metropolitana-Xochimilco. 235p

Zhou Y. & J. M. Shepherd 2009. Atlanta's urban heat island under extreme heat conditions and potential mitigation strategies. *Natural Hazards and Earth System Sciences* DOI 10.1007/s11069-009-9406-z.

Capítulo IV

Escenarios regionales del cambio climático e impactos en áreas naturales protegidas: hacia una estrategia de adaptación

Víctor Magaña Rueda y Leticia Gómez Mendoza.

Resumen

Se presenta un recuento de las amenazas a la biodiversidad asociadas al cambio climático en el mundo así como los mecanismos de mitigación y adaptación dentro de la conservación, servicios ecosistémicos y aprovechamiento sustentable de los recursos biológicos que ha establecido la Convención de Biodiversidad. Para el caso de México, se presentan los lineamientos generales que la Estrategia de Cambio Climático priorizó para las Áreas Protegidas en México. Se elaboraron una serie de escenarios regionales de cambio climático obtenidos con herramientas estadísticas y se aplicaron a las Áreas Protegidas. A través de talleres participativos con actores clave de las Áreas Protegidas de México, se identificaron las amenazas regionales asociadas a cambio climático y sus posibles medidas de adaptación. Al mismo tiempo se contrastan las necesidades de investigación en materia de conservación y cambio climático con las nuevas tendencias y paradigmas de los espacios naturales en el mundo.

Palabras clave: Conservación, resiliencia, servicios ecosistémicos.

Abstract

A review of the biodiversity threats associated with global climate change is presented attending to the mechanisms for mitigation and adaptation in conservation, ecosystem services and sustainable use of biological resources established by the Biodiversity Convention. In the case of Mexico, there are general guidelines that prioritized Climate Change Strategy for Protected Areas in Mexico. A set of regional climate change scenarios obtained by statistical tools were applied to the Protected Areas. Through workshops with key stakeholders of protected areas in Mexico, regional threats associated with climate change were identified and some possible adaptation measures were listed. At the same time we share the research needs in conservation and climate change with new trends and paradigms of natural areas in the world.

Keyword: Conservation, resilience, ecosystem services.

Introducción

Los mecanismos de estrés de los ecosistemas asociados con cambios en el clima se hacen más evidentes ya sea a escalas locales como regionales. Ya sea que se trate de eventos extremos como huracanes o sequías, o bien por causas antropogénicas como cambios en el uso de suelo, la contaminación y la presencia de especies invasoras, los ecosistemas se ven cada vez más amenazados. Cambios en los patrones biológicos de la vegetación como son la floración y la época de crecimiento, corrimiento espacial de las especies y aumento en el estrés hídrico de la vegetación, son algunos de las evidencias del efecto del cambio climático que el Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (PICC) estableció en 2007. En las próximas décadas, el impacto del cambio climático en los ecosistemas se verá reflejado en su composición y funcionamiento. Los aumentos de temperatura y cambios en el ciclo hidrológico resultarán un aumento en la tasa de pérdida de hábitat y eventualmente en la extinción de especies. Sin embargo, la amenaza del cambio climático será mayor en aquellas regiones en donde la dependencia de las sociedades de sus servicios ecológicos sea más alta, así como en zonas en donde la capacidad de adaptación de las sociedades humana sea muy baja.

Se llama cambio climático a la modificación del clima con respecto al historial climático a escala global o regional. Tales cambios se producen a muy diversas escalas de tiempo y sobre todos en temperatura y precipitación. Los cambios son debidos a causas naturales y, en los últimos siglos, también son resultado de la acción de la humanidad. De hecho la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático utiliza el término cambio climático sólo para referirse al cambio por causas humanas. Por otro lado a los cambios producidos por causas naturales les denominan variabilidad natural del clima. En algunos casos, para referirse al cambio de origen humano se usa también la expresión cambio climático antropogénico o antrópico (IPCC 2007).

Posibles modificaciones en los ecosistemas debido al cambio climático

Los cambios en clima podrían modificar la distribución de especies y ecosistemas, y disminuir la diversidad biológica y los servicios ambientales que generan como son: la captura de carbono, la captura de agua, la conservación de la biodiversidad y los servicios de recreación.

La variabilidad o el cambio climático pueden provocar que se rebasen los umbrales de riesgo crítico de los ecosistemas. El rango de tolerancia depende de la vulnerabilidad de cada sistema. Quizás por esta condición de complejidad, la adaptación al cambio climático de los ecosistemas no ha podido incluir acciones anticipatorias y sólo se vislumbran adaptaciones reactivas como son los cambios en la longitud del periodo de crecimiento, cambios en la composición y la migración de los humedales costeros (CBD, 2009).

Ahora bien, en el contexto global de la protección de los ecosistemas en el marco del cambio climático se tienen tres grandes retos que enfrentar: 1) el análisis de las retroalimentaciones entre los ecosistemas y el cambio global en términos de investigación, 2) la identificación de las consecuencias del cambio global para los sistemas ecológicos y 3) el rediseño de una estrategia para sostener y mejorar sistemas ecológicos frente a cambio global. Para enfrentar el problema Maltitz *et al.* (2006) enlistan las acciones en para proteger y preservar las áreas de conservación en para iniciar un proceso de adaptación al cambio climático. Dichas medidas sugieren: mantener la estrategia actual de conservación; la re-configuración del sistema actual de reservas; mantener la biodiversidad en áreas fuera de las reservas; la translocación de especies en hábitats nuevos y la conservación *ex-situ*. El manejo de las Áreas Naturales Protegidas (ANP) debe verse a largo plazo, para periodos de 20 o 50 años. La conservación y manejo son estrategias para mantener y restaurar la biodiversidad. Para ello la adaptación basada en ecosistemas (integra el uso de la biodiversidad y servicios ecosistémicos) puede generar beneficios económicos y contribuir a la conservación (CBD 2009).

Para llegar a acciones de adaptación en los sistemas es necesario aplicar inicialmente modelos que simulen las modificaciones en el nicho de las especies, de cadenas tróficas, de ecosistemas y viabilidad de hábitat, biogeografía y biogeoquímica, todos ellos para poder inicialmente comprender los efectos de la variabilidad en los sistemas naturales. Para estos modelos son necesarias diversas bases de datos como las de productividad, fenología, suelos, océanos y cambio de uso de suelo. Con esto insumos se requeriría de una

técnica de toma de decisiones basados en el monitoreo continuo de los ecosistemas y su respuesta al clima actual. Finalmente mediante un proceso de valoración de los beneficios de los servicios ambientales, tomar acciones para la conservación, restauración de los sistemas naturales.

Para el caso de México aún son escasos los estudios sobre los posibles efectos del cambio climático en la biodiversidad. En Magaña y Gómez (2009), se identifican algunos trabajos relevantes en esta materia. Algunos de estos esfuerzos han descrito los posibles movimientos de los hábitats de especies de plantas, aves y mamíferos en México, sin embargo muchas de ellas son aproximaciones nacionales que no contemplan las amenazas no climáticas como es el cambio de uso de suelo y la propagación de especies invasoras.

Las tendencias del cambio en el clima en México muestran un aumento no sólo en la temperatura sino también en la ocurrencia de eventos. Los escenarios regionales de cambio climático para México en materia de temperatura y precipitación (Magaña & Zermeño 2008) sugieren que a partir de la segunda mitad del presente siglo serán de magnitud que afectará la estructura de los ecosistemas. Los sistemas naturales y espacios de conservación tendrán que adaptarse ya sea de manera autónoma o asistida. Tanto en la Primera como en la Tercera Comunicación Nacional de México sobre el Cambio Climático (SEMARNAT 2001, 2007), se ha evaluado, por medio de modelos, que evalúan el impacto del cambio climático en la distribución de los tipos de vegetación o de especies de importancia ecológica (Gómez & Arriaga, 2007, Semarnat-INE 2006, Soberon & Peterson 2005, Dávila & Tellez 2003, Peterson *et al.*, 2002). Los resultados de estos estudios apuntan a una disminución significativa de la distribución potencial de algunas especies, sobre todo aquellas que se encuentran dentro de alguna categoría de protección.

El significado de la adaptación

Adaptación significa reducir la vulnerabilidad de un sistema al calentamiento global (PNUD 2001). La vulnerabilidad varía dependiendo del sistema, de su grado de exposición, de su sensibilidad y su capacidad adaptativa autónoma. Bajo un esquema de manejo de riesgo se debe enfrentar el reto de conjuntar y entender un rango de posibilidades, vulnerabilidades y valores entre diversos ecosistemas. La adaptación resulta de un proceso de toma de decisiones que puede involucrar transformaciones en tecnología, educación, comportamiento, política pública, infraestructura y representa una oportunidad para lograr objetivos de gran alcance como son la sustentabilidad, la equidad y la

gobernanza. Quienes se adaptan son los grupos sociales, los individuos y el gobierno e instituciones públicas en todos los niveles. Por ello, los retos de las zonas bajo conservación o protección frente al cambio climático consisten en enfrentar una nueva visualización de los objetos de conservación otrora concebidos bajo un modelo de clima poco cambiante. Ahora, la adaptación conlleva inicialmente, identificar como los procesos que proveen de estructura y función a los ecosistemas se modifican bajo nuevas condiciones de clima.

Esto puede lograrse mediante mecanismos que aumenten la resiliencia de los ecosistemas ante el estrés asociado al clima, pero también asociados a las amenazas de las actividades humanas. Con las acciones de adaptación se esperaría que los ecosistemas continúen proveyendo los servicios básicos que se espera de ellos. Es entonces necesario identificar la eficiencia de los mecanismos ya establecidos en las ANP encaminados a la conservación, tales como el aprovechamiento sustentable, el pago por servicios ambientales y de restauración ecológica.

En el Programa Especial de Cambio Climático (PECC) 2008-2012 elaborado en México se establece que en materia de ecosistemas deben cumplirse las siguientes objetivos generales:

- a) Preservar, ampliar e interconectar los ecosistemas naturales prioritarios y su biodiversidad considerando las potenciales afectaciones relacionadas con el cambio climático.
- b) Profundizar el conocimiento sobre los impactos y la vulnerabilidad de los bosques, selvas, matorrales, pastizales y humedales interiores ante la variabilidad natural del clima y el cambio climático.
- c) Definir y mantener las capacidades de disminución de riesgos y amortiguamiento de los impactos de los ecosistemas acuáticos continentales, costeros y marinos, ante los efectos del cambio climático.
- d) Preservar la integridad de las zonas marinas y costeras como medida de amortiguamiento ante impactos adversos y como depósitos y sumideros de CO₂.
- e) Proteger y preservar la biodiversidad de especies nativas en riesgo ante los efectos del cambio climático.
- f) Profundizar el conocimiento sobre los impactos y la vulnerabilidad de las especies indicadoras, clave e invasoras de interés especial ante los potenciales impactos del cambio climático

Para materializar los objetivos del PECC, la Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP) construyó las directrices generales de la Estrategia de Cambio Climático. A través de una serie de seis talleres regionales con personal de las Áreas Protegidas del país y con la asistencia de más de 100 actores clave, los autores colaboraron en la identificar las amenazas climáticas a los ecosistemas y se han identificado las acciones que la CONANP debe iniciar en el corto y mediano plazo para potenciar la adaptación al cambio climático. Dichas estrategias se describen de manera general en el documento titulado *Estrategia de Cambio Climático para Áreas Protegidas* (CONANP, 2010).

En este capítulo presentamos un recuento de la identificación de las amenazas regionales y las experiencias de los directores de las ANP con relación al cambio en el clima y sus efectos en la biodiversidad local. De la misma forma presentamos las líneas de investigación de tanto de las ciencias exactas como de las ciencias sociales que deben continuarse para el entendimiento de las relaciones locales y regionales de los ecosistemas conservados de México y su entorno climático. Si se orientan los esfuerzos de financiamiento a estas áreas, será posible alcanzar más rápidamente las metas que el gobierno federal se ha planteado en materia de cambio climático.

Generación de escenarios regionales de cambio climático para áreas protegidas

El IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change* por sus siglas en inglés) ha compilado información de experimentos de cambio climático realizado en los grandes centros de estudios climáticos del mundo. Dichos modelos corresponden a representaciones numéricas de los procesos físicos y dinámicos que tienen lugar en la atmósfera, océano y biosfera. Los modelos del clima son forzados con incrementos del forzante radiativo resultado de del incremento de gases de efecto invernadero. Por lo general, se consideran diversos modelos y condiciones iniciales para cada modelo, de forma tal que se cuente con todo un conjunto (ensamble) de escenarios de cambio climático. Por lo demandante del proceso, los modelos del clima originalmente usados en los informes del IPCC tienen resolución espacial del orden de 200 km X 200 km de resolución horizontal. Esto con frecuencia resulta burdo para poder sacar conclusiones de los impactos que el cambio climático puede tener. Es por ello que se han creado metodologías para obtener conclusiones regionales a partir de estimaciones de baja resolución espacial del clima.

Construir condiciones regionales o locales de clima a partir de modelos de circulación general (GCM por

sus siglas en inglés) requiere de entendimiento de la dinámica del clima en estas escalas y de técnicas de post-procesamiento de la información de los modelos del clima. Los métodos de post-procesamiento estadístico han sido exitosos en corregir muchos de los defectos inherentes a los modelos numéricos de la atmósfera y pueden usarse para interpretar y reducir la escala de los modelos del clima. Entre estos métodos destaca el *Model Output Statistics* (MOS) en la versión desarrollada por el IRI conocida como *Climate Predictability Tool* (CPT) que consiste en relacionar las salidas históricas del modelo con las condiciones regionales o locales observadas, y en usar dicha relación estadística o función de transferencia para post-procesar o regionalizar cada salida del modelo (IRI, 2003).

La reducción de escala no es simplemente un proceso de interpolación de una malla de baja resolución a una de alta resolución. Desde hace ya más de una década, el simple proceso de sumar una anomalía del GCM a una climatología de alta resolución espacial también ha sido superado por lo que en la actualidad se buscan esquemas que cumplan con ciertas consideraciones físicas, y en el contexto de que las proyecciones del clima, éstas deben ser probabilísticas. En el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM se construyeron los escenarios regionales mediante el proceso descrito arriba para reducir la escala espacial de cada uno de los modelos usados por el IPCC en su Cuarto Informe de Evaluación (2007) (aproximadamente 20 modelos). Los escenarios regionalizados tienen escalas de 50 km X 50 km y han servido de base para estudios de impacto potencial. Los datos se encuentran disponibles en el INE (<http://zimbra.ine.gob.mx/escenarios/>). Con base en la salida de dichos modelos se identificaron los cambios en el clima a escala de las regiones administrativas de la CONANP.

Región Península de Yucatán y Caribe Mexicano

La climatología regional indica que las zonas de mayor temperatura media se localizan en las regiones cercanas a las costas del Mar Caribe como a las del Golfo de México entre los 24 y 26°C, mientras que los eventos extremos de temperatura (por arriba del percentil 90 de su distribución) se presentan en las regiones cercanas al Golfo entre los 36 y 37°C. Durante el siglo XX la temperatura mínima de la región aumento entre 0.5 y 1°C en el oriente de la península. Esta tendencia continuará durante el siglo XXI de acuerdo con los

escenarios regionales con base en escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero A1B y A2. Cambios 1.5°C a 2°C en la temperatura media se esperan entre 2040 a 2070 en la región (Ilustración 5)*. Cabe recordar que el escenario de emisiones A2 presenta un incremento mayor en la temperatura seguido del escenario A1B (Magaña & Caetano, 2007)

Esto significa que bajo escenarios de cambio climático, no solo cambiarán los valores medios, sino que los eventos de temperatura extrema serán más intensos, es decir, las ondas de calor serán más intensas. Para el caso de la precipitación los escenarios regionales sugieren una disminución entre el 10 y 20% con respecto al valor actual para los periodos 2070 y 2100 para el mes de junio localizados al norte y sur de la península.

En la región Occidente y Pacífico Centro, Región Centro Eje Neovolcánico, Región Planicie Costera y Golfo de México las amenazas climáticas estarán representadas por precipitaciones extremas, huracanes y nortes y eventos de sequías cuyas consecuencias pueden ser modificaciones en el terreno por efectos de la erosión pluvial, fragmentación de los hábitats por el aumento en la escorrentía. La presencia de huracanes puede originar cambios en los servicios ecosistémicos y las sequías pueden originar aumento en la frecuencia de plagas como el gusano soldado en los bosques templados y el estrés hídrico de la vegetación entre otros. Estudios sobre huracanes bajo cambio climático sugieren un aumento en la intensidad de los ciclones tropicales en el Golfo aunque son necesarios más estudios al respecto. De cumplirse dichos escenarios las poblaciones cercanas a las costas y sus ecosistemas deben habilitar estrategias para enfrentar dichos fenómenos.

Análisis de la tendencia de la precipitación en el siglo XX sugieren un aumento en la precipitación y su intensidad. Los escenarios regionales para México para el escenario A1 indican un aumento de la temperatura entre los 2.5 a los 3°C en el centro del país, Golfo de México y costas del Pacífico Sur para el periodo 2070-2099. Por otro lado, la precipitación para ese mismo periodo se estima disminuirá entre el 5 y 20% para el escenarios A2 en donde los mayores cambios se esperan en Guerrero y Michoacán en las regiones del río Balsas.

Por otro lado en la configuración de la topografía de Chiapas le confiere la característica de un gran gradiente térmico y de precipitación que caracterizan su clima

* Nota: La Ilustración se encuentran en las páginas 113

actual. Las tendencias de la temperatura en el último siglo es positiva con cerca de 0.5 o 1°C. Los escenarios de cambio climático sugieren un aumento en la anomalía de entre 1 a 4°C con respecto al valor actual. Por otro lado la precipitación de los escenarios A y B para el estado indican una disminución de entre 40 y 80% con relación a la actual.

Los ensambles de modelos para escenarios regionales indican un aumento en la temperatura para los escenarios A2 y A1B entre los 1.5 a 2.5°C. Mientras que la precipitación indica poco cambio en la precipitación en la mayor parte del estado del sur.

La región noroeste de México presenta temperaturas entre los 14 y 25°C y valores de precipitación entre los 200 a 600 mm al año y los eventos meteorológicos con mayor frecuencia en la región continental están representados por las sequías y las inundaciones, mientras que en la región peninsular son los huracanes los fenómenos de mayor impacto en la población. Estudios sobre la tendencia de la precipitación en el noroeste han indicado un aumento en la lluvia en los últimos cien años. Lo contrario se observa en el noreste del país. Las proyecciones de temperatura en Sonora indican una oscilación en los últimos 90 años, sin embargo las tendencias a futuro indican cambios entre 0.5 a 5°C para el presente siglo para los escenarios de emisiones A y B. Los cambios en la precipitación pueden oscilar entre menos 20 o menos 70% de precipitación para lo que resta del siglo XXI.

Los escenarios regionales para el norte de México para los meses de verano indican una alta probabilidad de presentar valores extremos (tercil superior de una distribución de datos) principalmente en Sonora y Baja California Sur, Sinaloa y Durango para el periodo 2010-2039. En el caso de la lluvia la probabilidad de presencia de valores extremos está entre el 40 y 50% en Sonora, Sinaloa, Durango, San Luis Potosí y Tamaulipas.

En resumen, en el norte del país las principales amenazas asociadas al clima en el noroeste serán las sequías con impactos como la pérdida de cosechas, incremento en el material combustible para los incendios forestales, disminución de los caudales y aumento en las poblaciones de especies invasoras. Por otro lado, el aumento en la temperatura del mar impactará en las especies marinas promoviendo la migración de especies a zonas de mayor profundidad o de mayor latitud, cambios en la estructura de bosques y selvas así como en los ciclos reproductivos de aves y reptiles y de las algas marinas. Atendiendo al aumento en la intensidad

de los ciclones tropicales deben esperarse modificaciones en la termoclina y de los procesos erosivos costeros (McLeod y Salm, 2006; Gilman, et al., 2008).

Identificación de amenazas regionales

De acuerdo con los actores clave de las ANP, los fenómenos climáticos que representan mayor peligro son el aumento en la intensidad de los huracanes, el incremento de la temperatura del mar, el incremento del nivel del mar, las precipitaciones extremas y las sequías prolongadas, cambios en el régimen de lluvias. Sobre el grado de peligro y la vulnerabilidad regional se indicó que exista un aumento en su frecuencia o su intensidad (huracanes y aumento del nivel del mar). En la península de Yucatán y el Caribe el origen de la vulnerabilidad es la pérdida de hábitat en las regiones costeras, pérdida de cobertura vegetal en manglares principalmente y el aumento de las zonas turísticas.

Con relación al efecto de los huracanes, se indicó por parte de estos actores en las ANP que la resiliencia de los manglares es alta por lo que lo que no es tema de preocupación para los manejadores de recursos. Sin embargo, ante el evento es importante conocer los escenarios de frecuencia, intensidad y trayectorias. Otra de las amenazas es el aumento en la temperatura de la superficie del mar que de acuerdo con los directores de ANP se ha registrado mortalidad de arrecifes coralinos, cambios en los niveles de clorofila y productividad. Con relación a los cambios en los patrones de precipitación, se consideró que siendo la hidrología regional de tipo subterránea se espera una disminución en la recarga y posibles cambios en los procesos de sedimentación y su efecto en las zonas de manglar.

En esta región las amenazas de cambio climático más importantes son el aumento del nivel del mar, cambios en la temperatura de la superficie del mar, cambios en la frecuencia e intensidad de los huracanes y cambios en los patrones de precipitación. Los impactos previstos son la desaparición de vegetación hidrófila costera y la intrusión salina, así como disminución o muerte de los arrecifes coralinos y cambios en el nivel de clorofila y productividad marina. Los cambios en los patrones de precipitación sugieren efectos en la hidrología subterránea de la región y en los procesos de sedimentación. Otros impactos pueden ser migración o desaparición de los arrecifes coralinos, modificación de las pesquerías de langosta (probablemente mayores áreas de captura al aumentar la temperatura del mar), el deslizamiento de la línea de costa, acidificación de los océanos, cambios de salinidad en el océano y áreas de

humedales, la afectación a los movimientos de las masas de agua oceánicas, la reducción o desaparición de especies sensibles, cambios en los regímenes alimenticios de las especies, aumento del número de plagas y enfermedades, disminución de poblaciones ictiológicas.

Las regiones del nuestro país Occidente y Pacífico Centro, Región Centro Eje Neovolcánico, Región Planicie Costera y Golfo de México se identificaron como prioritarias en los esfuerzos conjuntos de la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) y CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) para mantener del ciclo hidrológico, reforestación, prevención de incendios y pago de servicios ambientales. El caso concreto es el efecto de la variabilidad climática en las plagas forestales. La presencia de descortezadores es un problema abordado desde el punto de vista forestal y productivo pero no desde el punto de vista integral como estrategias de conservación de la biodiversidad. En 1998 se presentó una plaga de descortezador, pero la causa fue un estrés hídrico, por lo que es necesario revisar si las condiciones climáticas actuales que pueden originar nuevamente el problema. El aumento de la temperatura puede tener efectos esperados en los ecosistemas son la aparición de plagas como gusano soldado, la plaga del huaje, el estrés hídrico e incendios forestales. Los elementos que ocasionan vulnerabilidad son: un deficiente monitoreo climático de corto y largo plazo; la falta de estrategias de respuesta, el mal uso del fuego.

Para las ANP de Laguna Madre, Marismas Nacionales, Laguna de Términos, Los Tuxtlas, Chamela-Cuixmala, se identificaron como principales amenazas climáticas los huracanes y nortes, las sequías, las inundaciones y el aumento del nivel del mar. Los impactos esperados son: cambios en la estructura y funcionalidad de los ecosistemas (manglares, selva baja inundable, corales, pastos marinos, ciclos biológicos de especies de importancia para pesquería y aves migratorias) en la infraestructura portuaria, petrolera, modificaciones en la distribución de las especies enlistadas en la NOM 059, posibles desplazamiento de población humana y la consecuente invasión de ANP, la fragmentación de hábitat y pérdida de los servicios hidrológicos.

Para las ANP del Eje Volcánico las amenazas principales son sequías, lluvias intensas y aumento en las temperaturas y los efectos esperados son estrés hídrico más prolongado y los impactos esperados son el efecto de las sequías en los bosques templados susceptibles a eventos prolongados o cambio en la estacionalidad de las lluvias, la migración o desplazamiento de las especies y disminución en los caudales de los ríos. Por otro lado,

el aumento de las temperaturas modificará la cobertura de los glaciares afectando manantiales y caudales originados por los deshielos en la Sierra Nevada.

En la frontera sur de nuestro país las amenazas más importantes identificadas fueron las inundaciones en temporadas de lluvias por la tala inmoderada en la parte alta de la región Lacandona, el aumento de la temperatura en temporada de primavera y verano. Así como las sequías y los huracanes y el aumento o disminución de los extremos de temperatura. De los eventos extremos más recientes se resaltan las inundaciones de 2007 en la comunidad lacandona, 2008 en la comunidad Chol, así como las sequías en la selva Lacandona en Lacanjá en 2009.

La vulnerabilidad se presenta en dos líneas, la presencia de plagas y los eventos extremos de precipitación. En el primer caso se presentaron como ejemplos incendios forestales en periodos de sequía muy prolongados, además es un área tropical con humedales en la cual las lluvias juegan un papel importante en los ciclos biológicos del ecosistema. Las selvas tropicales se ubican en sistemas cársticos incrementando los incendios por sequías prolongadas o bien presencia de incendios subterráneos. La Reserva de la Biosfera El Triunfo al estar situada en una serranía, en línea paralela a la costa del Pacífico, a una distancia parteaguas – costa de entre 40 y 60 km; en su ladera norte se encuentra expuesta a la región más seca de Chiapas en donde es común el riesgo de incendios forestales por el incremento del volumen de combustible.

Para el caso de las precipitaciones extremas y sus consecuentes inundaciones, se pueden citar los ejemplos de el caso del Monumento Natural Yaxchilán los márgenes del Río Usumacinta se han incrementado aumentando el riesgo de inundación. Relictos de bosque mesófilo de montaña, susceptibles tanto a los deslaves como al incremento de temperatura y en el caso de los huracanes, en el área marina, los arrecifes de coral son afectados en época de huracanes.

En esta región, esfuerzos encaminados a la reducción de emisiones mediante mercados voluntarios de captura de carbono han sido ubicados como estrategias prioritarias de la CONANP, sin embargo el tema de la adaptación aún no se ha establecido en sus planes de manejo. Algunas ANP como La Sepultura, Ocote, Chacahua, Tacaná, El Triunfo ya incorporaron el componente de cambio climático hasta las metas acordadas al PECC bajo el rubro de protección en sus planes de manejo sin embargo, los actores clave opinan que el

tema debe ser transversal y orientado a respuestas más concretas en términos de conservación y servicios ecosistémicos.

En las regiones de la península de Baja California y en las regiones Norte y Noroeste del Pacífico, las amenazas climáticas más importantes son las sequías, el aumento en temperaturas, los huracanes, el fenómeno de El Niño que afecta la condición térmica de las aguas oceánicas circundantes así como el aumento del nivel del mar. Los sistemas más vulnerables son las poblaciones de anfibios, reptiles y peces en peligro así como plantas endémicas y en estatus de conservación. Los eventos de lluvias extremas ocasionan deslave de laderas (remoción de la vegetación) por efecto de lluvias extremas durante el impacto de huracanes. En los ecosistemas marinos, los cambios en la temperatura de la superficie del mar afecta a los arrecife de coral del Golfo de California de alta diversidad y un descenso de especies (anchoveta, macarela y sardina). Algunas poblaciones de aves se verán amenazadas al modificar sus condiciones de anidación: por ejemplo, el 60 % de la metapoblación de pelicano pardo de California anida en las Islas de los Archipiélagos de San Lorenzo, Bahía de los Ángeles, Ángel de la Guarda y las Encantadas.

En las regiones del norte y sierra Madre occidental así como en la región Norte de la Sierra Madre oriental las sequías prolongadas causan principalmente incendios, plagas y enfermedades forestales. Por ello debe ponerse atención en los balances hidrológicos naturales cuya modificación se refleja en la disminución de la cobertura vegetal. Algunos actores clave apuntaron que en los últimos años han disminuido el número de nevadas con la consecuente disminución de recarga por deshielo. La creciente desertificación contribuida también a la pérdida de hábitat y de la belleza escénica de los paisajes de atractivo turístico de las ANP. Finalmente las precipitaciones extremas en la región han contribuido a la disminución de la calidad del agua y la afectación de vegetación riparia en la región.

Las propuestas para la adaptación

Dentro de las propuestas de los actores clave de las ANP se destacan las siguientes:

- El establecimiento de nuevas áreas protegidas.
- Utilizar modelos de cambio climático para el establecimiento de ANP
- Educación para la sustentabilidad.
- Priorizar la obtención de indicadores ambientales particularmente para aquellas áreas sensibles al cambio climático, o que sean importantes para enfrentar este fenómeno.

- Utilizar la agenda de Cambio Climático para la búsqueda de oportunidades y recursos con miras a la conservación de áreas y especies.
- Evaluar las especies con respecto a su resiliencia y establecer una lista jerarquizada.
- Identificar acciones de mitigación y adaptación
- Contar con un monitoreo meteorológico y climatológico especial para ANP
- Identificar los atributos específicos que se deben monitorear a nivel ecosistémico, ambiental y biológico para evaluar los impactos del cambio en el clima.
 - o Trabajo en el fortalecimiento comunitario, a fin de hacer conscientes a los habitantes de las ANP sobre las amenazas a los recursos naturales y a sus comunidades, principalmente por los desastres desencadenados por cambio climático.

Necesidades de investigación

Durante los talleres de participación se identificaron cinco líneas conductoras para promover investigación en torno a la adaptación al cambio climático.

a. *Permanencia y flujo de los bienes y servicios y ecológicos.* Consiste en monitoreos de cobertura, distribución y salud vegetal y escenarios de distribución de ecosistemas a distintos plazos.

b. *Adaptación asistida (humana y ecológica).* Sistemas, técnicas y estrategias de manejo: conectividad, restauración y aprovechamiento para reducir la vulnerabilidad ecológica y social de las ANP. Estrategias de planeación y diseño de políticas nacionales y regionales para la adaptación y la conservación de las ANP y nuevos sitios a proteger. Al mismo tiempo que se requiere identificar índices de riesgo y vulnerabilidad: construir mapas sobre riesgos potenciales, coordinados entre las instituciones responsables.

c. *Climatología física y bioclimatología aplicada a la adaptación.* Para ello se requieren modelos y escenarios climáticos a distintos plazos. Se requiere un monitoreo sistemático de la información climática en ANP y aplicar modelos bioclimáticos y escenarios de distribución de especies y ecosistemas.

d. *Amenazas e impactos en los ecosistemas y la biodiversidad.* Es imperativo identificar el desplazamiento, redistribución y extinción de especies, poblaciones y ecosistemas así como los efectos en la fenología de las especies del cambio en la estacionalidad del clima y los potenciales efectos en la productividad y eficiencia ecológica.

e. *Información y monitoreo preciso de los acervos de carbono y la cobertura vegetal en ANP*

Mediante el monitoreo satelital y en campo para dinámicas de cambio de uso de suelo a escalas

f. *Investigación sobre las dinámicas de almacenamiento, intercambio y emisión de carbono en los ecosistemas (marinos y terrestres) definidos.* Para ello se requiere el desarrollo y análisis de metodologías y técnicas de verificación y monitoreo a escalas y para cantidades, flujos y fisiología de los procesos de captura y almacenamiento.

Conclusiones

De la reunión con los actores principales de las ANP es evidente el amplio conocimiento sobre el tema del cambio climático entre los directores de las Áreas Protegidas y Directores regionales. Las encuestas previas indicaron que en general existe una clara idea de las amenazas de tipo climático a la biodiversidad y a la conservación. Los participantes de los talleres lograron identificar y separar aquellos elementos de cambio climático relacionados con sus zonas de aquellas amenazas antropogénicas o no climático que se traducen en vulnerabilidad de los ecosistemas. El grado de compromiso de los directores con sus ANP quedó demostrado por la preocupación que mostraron al indicárseles las tendencias actuales y futuras en la temperatura, precipitación, huracanes y nivel del mar de cada región.

La experiencia, muchas veces no documentada, de los directores de ANP sobre los impactos observados en las especies y ecosistemas, resultó de trascendental importancia para estos talleres. Las evidencias del cambio climático en México aún son difíciles de hallar y en las reuniones se lograron reunir un buen número de indicadores relativos a la biodiversidad y la conservación.

Ante la amenaza de cambio climático se hace necesaria una revisión de los conceptos de conservación y restauración de los sistemas naturales, ya que la mayoría de los mecanismos planteados por mandato por la CONANP se basan en escenarios actuales y no tendenciales, no sólo bajo cambio climático sino sobre las presiones a los servicios ambientales que proveen. El tema de la falta de investigación sobre tolerancias, resiliencia y umbrales de sensibilidad de especies y ecosistemas, fue un tema recurrente de los talleres. Es necesario crear estrategias que aseguren que la información científica obtenida en las ANP sea reportada continuamente por los investigadores. Se hace necesario también identificar las preguntas de relevancia sobre

impactos de cambio climáticos regionales y con base en ellas enlistarlas en los llamados de necesidades de investigación del CONACYT.

Los mecanismos de creación de zonas de amortiguamiento, facilitación de corredores biológicos, conservación *in situ* y traslocación de especies deben ser las directrices futuras ante la posibilidad de encontrar una baja resiliencia de los sistemas naturales al cambio climático. A este respecto hace falta aún investigación.

En resumen, las líneas prioritarias para la adaptación que debe incluir la Estrategia de Cambio Climático de la CONANP son:

1. **Biológica:** Adaptar el objeto de conservación de los ecosistemas actuales bajo un escenario de clima cambiante, dependiente de la dirección y tiempos de su respuesta
2. **Social:** Adaptar el uso que se hace del los recursos en respuesta del sistema al clima cambiante. Esto requerirá de adaptarse a los nuevos servicios del ecosistema y revisar los objetivos de la conservación.
 - a. Cuatro componentes básicos deben considerarse para orientar acciones concretas de adaptación:
 - b. *Investigación* para entender los procesos ecológicos y determinar las especies clave para el entendimiento del sistema
 - c. *Proyectar* cómo el cambio climático podría afectar a especies clave y los procesos ecológicos en el tiempo
 - d. *Monitoreo* de especies clave y procesos ecológicos para detectar cambios en el tiempo y determinar los agentes de cambio
 - e. Comunicar el conocimiento adquirido para ayudar a adaptar en un marco de manejo de riesgo ante cambio climático.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Comisión Nacional de Áreas Protegidas la oportunidad de interactuar con los directores de área, así como al Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza A.C. los apoyos para la realización de los talleres participativos. Agradecemos a los cien representantes de la CONANP y especialmente a Mariana Bellot y Paulo Quadri (CONANP), por invitarnos al proceso de construcción de una estrategia de cambio climático de dicha institución.

Literatura citada

- CBD: Convention of Biological Biodiversity. 2009.** *Connecting biodiversity and climate change. Mitigation and adaptation.* CBD Report to the Second Ad hoc Technical Expert Group on Biodiversity and Climate Change. Montreal. Technical Series Num. 41. 126 pp.
- CONANP, Comisión Nacional de Áreas Protegidas, 2010.** *Estrategia de Cambio Climático para Áreas Protegidas.* México. Disco compacto.
- Dávila, P. & O. Téllez. 2003.** Protected areas and climate change: A case study of the cacti in the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, Mexico. *Conservation Biology* 17: 846-853.
- Gilman, E.L., J. Ellison, N. Duke, & C. Field 2008,** Threats to mangroves from climate change and adaptation options: A review, *Aquatic Botany* 89, 237–250
- Gómez, L. & L. Arriaga. 2007.** Modeling the effect of climate change on the distribution of oak and pine species of Mexico. *Conservation Biology* 21 :1545-1555.
- IPCC. 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis.** *Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.* Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación). IPCC, Ginebra, Suiza.
- IRI. International Research Institute for Climate Change and Society, 2003.** Climate Predictability Tool. IRI. Universidad de Columbia. EU.
- McLeod, E. & R. Salm 2006.** Managing Mangroves for Resilience to Climate. UICN. Report r Series - No 2, 66 pp
- Magaña, V. & E. Caetano 2007.** Pronóstico climático estacional regionalizado para la República Mexicana como elemento para la reducción de riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del sistema: cambio climático por estado y por sector. Informe de Proyecto. Instituto Nacional de Ecología. 41 pp.
- Magaña, V. y Gómez-Mendoza, L. 2009.** Cambio climático y Biodiversidad. *El capital Natural de México.* Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), México.
- Magaña, V. y Zermeño, D. 2008.** *Análisis probabilístico de escenarios esca-lados de precipitación y temperatura de cambio climático en México.* Informe Técnico. Instituto Nacional de Ecología. En preparación. México.
- Peterson, A.T., M.A. Ortega-Huerta, J. Bartley, V. Sánchez-Cordero, J. Soberón et al. 2002.** Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature* 416 : 626-629.
- PNUD. Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo. 2001.** *Marco de Políticas de Adaptación.* Banco Mundial. Banco Mundial.
- Semarnat. 2001.** México. *Primera comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.* Semarnat, México.
- Semarnat. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2009.** *Programa Especial de Cambio Climático.* Semarnat. México.
- Semarnat-INE. 2007.** *Tercera comunicación de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.* Instituto Nacional de Ecología, Semarnat, México.
- Soberón, J., y A.T. Peterson. 2005.** Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics* 2: 1-10.
- Von Maltitz, G.P., R.J. Scholes, B. Erasmus and A. Letsoalo. 2006.** *Adapting Conservation Strategies to Accommodate Impacts of Climate Change in Southern Africa.* AIACC Working Paper No. 35.

Capítulo V

El efecto de El Niño en ecosistemas semiáridos: un estudio de caso sobre la fenología de arbustos en el centro-sur de México

Numa P. Pavón y Oscar Briones

Resumen

El fenómeno océano-atmosférico El Niño está asociado con variaciones climáticas que en el centro de México provoca sequía de verano. En este capítulo aportamos información sobre el efecto de El Niño sobre la fenología de cuatro especies de arbustos dominantes, dos caducifolios y dos perennifolios, en un ecosistema semiárido de la reserva de la biosfera Tehuacán-Cuicatlán. Durante el evento de El Niño de 1997, registramos una fuerte reducción en la precipitación de verano y como consecuencia de la sequía hubo una disminución en la producción de hojas y flores, en las cuatro especies estudiadas. La caída de las hojas ocurrió bajo potenciales hídricos del suelo más negativo que los registrados en 1996. Se obtuvo una correlación significativa entre la humedad relativa con los patrones de foliación de las cuatro especies estudiadas. En ecosistemas semiáridos la respuesta fenológica de los arbustos a sequías impredecibles, como las asociadas con el fenómeno de El Niño, esta relacionada con las diferentes estrategias de tolerancia al estrés hídrico características de cada forma de vida vegetal (arbustos deciduos y arbustos perennifolios). Aunque, recientemente se ha incrementado la literatura sobre el efecto del El Niño en los ecosistemas terrestres, el conocimiento aún es limitado. Debido a la baja predictibilidad y naturaleza a largo plazo del fenómeno es difícil evaluar el efecto de El Niño. Por lo anterior se propone su estudio a partir de establecer parcelas de observación a largo plazo, por lo menos 10 años, en diferentes ecosistemas terrestres en México.

Palabras clave: El Niño, ENSO, matorral, ecosistema semiárido, Zapotitlán.

Abstract

El Niño is an ocean-atmospheric phenomenon associated with climatic variations. In central Mexico, this phenomenon generates summer droughts. In this chapter, we provide some information about effect of El Niño on phenological patterns of four shrubs species (two deciduous species and two evergreen species) in a semiarid

ecosystem of the Biosphere Reserve Tehuacán-Cuicatlán. During El Niño de 1997, we registered a sharp decline of summer precipitation. This drought caused a decrease in leaves and flowers production in all study species. The leaf fall occurred at low soil water potential, lower than in 1996 (no-El Niño year). We obtained a significant correlation between air humidity with leaf phenology in all species. In semiarid ecosystem, shrub's phenological response to unpredictable droughts, associated with El Niño, are related with different strategies to water stress tolerance of each plant life form. Although, papers have increased about the effect of El Niño in terrestrial, the knowledge is still scanty. This is because to low predictability and long-term nature of the phenomenon. Therefore it is proposed to study by long-term experimental plots in different terrestrial ecosystems in Mexico.

Keywords: El Niño, ENSO, Shrubland, semiarid ecosystems, Zapotitlan.

Introducción

El Niño o también llamado ENSO (El Niño Oscilación del Sur), es un fenómeno océano-atmosférico que provoca alteraciones climáticas importantes en los patrones de temperatura y precipitación en diferentes zonas del planeta. Uno de los efectos más importantes de El Niño son las intensas sequías que ocurren en regiones extensas de Australia, África, Eurasia y Norteamérica (Glantz, 2001; Philander, 2004; Meyn *et al.*, 2009; van der Kaars *et al.* 2010). Aunque puede parece contra intuitivo, los eventos de precipitaciones extremas que ocurren en amplias regiones sudamericanas también están asociados al fenómeno del Niño. Entre las zonas más afectadas por estas lluvias intensas se encuentran las costas del Atlántico en países como Perú y Chile.

El fenómeno de El Niño tiene un fuerte efecto sobre los ecosistemas, en particular sobre la productividad primaria de los sistemas áridos y semiáridos, debido a que son sistemas ecológicos fuertemente limitados por el agua (D'Aleo, 2002; Holmgren *et al.*, 2001; Holmgren *et al.*, 2006a).

En los ecosistemas áridos de la costa sudamericana, como en el Atacama, el incremento de la lluvia durante episodios de El Niño es crucial para el reclutamiento de diversas especies vegetales, la productividad y el mantenimiento de la biodiversidad (Holmgren *et al.*, 2006a; Holmgren *et al.*, 2006b).

En la zona centro-sur de México, donde se encuentran amplias extensiones de los estados de Querétaro, Hidalgo, Estado de México, Tlaxcala y Puebla, los eventos de El Niño están asociados con la presencia de sequías de variada intensidad. El efecto de estas sequías sobre los ecosistemas de México no han sido completamente evaluados (D'Aleo, 2002). Una zona de gran importancia ecológica por mantener una alta biodiversidad de flora y fauna característica de ecosistemas semiáridos es la que se encuentra limitada por la reserva de la biosfera Tehuacán-Cuicatlán. La reserva se localiza en la zona sur del estado de Puebla y en el noreste del estado de Oaxaca; tiene un clima semiárido con una marcada época de lluvias que permite hacer predicciones sobre la precipitación total anual (Valiente, 1991).

Durante el evento de El Niño 1997-98, considerado el más fuerte del siglo pasado y de lo que va del XXI, se registró una fuerte modificación en el régimen de lluvias debido a la intensa sequía ocurrida durante el verano de 1997 (Changnon, 1999; Mcphaden, 2002). En este capítulo se reportan los resultados de un estudio comparado de los patrones fenológicos de cuatro especies dominantes del matorral desértico de Tehuacán-Cuicatlán, durante un año (1996) con un patrón de lluvias similar al promedio de largo plazo y otro año (1997) caracterizado por una aguda y desproporcionada sequía provocada por el fenómeno de El Niño.

Estudio de caso

El sitio de observación fue la localidad de Zapotitlán de las Salinas, Puebla, ubicado dentro de la reserva de la biosfera (18° 20' N, 97° 28' W). El clima de la localidad es seco con una marcada época de lluvias (mayo a octubre). La precipitación promedio anual es de 410.5 mm (promedio de registros de 1969 a 1997). Cuando ocurren eventos de El Niño en el sitio, la lluvia de verano decrece notoriamente en comparación con otros años sin evento de El Niño. Durante el evento de El Niño de 1997 ocurrió una sequía extraordinaria con un déficit hídrico de 25%, con respecto a la precipitación promedio anual (Figs. 1a, b).

Otras variables ambientales registradas durante el periodo de 1996-1997, fueron la temperatura, la humedad del aire, la evaporación, el potencial hídrico

del suelo (PHS) y la humedad del suelo (Fig. 2). Además, se estimó, para ese periodo de tiempo, la radiación y el fotoperiodo. La temperatura promedio anual del sitio fluctuó entre 18° y 22° C durante el periodo de 1996-1997 (Fig. 2). La humedad del suelo y el potencial hídrico del suelo tuvieron un decremento durante el verano de 1997, con respecto al año previo. Se estimó un pico muy marcado en la radiación solar durante el periodo de junio-agosto de 1997, que no ocurrió en 1996. La evaporación fluctuó a lo largo del año, se observa una relación positiva con la radiación durante los meses de invierno, en ambos años de estudio (Fig. 2b).

Las observaciones fenológicas se realizaron en dos especies de arbustos deciduos y dos especies perennifolias que son dominantes del matorral crasicale de la reserva de la biosfera Tehuacán-Cuicatlán. Los arbustos son la forma de vida vegetal dominante en ecosistemas desérticos. Dependiendo de la especie y las condiciones ambientales, los arbustos pueden mantener su follaje o permanecer desfoliados durante un periodo de tiempo, generalmente durante la época seca (en ecosistemas semiáridos) (Reynolds *et al.*, 1999). Los arbustos deciduos o semi-deciduos están representados por especies que prosperan en ambientes que tienen una predecible estación seca, donde una reducción de la superficie de transpiración es una importante estrategia de supervivencia a la sequía (Casper *et al.*, 2001). Sin embargo, como consecuencia de perder sus hojas las plantas no pueden fijar carbón durante ese periodo. Los arbustos deciduos de ecosistemas áridos estacionales responden directamente a los incrementos en la humedad del suelo (Pavón & Briones, 2001). Por otro lado, los arbustos perennifolios mantienen sus hojas durante la sequía y el remplazo de las hojas ocurre sin que se pierda completamente el follaje (Kikuzawa, 1991; Reynolds *et al.*, 1999; Pavón & Briones, 2001). Esto debido a las reservas de agua que se encuentran tanto en los tejidos de las plantas como en el suelo (manto freático). Por lo anterior, los arbustos con capacidad para utilizar reservas de agua son relativamente independientes de los pulsos de agua y por consiguiente de la frecuencia de la humedad del suelo o agua disponible generada directamente por las lluvias. Se ha relacionado la pérdida de hoja por senescencia con una disminución del potencial hídrico del suelo (PHS). En especies deciduas la pérdida de hojas ocurre cuando el PHS se encuentra entre -0.5 y -1.0 MPa, mientras que en especies perennifolias acontece cuando el PHS está entre -1.5 to -2.0 MPa (Williams *et al.*, 1997). En regiones con sequías estacionales la variación de PHS ocasiona que las especies deciduas pierdan sus hojas uno o dos meses antes que las perennifolias (Williams *et al.*, 1997).

Fig. 1 Distribución de la precipitación en la estación meteorológica de Zapotitlán de las Salinas en la reserva de la biosfera Tehuacán-Cuicatlán, durante 1979 a 1997. (a) Precipitación total en verano (considerando solo los meses de julio a septiembre), las barras blancas indican valores promedio obtenidos en 28 años, las barras negras indican periodos con eventos de El Niño; (b) precipitación total mensual, las barras blancas indican valores promedio obtenidos en 28 años, las barras con rayas indican los valores en 1996 (año sin El Niño), las barras negras indican los valores en 1997 (año con El Niño).

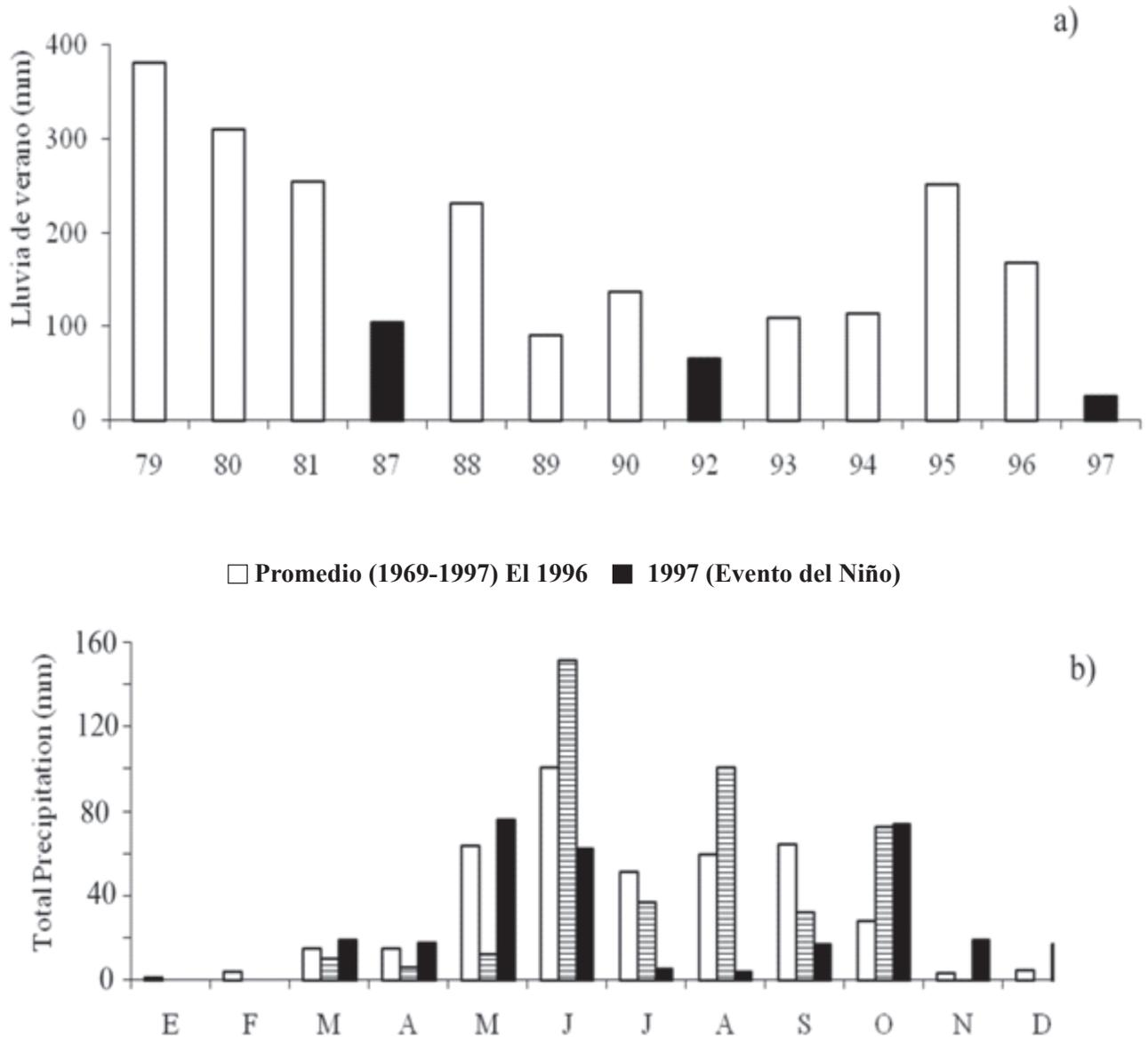
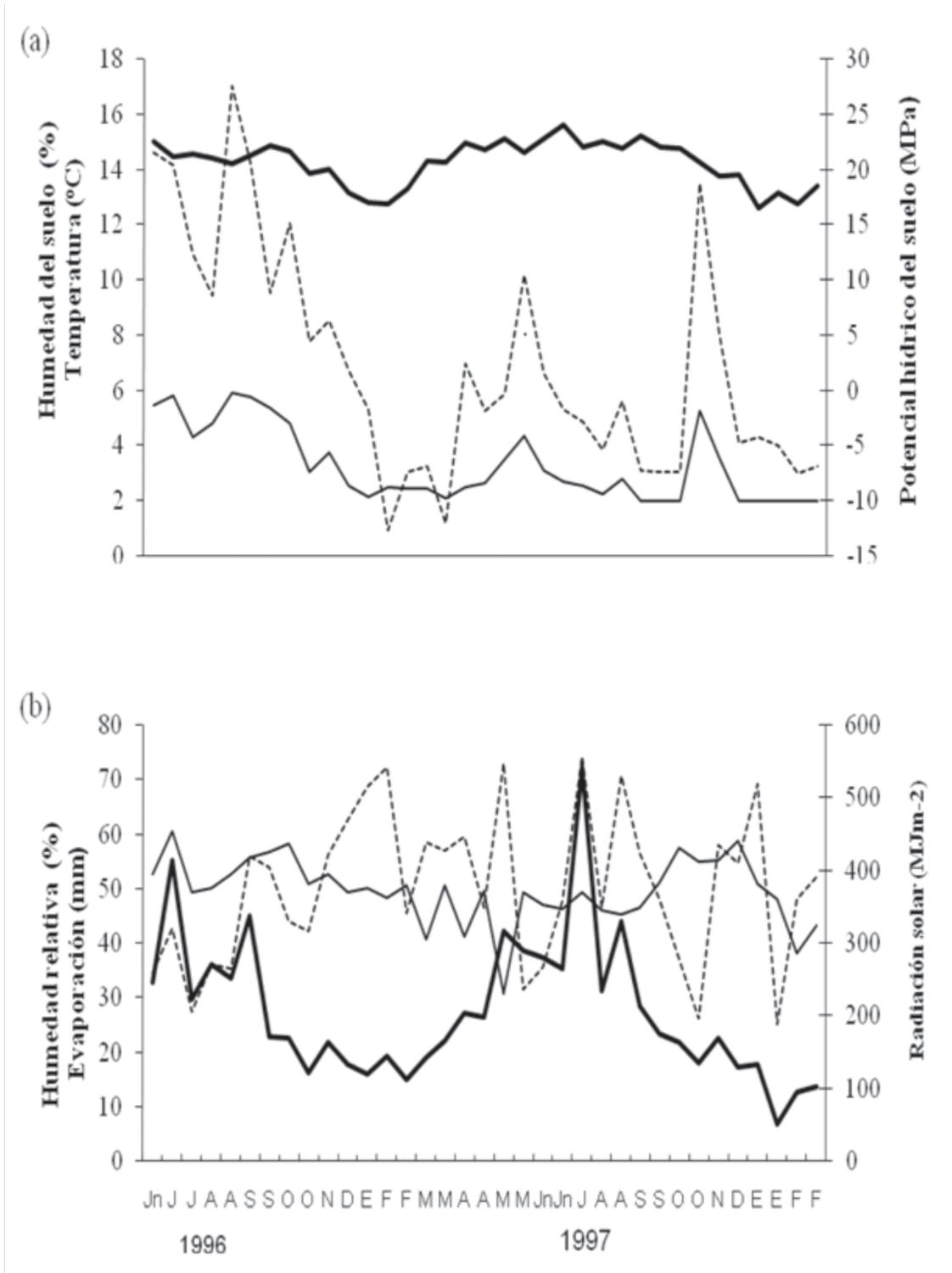


Fig. 2. Variación ambiental en la localidad de Zapotitlán de las Salinas, en la reserva de la biosfera Tehuacán-Cuicatlán, durante 1996 y 1997. (a) temperatura del aire (línea gruesa continua), potencial hídrico del suelo (línea delgada continua) y humedad del suelo (línea discontinua) a 10 cm de profundidad; (b) humedad relativa (línea continua), evaporación (línea discontinua) y radiación solar (línea gruesa).



Los individuos seleccionados para el registro fenológico se encontraban dentro de un área delimitada de 0.5 ha, ubicada sobre una ladera con orientación sur y con pendiente de 33°. El matorral crasicaule es el tipo de vegetación característico del sitio, donde las especies dominantes son arbustos microfilos espinosos y cactus columnares. La cobertura vegetal al interior de la parcela fue 3061.5 m², donde los arbustos representaron 82.4% y los perennifolios el 17.6%. Los registros fenológicos se realizaron en dos arbustos deciduos y dos perennifolios. Los primeros fueron *Mimosa luisana* Brandege (Mimosaceae) con 42.1% de la cobertura de la parcela y *Caesalpinia melanadenia* (Rose) Standley (Caesalpinaceae) que cubrió 26.6%. Los arbustos perennifolios fueron *Castella tortuosa* Liebm. (Simarubaceae) que solo cubrió 5.6% de la parcela y *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) (Mimosaceae) con una cobertura de 0.5%.

Se seleccionaron 10 plantas maduras y presumiblemente sanas de cada una de las especies estudiadas. De junio de 1996 a febrero de 1998 se registró quincenalmente el número de hojas y estructuras reproductivas de cada individuo seleccionado. La cuantificación de estructuras se realizó en 10 ramas marcadas cuando inició el crecimiento de cada planta.

Las mediciones de humedad del suelo y PHS se realizaron en muestras colectadas a 10 cm de profundidad en tres sitios, uno en el centro y dos en los bordes. El PHS se midió usando un microvoltmetro HR 33T y cámaras de presión C-52 (Wescor Inc. USA). La humedad del suelo se midió usando el método volumétrico considerando la pérdida de peso de la muestra al ser secada (Gardner et al., 2000). Los registros de precipitación, evaporación, temperatura y humedad relativa fueron obtenidos de una estación meteorológica localizada a 500 m de la parcela. El fotoperiodo y la radiación fueron estimados usando la latitud del sitio (Ezcurra et al., 1991).

Con los registros fenológicos y ambientales obtenidos durante el periodo de estudio, se construyeron modelos regresión múltiple para cada especie, considerando á d \bar{S} 0.05 como umbral para incluir o eliminar variables del modelo. En todos los modelos los registros fenológicos fueron considerados como las variables dependientes. Solo se consideraron los modelos significativos (á d \bar{S} 0.05) y los que tuvieron menor cantidad de variables independientes. Para disminuir la variación, previo a realizar los análisis de regresión los datos fueron ajustados con modelos polinómicos usando el programa JMP 4.0 (SAS, 2000). Para evaluar el efecto

del factor “evento de El Niño” (con y sin evento de El Niño) y el factor “forma de vida de las especies” (arbustos deciduos y arbustos perennifolios) se realizaron análisis de varianza con medidas repetidas (Scheiner & Gurevitch, 2001); se usaron dos periodos: junio de 1996 –febrero de 1997 (sin evento de El Niño) y junio 1997-febrero 1998 (con evento de El Niño). Para cumplir con la normalidad e igualdad de varianzas, los datos de número de hojas fueron transformados usando log₁₀ (dato + 1) (Zar, 1996). Los análisis estadísticos se realizaron usando el programa SYSTAT 10.0 (Systat 2000). No se realizaron pruebas estadísticas para la producción de estructuras reproductivas, debido a que el número de flores producidas fue muy bajo, la matriz de datos contenía un exceso de ceros y los valores del error estándar fueron muy altos.

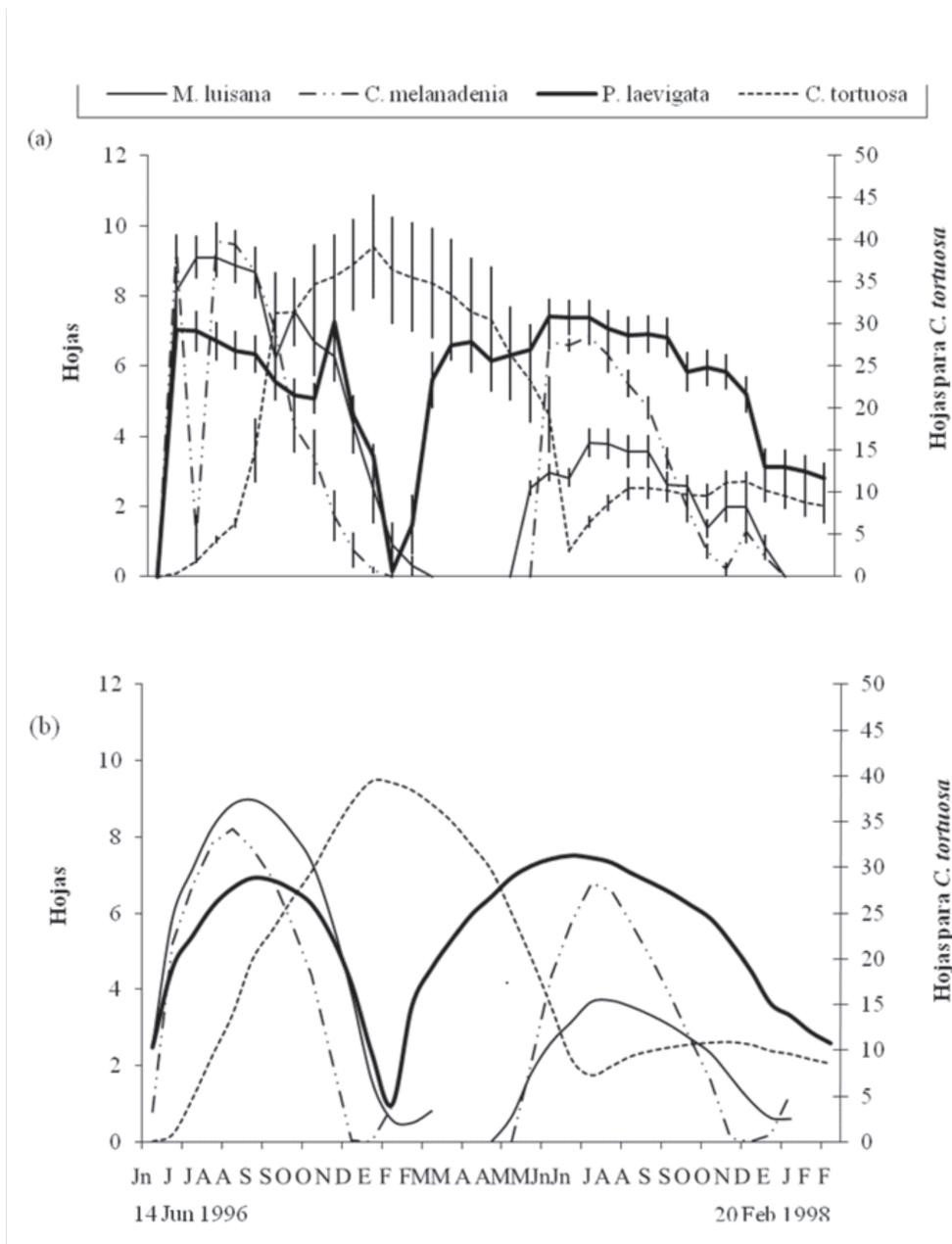
La precipitación promedio de la zona de estudio (estación meteorológica de Zapotitlán de las Salinas) es de 410 mm, en 1996 registramos 10 mm por arriba de ese valor. Sin embargo, en 1997 ocurrió una intensa sequía intraestival que provocó un déficit de 100 mm con respecto a los promedios de lluvia para los meses de julio - septiembre (Fig. 1b). El PHS y la humedad del suelo reflejaron también la sequía ocurrida en el verano de 1997 (Fig. 2a). La radiación solar y la evaporación tuvieron sus picos más altos durante el periodo de julio – agosto de 1997 en comparación al mismo periodo de 1996 (Fig. 2b).

Con respecto a la fenología foliar, esta tuvo diferencias significativas entre años ($F = 14.47$, $P < 0.001$) y entre formas de vida de las plantas ($F = 90.2$, $P < 0.001$). Los arbustos deciduos iniciaron la pérdida de hojas al final de la temporada de lluvias y se mantuvieron desfoliados durante la temporada seca (noviembre a mayo). El número de hojas producidas fue mayor en 1996 con respecto a 1997, donde fue notoria una fuerte disminución en el número de hojas en las dos especies, en particular en *Mimosa luisana*. La producción de hojas en las dos especies perennifolias varió entre años. Aunque ninguna de las dos especies perdió completamente sus hojas, *Prosopis laevigata* tuvo menos hojas durante la parte final de la época seca en 1997 (febrero – marzo) y *Castella tortuosa* tuvo un menor número de hojas durante la sequía de verano del mismo año (julio- agosto) (Fig. 3). Es notorio que el número de hojas en *P. laevigata* no fue afectado por la sequía, y que la pérdida de hojas ocurrió solo durante la época seca (noviembre-marzo) de ambos años de estudio.

Aunque varias variables del ambiente influyeron en el comportamiento fenológico de las especies durante

Fig. 3 (a) Promedio de hojas \pm S.E. (b) curvas ajustadas ($P < 0.05$) mediante modelos polinómicos de 3^{er} grado para el número de hojas de 4 especies arbustivas en la reserva de la biosfera Tehuacán-Cuicatlán, durante 1996 y 1997. Los modelos usados son: para los registros de 1996 y 1997 de los arbustos estudiados

M. luisana (1996) $y = 18.98 - 0.058x - 0.00035(x - 197.93)^2 + 0.0000031(x - 197.93)^3, r^2=0.86$
M. luisana (1997) $y = 13.36 - 0.019x - 0.00018(x - 526.06)^2 + 0.0000013(x - 526.06)^3, r^2=0.83$
C. melanadenia (1996) $y = 20.29 - 0.079x - 0.00056(x - 176.69)^2 + 0.0000062(x - 176.69)^3, r^2=0.68$
C. melanadenia (1997) $y = 44.98 - 0.076x - 0.00023(x - 533.71)^2 + 0.0000052(x - 533.71)^3, r^2=0.82$
P. laevigata (1996) $y = 9.64 - 0.016x - 0.00038(x - 176.69)^2 + 0.0000014(x - 176.69)^3, r^2=0.63$
P. laevigata (1997) $y = 15.32 - 0.016x - 0.00012(x - 510.17)^2 + 0.0000004(x - 510.17)^3, r^2=0.86$
C. tortuosa (1996) $y = 19.08 - 0.073x - 0.00104(x - 263.36)^2 + 0.0000011(x - 263.36)^3, r^2=0.91$
C. tortuosa (1997) $y = 10.25 - 0.001x - 0.00027(x - 579.31)^2 + 0.0000006(x - 579.31)^3, r^2=0.72$



1996 y 1997, la humedad del suelo fue la variable explicatoria que apareció en todos los modelos de regresión, con excepción de los modelos para *Mimosa luisana* y *P. laevigata* en 1997 (Cuadro 1). Aunque no fue incluido en los modelos de regresión, el PHS también afectó los patrones fenológicos de las plantas. Los arbustos deciduos comenzaron a perder sus hojas entre -0.5 MPa and -1.6 MPa en 1996. Sin embargo, en 1997 la pérdida de hojas en esta forma de vida ocurrió bajo PHS mas negativos (> -8.0 MPa) (Fig. 2a). En cuanto al arbusto perennifolio *P. laevigata*, este comenzó a perder sus hojas a -1.6 MPa en 1996 y a -8.6 MPa en 1997, mientras que *C. tortuosa* perdió sus hojas, en ambos años, bajos potenciales menores de -8.0 MPa.

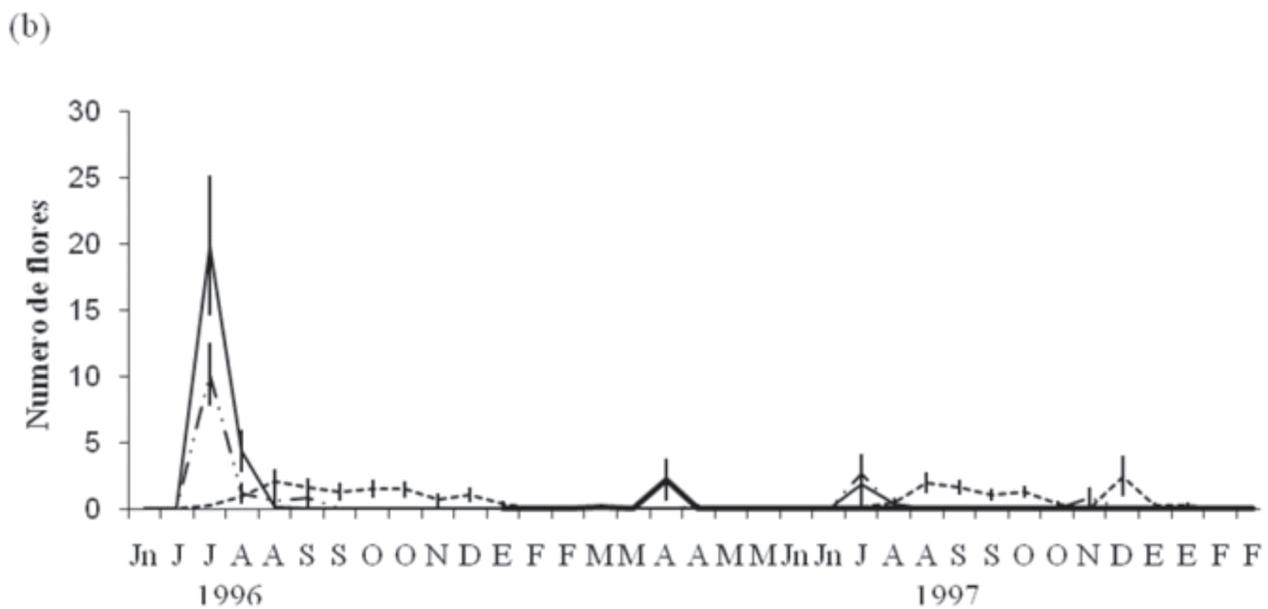
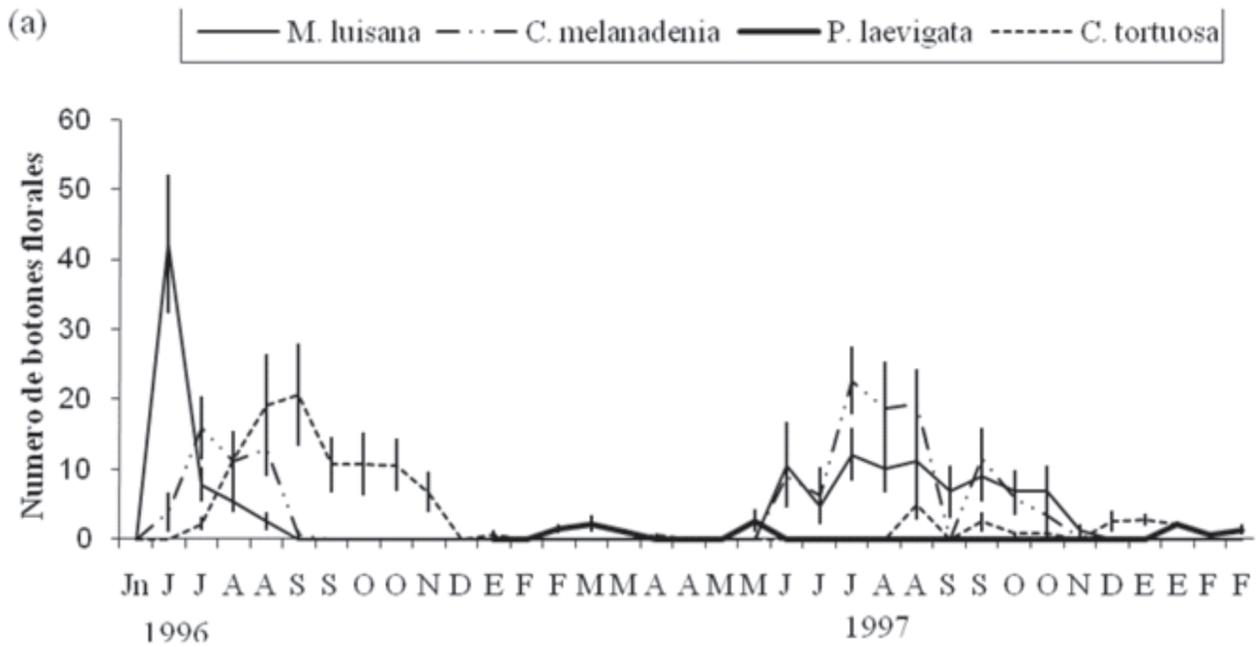
La producción de botones florales y flores en antesis de *M. luisana*, *C. melanadenia* y *C. tortuosa* ocurrió principalmente durante la época de lluvias durante 1996, con excepción de *C. tortuosa* en la que continuó hasta

el inicio de la época seca en invierno (Fig. 4). Sin embargo, la relación entre el numero de botones y las flores generadas fue semejante en las tres especies. Durante 1996 *Mimosa luisana* tuvo en promedio 19.9 ± 5.33 flores y en *Caesalpinia melanadenia* el promedio fue de 10.2 ± 2.42 flores. El numero de flores producidas en ambas especies fue mucho menor en 1997, ya que los promedios en el numero de flores fue de 1.9 ± 1.9 y de 2.7 ± 1.46 para *M. luisana* y *C. melanadenia*, respectivamente. Aunque, en 1997 se registró una producción de botones flores, la cual fue menor que en 1996, pocas flores pudieron generarse. Por otro lado, es muy interesante el comportamiento que tuvo *Mimosa luisana* en 1997, en el año previo se mostró un pico de floración que durante el año de El Niño no apareció, en su lugar se observó una fluctuación. Esta fluctuación fue debida a que los botones florales permanecieron sin madurar durante más tiempo. En general solo *C. tortuosa* produjo flores en 1997. Por su parte, solos se registró

Cuadro 1. Modelos de regresión para explicar el número de hojas producidas en función de las variables ambientales de 4 arbustos del matorral crasicaule de la reserva de la biosfera Tehuacán-Cuicatlán en 1996 y 1997. Temp. = Temperatura promedio (8:00 a.m.); Temp máx = temperatura máxima promedio; Evap = evaporación total; HR = Humedad relativa; HR min = Humedad relativa mínima promedio; HR máx = humedad relativa máxima promedio. Los números 15, 21 y 30 indican el número de días que la variable fue retrasada con respecto a la fecha de registro fenológico.

Especie	Parámetros	Coef.	t	P	F modelo	r ²
<i>M. luisana</i> (1996)	HR media 30	-0.155	-4.25	0.001	65.88	0.94
	HR min 30	0.677	113.197	<0.001		
	Lluvia 15	-0.034	-3.272	0.007		
<i>M. luisana</i> (1997)	Temp 30	0.388	5.197	<0.001	27.85	0.67
<i>C. melanadenia</i> (1996)	HR media 30	-0.185	-3.165	0.010	27.45	0.84
	HR min 30	0.626	7.386	<0.001		
<i>C. melanadenia</i> (1997)	HR min 30	0.189	9.035	<0.001	158.98	0.99
	HR máx 30	-0.373	-7.109	<0.001		
	Temp máx 15	0.213	2.431	0.042		
	Fotoperiodo 30	4.36	11.787	<0.001		
	Evap 30	-0.06	-8.428	<0.001		
<i>P. laevigata</i> (1996)	HR min 30	0.464	6.864	<0.001	27.79	0.84
	Lluvia 30	-0.020	-2.865	0.017		
<i>P. laevigata</i> (1997)	Temp 30	0.297	6.983	<0.001	337.97	0.97
	Fotoperiodo 30	1.600	7.872	<0.001		
<i>C. tortuosa</i> (1996)	HR min 15	-0.438	-2.492	0.022	48.55	0.83
	Radiación 30	0.072	-8.519	<0.001		
<i>C. tortuosa</i> (1997)	HR media 21	0.151	3.244	0.008	10.52	0.48

Fig. 4. Fenología floral de especies arbustivas (2 deciduas, 2 perennifolias) de la reserva de la biosfera Tehuacán-Cuicatlán, durante 1996 y 1997. (a) Promedio de botones florales \pm S.E.; (b) promedio de flores \pm S.E.



un evento de floración en *P. laeviga*, debido a que la fenología floral de esta especie ocurre en marzo y el periodo de estudio solo abarco una sola vez a este mes durante 1997. Sin embargo, contrario a lo esperado el número de flores en esta especie fue muy bajo.

Implicaciones de "El Niño" sobre la fenología

La variación en las condiciones ambientales asociada con el evento de El Niño se traducen en una alteración en el ritmo fenológico de las plantas. Las sequías generan estrés fisiológico en las plantas; sin embargo, esta no necesariamente acelera la senescencia de las hojas, ni tampoco reduce el tiempo de retención del follaje en los arbustos. Las plantas podrían incrementar la vida de las hojas y detener la producción de estas, debido a que decrece la necesidad de recursos (Casper *et al.*, 2001).

Sin duda la sequía del verano de 1997 fue un evento que provocó una disminución importante en el PHS en la reserva de la biosfera de Tehuacán-Cuicatlán. Para las especies arbustivas estudiadas, la disminución en el PHS fue el gatillo para el disparo de la caída de hojas. En el año pluvialmente típico de 1996, la caída de hojas de los arbustos deciduos inició cuando el PHS estuvo entre -0.5 a -1.0 MPa, mientras que para las especies perennifolias inició cuando estuvo entre -1.5 a -2.0 MPa. Estos valores de PHS coinciden con aquellos registrados para la caída de hojas en arbustos de ambientes secos estacionales (Williams *et al.*, 1997). Sin embargo, las hojas comenzaron a caer cuando el PHS fue mucho más negativo (-8.0 MPa) en el verano siguiente de 1997, por lo que la vida de las hojas fue mayor que en el año previo. Aunque es claro que la abscisión de las hojas está asociada al PHS, algunas especies en los ecosistemas áridos adelantan o atrasan la caída de hojas en función de la fase de crecimiento en que ocurre la sequía (Casper *et al.*, 2001).

Los patrones fenológicos de *Mimosa luisana* y *Caesalpinia melanadenia* fueron similares durante los dos años de estudio a pesar de las diferencias marcadas en la cantidad de lluvia, por lo que pueden considerarse como arbustos deciduos a la sequía. Por otro lado, las especies perennifolias mostraron patrones que pueden representar distinta tolerancias a la sequía. El arbusto *Prosopis laevigata* es una conocida freatófita que tiene un sistema de raíces profundo, mientras que *Castela tortuosa* al parecer tiene un sistema de raíces superficial a una máxima profundidad de 2 m, sin embargo ambas especies pueden mantener sus hojas durante la sequía estacional (Reynolds *et al.*, 1999; Hacke *et al.*, 2000). La tolerancia a la sequía de *Castela tortuosa* puede explicarse por el carácter esclerófilo de sus hojas que

reduce la transpiración, además el grosor de las paredes celulares de sus hojas es importante en los controles de hidratación y re-hidratación (Salleo *et al.*, 1997).

El patrón reproductivo de *M. luisana* y de *C. melanadenia* fue similar al de la fenología foliar. Ambas arbustos deciduos fueron dependientes de los pulsos de humedad del suelo y fueron fuertemente afectados por la sequía de verano de 1997.

Poco es conocido acerca del efecto de los episodios de El Niño sobre los ecosistemas terrestres, sin embargo, se han reportado inusuales incrementos en la geminación de plantas anuales, crecimiento vegetativo y floración de especies en desiertos (Dillon & Rundel, 1990; Polis & Hurd, 1997; Holmgren *et al.*, 2001, 2006a; Dech & Nosko, 2004). Estos eventos han sido consecuencia de un incremento en la precipitación debido a El Niño en algunas regiones sudamericanas y norteamericanas. Por lo que en el centro-sur de México un fenómeno similar podría ocurrir durante episodios de La Niña. Esto debido a que en el año de La Niña de 1998 las precipitaciones se incrementan en la misma zona de estudio (Pavón *et al.*, 2005).

Durante el periodo de las observaciones fenológicas reportadas, se realizaron simultáneamente en el sitio registros de la productividad primaria neta (Pavón & Briones 2000, Pavón *et al.*, 2005). Los valores obtenidos resaltan el efecto de El Niño en el ecosistema semiárido, ya que durante julio-agosto de 1996 la producción de raíces fue de 4.86 g m⁻² y para el mismo periodo de 1997 la productividad de raíces disminuyó a solo 0.04 g m⁻². Por otro lado, la producción de hojarasca, como reflejo de la productividad primaria neta aérea, tuvo una disminución importante durante el episodio de El Niño de 1997 con una diferencia de 20 g m⁻² con respecto al año previo.

Recientemente, los trabajos sobre el efecto de El Niño en la biota se han incrementado cubriendo una amplia diversidad de tópicos como el crecimiento poblacional, el establecimiento en plantas, la dinámica del banco de semillas, crecimiento y mortalidad de arboles, las interacciones bióticas, la fenología y la dinámica de los ecosistemas terrestres (Bowers 1997; Zhang & Li, 1999; Beaubien & Freeland 2000, Gutiérrez *et al.*, 2000, Holmgren *et al.*, 2001; Jaksic, 2001; Gutiérrez & Meserve 2003; Meserve *et al.*, 2003; Dech & Nosko, 2004; Wright & Calderón, 2006; Nishimua *et al.*, 2007). Sin embargo, el conocimiento sobre cómo la frecuencia e intensidad de los eventos de El Niño afectan a los ecosistemas terrestres en aún escaso. Al parecer El Niño puede actuar como un modulador en la dinámica de los ecosistemas

semiáridos pasando de controles “bottom up” a “top down” y viceversa (Meserve *et al.*, 2003). Es decir, cuando ocurre un evento de El Niño que provoca lluvias intensas (p. ej. en la costa del pacífico sudamericano) se genera un incremento extraordinario en la productividad primaria con abundantes recursos tanto en tejidos vegetativos como florales, esto permite la dinámica de interacciones hacia arriba de la cadena alimenticia (bottom up). Por otro lado, si el evento de El Niño provoca sequías (p. ej. en la zona centro de México) ocurre lo contrario y las presiones se dan de altos niveles de la cadena alimenticia hacia abajo (top down). En otras palabras el fenómeno de El Niño podría funcionar como un tipo de interruptor para el cambio en la dinámica de los ecosistemas (principalmente áridos) que permiten su mantenimiento. Sin embargo, a la fecha no es claro como el incremento en la frecuencia del fenómeno podría modificar la dinámica mencionada.

Los estudios sobre los efectos de El Niño no son fáciles de planear, ya que a pesar de los esfuerzos, la precisión

para predecir a largo plazo el fenómeno no es la suficientemente adecuada. Es de suponer que muchos de los estudios publicados sobre el efecto de El Niño han sido fortuitos mientras se hacían evaluaciones varias dentro de los diferentes ecosistemas. Una de las propuestas más razonables para hacer evaluaciones planeadas es la de establecer proyectos ecológicos a largo plazo, por lo menos de 10 años. Lo anterior ha sido el caso de las evaluaciones realizadas en el sur del desierto de Atacama donde el establecimiento de parcelas de observación por más de 20 años ha permitido generar gran cantidad de información sobre El Niño y su efecto sobre los ecosistemas (Comunicación personal de Julio Gutierrez, director del proyecto en el CEAZA, Chile).

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo recibido por el proyecto FOMIX (98122) “Efecto del cambio climático sobre la biodiversidad en el estado de Hidalgo”.

Literatura citada

- Beaubien E.G. & Freeland H.J. 2000.** Spring phenology trends in Alberta, Canada: links to ocean temperature. *International Journal of Biometeorology* 44: 53–59.
- Bowers J.E. 1997.** Demographic patterns of *Ferocactus cylindraceus* in relation to substrate age and grazing history. *Plant Ecology* 133: 37–48.
- Casper B.B., Forseth I.N., Kempenich H., Seltzer S. & Xavier K. 2001.** Drought prolongs leaf life span in the herbaceous desert perennial *Cryptantha flava*. *Functional of Ecology* 15: 740–747.
- Changnon S.A. 1999.** Impacts of the 1997–98 El Niño-generated weather in the United States. *Bulletin of the American Meteorology Society* 80: 1819–1827.
- D'Aleo J. 2002.** The oryx resource guide to El Niño and La Niña. Oryx Press, Westport Connecticut, USA.
- Dech J.P. & Nosko P. 2004.** Rapid growth and early flowering in an invasive plant, purple loosestrife (*Lythrum salicaria* L.) during an El Niño spring. *International Journal of Biometeorology* 49: 26–31.
- Dillon M.O. & Rundell P.W. 1990.** The botanical response of the Atacama and Peruvian desert floras to the 1982 – 1983 El Niño event. En: Glynn P.W. (ed) *Global Ecological Consequences of the 1982 – 1983 El Niño-Southern Oscillation*, Elsevier Oceanography Series 52, USA.
- Ezcurra E., Montaña C. & Arizaga S. 1991.** Architecture, light interception, and distribution of *Larrea* species in the Monte desert, Argentina. *Ecology* 72: 23–34.
- Gardner C.M.K., Robinson D., Blyth K. & Cooper J.D. 2000.** Soil water content. In: Smith KA, Mulling CE (eds) *Soil and environmental analysis: physical methods*. Marcel Dekker, Inc, New York. pp. 1–64.
- Glantz M.H. 2001.** Currents of change: impacts of El Niño and La Niña on Climate and Society. Cambridge University Press, 2a edition. 252 p.
- Gutiérrez J.R., Arancio, G. & Jaksic, F.M. 2000.** Variation in vegetation and seed bank in a Chilean semi-arid community affected by ENSO 1997. *Journal of Vegetation Science* 11: 641–648.
- Gutiérrez J. R. & Meserve P. L. 2003.** El Niño effects on soil seed bank dynamics in north-central Chile *Oecologia* 134: 511–517.
- Hacke U.G., Sperry J.S. & Pittermann J. 2000.** Drought experience and cavitation resistance in six shrubs from the Great Basin, Utah. *Basic and Applied Ecology* 1: 31–41.
- Holmgren M., Scheffer M., Ezcurra E., Gutiérrez J.R. & Mohren G. 2001.** El Niño effects on dynamics of terrestrial ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution* 16: 89–94.
- Holmgren M., Stapp P., Dickman C.R., Gracia C., Graham S., Gutiérrez J.R., Hice C., Jaksic F., Kelt D.A., Letnic M., Lima M., López B.C., Meserve P.L., Milstead W.B., Polis G.A., Previtalli M.A., Richter M., Sabaté S. & Squeo F.A. 2006a.** Extreme climatic events shape arid and semiarid ecosystems. *Frontier in Ecology and Environments* 4: 87–95.
- Holmgren M., Stapp P., Dickman C.R., Gracia C., Graham S., Gutiérrez J.R., Hice C., Jaksic F., Kelt D.A., Letnic M., Lima M., López B.C., Meserve P.L., Milstead W.B., Polis G.A., Previtalli M.A., Richter M., Sabaté S. & Squeo F.A. 2006b.** A synthesis of ENSO effects on drylands in Australia, North America and South America. *Advances in Geoscience* 6: 69–72.
- Jaksic F.M. 2001.** Ecological effects of El Niño in terrestrial ecosystems of western South America. *Ecography* 24: 241–250.
- Kikusawa K. 1991.** A Cost-Benefit analysis of leaf habitats and leaf longevity of trees and their geographical pattern. *American Naturalist* 138: 1250–1263.
- Mcphaden M.J. 2002.** El Niño, La Niña, and the climate swings of 1997–98: a review. In: Glantz MH (ed) *La Niña and its impacts: facts and speculation*. United Nations University Press, New York. pp. 25–30.
- Meserve P.L., Kelt D.A., Milstead W. B., & Gutierrez J.R. 2003.** Thirteen Years of Shifting Top-Down and Bottom-Up Control. *BioScience* 53: 633 – 646.
- Meyn A., Taylor S.W., Flannigan M.D., Thonicke, K. & W. Cramer. 2009.** Relationship between fire, climate oscillations, and drought in British Columbia, Canada, 1920–2000. *Global Change Biology* 16: 977–989.
- Nishimua T.B., Suzuki E., Kohyama T. & Tsuyuzaki S. 2007.** Mortality and growth of trees in peat-swamp and heath forests in Central Kalimantan after severe drought. *Plant Ecology* 188: 165–177.
- Noy-Meir I. 1985.** Desert ecosystems structure and function. In: Evenari M, Noy-Meir I (eds) *Hot desert and arid scrublands, Ecosystems of the World*, vol. 120. pp. 93–101.
- Pavón N.P. & Briones O. 2000.** Root distribution, standing crop biomass and belowground productivity in a semidesert in México. *Plant Ecology* 146:131–136.

Pavón, N.P., & Briones, O. 2001. Phenological patterns of nine perennial plants in an intertropical semiarid Mexican scrub. *Journal of Arid Environments* 49: 265-277.

Pavón N.P., Briones O. & Flores-Rivas J. 2005. Litterfall production and nitrogen content in an intertropical semi-arid Mexican scrub. *Journal of Arid Environments* 60: 1-13.

Philander, S.G. 2004. Our affair with El Niño. Princeton University Press, New Jersey. 275 p.

Polis G.A. & Hurd S.D. 1997. El Niño effects on the dynamics and control of an island ecosystem in the Gulf of California. *Ecology* 78:1884–1897.

Reynolds F.J., Virginia R.A., Kemp P.R., de Soyza A.G. & Tremmel D.C. 1999. Impact of drought on desert shrubs: effects of seasonality and degree of resource island development. *Ecological Monograph* 69: 69–106.

Salleo S., Nardini A. & Lo Gullo M.A. 1997. Is sclerophylly of Mediterranean evergreens an adaptation to drought? *New Phytologist* 135: 603-612.

Scheiner S.M. & Gurevitch J. 2001. Design and analysis of ecological experiments. Oxford University Press, Oxford.

Valiente L. 1991. Patrones de precipitación en el valle semiarido de Tehuacán, Puebla. Tesis de Licenciatura. Fac. de Ciencias, UNAM, México.

van der Kaars, S., Tapper N. & Cook E.J. 2010. Observed relationships between El Niño-Southern Oscillation, rainfall variability and vegetation and fire history on Halmahera, Maluku, Indonesia *Global Change Biology* 16: 1705-1714.

Williams R.J., Myers B.A., Muller W.J., Duff G.A. & Eamus D. 1997. Leaf phenology of woody species in a north Australian tropical savanna. *Ecology* 78:2542-2558.

Wright S.J. & Calderón O. 2006. Seasonal, El Niño and longer term changes in flower and seed production in a moist tropical forest. *Ecology Letters*, 9: 35–44.

Zhang, Z. & Li D. 1999. A possible relationship between outbreaks of the oriental migratory locust (*Locusta migratoria manilensis*) in China and the El Niño episodes. *Ecological research* 14: 267 – 270.

Zar J.H. 1996. Biostatistical Analysis. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 718 p.

Capítulo VI

El Niño y los Incendios en Matorrales Semiáridos de México

Numa P. Pavón y Gerardo Sánchez Rojas

Resumen

Se describe el fenómeno océano-atmosférico de El Niño y sus efectos en los regímenes de precipitación y temperatura. Se compiló información del efecto de El Niño sobre patrones ecológicos en diferentes grupos biológicos. Cuando este fenómeno se presenta, particularmente en el hemisferio norte, muchas de las regiones semiáridas con vegetación de matorral sufren sequías severas. Se analizó una secuencia de 40 años de datos (1970 a 2010) para relacionar el índice de Oscilación del Sur (SOI) y el número de incendios, la cantidad de hectáreas afectadas y un índice de intensidad que combina el la cantidad de hectáreas afectadas sobre el número de incendios. Se utilizaron datos a nivel nacional y por estados, en particular de aquellos que tuvieran más del 30% de su territorio ocupado por matorrales. Se encontró una relación positiva significativa entre el índice asociado al fenómeno de El Niño con el índice de intensidad, tanto a nivel nacional ($b = -5.47$, $F = 5.47$; $P = 0.026$) como estatal ($b = -30.254$, $F = 5.153$; $P = 0.029$). Es evidente que el fuego es una de las perturbaciones más importantes que afecta a los sistemas biológicos. El entendimiento de las relaciones de El Niño con los incendios es prioritario en la conservación de la biodiversidad y en particular en los matorrales xerófilos ya que es el ecosistema más extendido en México (con más de 60 millones de hectáreas).

Palabra Clave: Cambio Climático, El Niño, Incendios, México, Matorrales

Abstract

We described the ocean-atmospheric phenomenon El Niño and its consequences in biological systems. Also, we described how this phenomenon affects precipitation and temperature in different regions of the planet. When this phenomenon occurs semi-arid regions suffer severe droughts. In semiarid region of central Mexico the scrubland is a more important ecosystem. In order to relating the South Oscillation Index (SOI) with number of fires, number of hectares affected and with intensity fire index (number of hectares affected per number of fires), we analyzed a period of 40 years (1970 to 2010). We used national data and data for states with more than

30% of its territory occupied by scrubland. We found a positive and significantly relationship between SOI and FI to national level ($b = -5.47$, $F = 5.47$, $P = 0.026$) and states level ($b = 30,254$, $F = 5,153$, $P = 0.029$). It is clear that fire is one of the most important disturbances in semiarid ecosystems. The understanding of relationship between El Niño and fires is priority for biodiversity conservation in general and particularly in scrubland, due this ecosystem occupied more area in Mexico.

Keywords : Climatic Change, El Niño, Fire, Mexico, Shrubland

Introducción.

El Niño es un fenómeno océano-atmosférico que genera alteraciones en los regímenes de temperatura y precipitación a nivel global (Arntz & Fahrbach, 1996). Al parecer El Niño ocurre de manera natural y los registros indirectos permiten datar en más de 13 mil años la historia de estos eventos (Beckage *et al.*, 2003). En las últimas décadas la periodicidad con la que se presenta El Niño se ha incrementado significativamente, siendo cada vez más frecuente, lo que puede deberse al proceso del incremento de la temperatura a nivel global.

El Niño ha sido relacionado con periodos de intensas sequías en diferentes partes del globo, desde Australia, África, Euroasia y Norteamérica (Glantz, 2001; Philander, 2004; Meyn *et al.*, 2009; Van der Kaars *et al.*, 2010). Estas sequías ocurren principalmente durante el verano del hemisferio norte. Por otro lado, en el hemisferio sur las precipitaciones importantes se presentan sobre las zonas cercanas a las costas del Atlántico, en países como Perú y Chile. Sin embargo, durante el mismo periodo en algunas regiones de Brasil y México se presentan severas sequías, pero en otras regiones de los mismos países ocurren precipitaciones extraordinarias (Laurence & Williamson, 2001; Magaña *et al.*, 2003)

En años recientes se han publicado diversos estudios que relacionan los eventos de El Niño con la incidencia de incendios forestales. El interés surgió debido al extremadamente alto número de siniestros ocurridos durante El Niño de 1997 – 1998 (14 445 incendios, cuando el promedio en los últimos 30 años fue de 6942 por año) y por las pérdidas económicas derivadas de

ellos. Por otro lado, la emisión de gases de efecto invernadero como el metano y el dióxido de carbono se incrementó de una manera alarmante durante ese periodo. Las estimaciones al respecto son impresionantes, sólo en Indonesia se estimó entre 0.81 and 2.57 Gt de carbón (que equivale a 1000 millones de toneladas) liberado en 1997 que correspondió entre el 13 y 40% del promedio anual de las emisiones de carbón generados por combustibles fósiles en el mundo (Page *et al.*, 2002).

Previo a 1982 poco se sabía acerca del fenómeno de El Niño, es hasta ahora cuando se ha generado gran cantidad de información al respecto. Sin embargo, en México existen pocos trabajos sobre la influencia del El Niño sobre procesos ecológicos (Roman-Cuesta *et al.*, 2003; Villers & Hernández 2007; Skinner *et al.*, 2008). La relación entre El Niño y el cambio de la frecuencia de los incendios ha sido estadísticamente probada. El Niño provoca un déficit hídrico en varias regiones de México, principalmente en el centro del país. Esto genera una disminución importante de la precipitación, principalmente durante el verano. La acumulación de hojarasca como material inflamable y el déficit hídrico generado por la sequía provoca que cuando ocurre un incendio toda la vegetación se queme. Los incendios en años normales (no- Niño) ocurren sobre todo en vegetaciones que acumulan mayor cantidad de materia inflamable, tal como los bosques de Pino-Encino. Sin embargo, en años de El Niño los incendios se propagan a todo tipo de vegetación, incluyendo aquellos tradicionalmente húmedos como las selvas (Roman-Cuesta *et al.*, 2003).

En este trabajo se describe el fenómeno de El Niño, considerando los aspectos básicos de su desarrollo, sus principales teleconexiones y los efectos naturales y económicos que provoca tanto a nivel global como en México. Además, se muestran evidencias de las sequías registradas en el centro del país en los periodos de El Niño y se relacionan el número y extensión de los incendios con el índice de El Niño. Finalmente, se desarrollan algunas perspectivas en la conservación y el manejo de la biodiversidad, considerando la incidencia de El Niño y los incendios.

El Niño

El nombre de El Niño se debe a que el fenómeno ocurre alrededor de la navidad durante el verano en el hemisferio sur (Glynn, 1988). El Niño y su contraparte La Niña ocurren como consecuencia de alteraciones en las condiciones de temperatura del océano en la zona del Pacífico tropical este. En términos generales se habla de un fenómeno de El Niño cuando la temperatura de la

superficie del mar se encuentra medio grado o más por arriba del promedio del periodo 1950-1979. Esta situación debe prevalecer por al menos seis meses consecutivos dentro de la banda llamada "Niño 3" (4°N-4°S, 150°W-90°W) (Magaña & Morales, 1999).

En la literatura especializada es posible encontrar como sinónimo de El Niño el término ENSO (*El Niño Southern Oscillation* por sus siglas en inglés), esto debido a la correlación del fenómeno con la oscilación del sur. La oscilación del sur fue descrita durante la primera mitad del siglo XX como una variación de la presión atmosférica entre el pacífico sudoriental y el sudeste asiático, lo que origina movimientos de masas de aire. La relación con El Niño, se da cuando ocurre una disminución de la presión atmosférica en la zona de presión alta subtropical, que provoca el consiguiente debilitamiento de los vientos alisios en el Pacífico y entonces las aguas más calientes del Pacífico tropical se esparcen a lo largo del Ecuador (Glynn, 1988; Arntz & Fahrbech, 1996; Magaña & Morales, 1999).

Cuando las condiciones son contrarias a lo anterior entonces sucede el fenómeno denominada La Niña, el cual genera intensos afloramientos y por lo tanto temperaturas bajas en la superficie marina frente a las costas sudamericanas (Arntz & Fahrbech, 1996). Se ha considerado que un evento típico de El Niño se mantiene entre 18 y 24 meses, con picos en intensidad principalmente durante el verano del hemisferio sur (diciembre a febrero) (Rasmusson & Carpenter, 1983). Durante el siglo pasado se registró el evento de El Niño más prolongado el cual se mantuvo de 1991 a 1995 (Magaña y Morales, 1999). La aparición de El Niño no es periódica, ni necesariamente un evento de La Niña ocurre después de El Niño o viceversa.

Actualmente, existe un gran debate con posiciones radicales entre aquellos que consideran que El Niño es parte de una oscilación continua sin comienzo ni fin y por otro lado quienes defienden la hipótesis de que El Niño es un evento independiente. Estas posiciones provocan en parte retrasos en cuanto el desarrollo de modelos para la predictibilidad del fenómeno. Por otro lado, la transición de La Niña a El Niño es generalmente difícil de anticipar, debido a que los ciclos estacionales involucran considerables fluctuaciones en el Oeste pero no en el Este. La transición de El Niño a La Niña puede ocurrir en relativamente poco tiempo (de unos pocos meses) y puede ser afectado por vientos del poniente. Sin embargo, debe considerarse que las fluctuaciones del viento son tanto la causa como la consecuencia de las variaciones en la temperatura de los océanos (Philander, 2004).

Las observaciones y registros de El Niño tienen relativamente poco tiempo, donde el número de eventos es escaso para evaluar la variabilidad del fenómeno. Por lo que, los modelos permiten contar con periodos mucho más largos de varios milenios. Se ha reportado que en los últimos 5 mil años han ocurrido eventos de El Niño más frecuentes e intensos, donde previamente dominaba La Niña (Tsonis, 2009). Recientes aproximaciones paleo-climáticas han sido usadas para estimar señales de eventos de El Niño desde 1525 hasta el 2002. Durante ese periodo se reportan un total de 92 eventos de El Niño y 82 de La Niña (Gergis & Fowler, 2009). Usando los datos reportados en el trabajo antes citado, es evidente que durante los últimos 100 años se observa un incremento importante en el porcentaje de eventos extremos con una disminución de los débiles y moderados (Fig. 1).

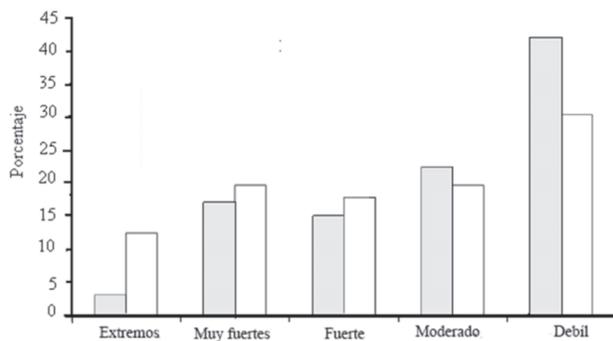


Figura 1. Porcentaje de eventos de El Niño, clasificados de acuerdo a su intensidad. Las barras negras muestran los porcentajes de eventos ocurridos en el periodo de 1525 a 1899, y las blancas el porcentaje de eventos ocurridos entre 1900 y 2002 (modificado de Gergis & Fowler 2009).

A la fecha se desconocen las causas que provocan los eventos de El Niño, sin duda alguna, el aclarar los mecanismos causales del fenómeno permitirá una mayor precisión en los modelos predictivos. Recientemente se ha relacionado la presencia de El Niño con otros fenómenos tales como la liberación de energía del interior del planeta, la actividad volcánica y la variación en la rotación de la Tierra (Handler & Andsager, 1994; Han *et al.*, 2002; Liao *et al.*, 2003). Además, se ha considerado como un factor importante la influencia de factores externos en el origen de los eventos de El Niño, tales como la actividad solar en el clima terrestre (Pérez-Enríquez *et al.*, 1988; Farrar, 2000; Han *et al.*, 2002). Otro factor a considerar, además de la intensidad del evento de El Niño, es que no todos los eventos son iguales en cuanto a la interacción océano-atmosférica.

Recientemente, se han diferenciado dos formas de calentamiento de las masas de agua del Pacífico tropical.

El Niño tradicionalmente ocurre cuando el calentamiento sucede en el Pacífico Este, mientras que cuando el calentamiento ocurre en el Pacífico Central el fenómeno recibe el nombre de El Niño Modoki (Weng, 2007; Weng, 2009). El Niño Modoki provoca efectos diferentes sobre los ciclones tropicales del Atlántico, asociado con un incremento en el potencial de que los ciclones toquen tierra en las costas del Golfo de México y Centroamérica (Kim *et al.*, 2009).

En México, se presentan variaciones marcadas de la precipitación durante los eventos de El Niño. Esta variación no es uniforme a lo largo de la República sino que se da por regiones (Magaña, 1998). En las zonas áridas y semiáridas de la región centro-norte se presenta una fuerte disminución de la precipitación durante el invierno y en particular en el verano, mientras que a mayores latitudes ocurre un ligero incremento de la precipitación; lo contrario ocurre durante La Niña (Méndez González *et al.*, 2007). Usando el índice multivariado de ENSO (MEI; como el primer componente principal de la combinación de la presión atmosférica, componentes de la superficie del viento Este-Oeste y Norte-Sur, temperatura de la superficie del mar, temperatura del aire y nubosidad total), se reportó que cuando ocurre un evento de El Niño en México la precipitación se incrementa de enero a marzo, para disminuir de manera importante de junio a septiembre y recuperarse a principios de invierno (Méndez-González *et al.*, 2007). Lo anterior inicia en una pequeña región del centro del país y posteriormente se extiende al sur y a las costas.

El estado de Hidalgo se encuentra ubicado en la parte centro-sur del país, muestra un patrón de precipitación similar al descrito arriba cuando ocurre un evento de El Niño. Por ejemplo, en la ciudad de Pachuca, la cual se encuentra dentro de la zona semiárida del estado, las lluvias ocurren en verano. Sin embargo, el promedio de precipitación de los meses de junio a septiembre desciende de manera importante cuando ocurren eventos de El Niño (Fig. 2) (Pavón & Meza Sánchez 2009). Además, 18 estaciones meteorológicas dentro del estado de Hidalgo tuvieron una pendiente significativa cuando la precipitación anual se ajustó linealmente contra el índice de El Niño (promedio trimestral de la variación de temperatura del océano en la región 3 de El Niño) (Pavón & Meza Sánchez 2009). En todos los casos, los análisis indicaron que en los años de El Niño la precipitación disminuye significativamente y aumenta cuando la zona es influenciada por La Niña. Las estaciones ocurren principalmente en la zona sur y centro-oeste del estado, en vegetación de matorral xerófilo y bosque mesófilo de montaña, respectivamente.

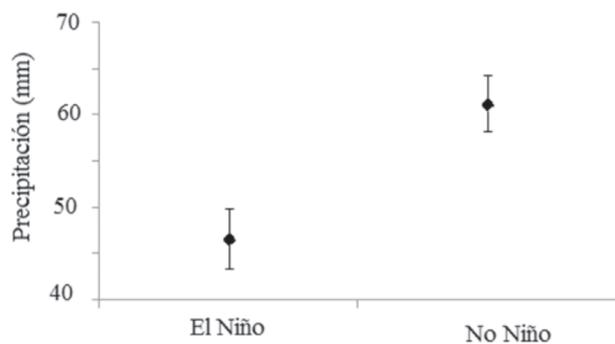


Figura 2. Diferencias en la precipitación promedio (\pm E.E.) de las lluvias de verano (junio a septiembre) de 1950 a 2006, entre años con evento de El Niño y años Sin Niño en la ciudad de Pachuca de Soto, Hidalgo, México.

Los efectos de El Niño

El Niño provoca alteraciones en la temperatura y en los regímenes de precipitación a nivel global. Aunque el fenómeno propiamente ocurre a nivel de una faja ecuatorial, sus efectos son notorios en diferentes partes del globo, a esto se la ha denominado teleconexiones de El Niño. Los efectos pueden ser muy contrastantes, provocando sequías en algunas zonas de África, Asia y Oceanía o inundaciones en el Atlántico tropical y las costas Sudamericanas (Glantz, 2001). Las variaciones océano-atmosféricas tienen repercusiones en diferentes ámbitos de la vida humana (social y económica) y sobre los ecosistemas terrestres y acuáticos.

Un ejemplo del impacto socioeconómico de El Niño se reportó en Kenia uno de los países más pobres de África. Durante el evento de 1997-98 se produjeron enormes deslizamientos de tierra que causaron cientos de muertes. En la mayor parte del país se destruyó el 50% de la infraestructura con pérdidas económicas superiores a los 800 millones de dólares que hicieron caer la economía de Kenia (Ngecu & Mathu, 1999).

Durante el mismo evento de El Niño, considerado el más fuerte del siglo pasado, las pérdidas en Sudamérica fueron mucho más severas con 7,544 millones de dólares, siendo Perú el país más afectado contribuyendo con 46.5% de esa pérdida (Santos, 2006). Aunque, las pérdidas económicas en México fueron un poco menores no dejan de ser muy importantes ya que fueron estimadas en 23 mil millones de pesos (incluyendo 6 mil millones por importación de granos) o aproximadamente 2555 millones de dólares si se considera para 1998 un tipo de cambio de 9 pesos por dólar (Delgado *et al.*, 1999).

Los efectos ecológicos derivados de eventos de El Niño son muy variados e involucran reportes de modificaciones de patrones y procesos en diferentes ambientes y especies. Las interacciones bióticas pueden verse fuertemente afectadas por la desaparición o declinación de poblaciones de especies clave tanto a bajos como altos niveles de la cadena alimenticia. A nivel oceánico se ha realizado diversos reportes sobre los efectos biológicos de El Niño. El efecto sobre la sobrevivencia de diferentes especies de algas marinas o con daños estructurales como en los bosque de kelp (*Macrocystis pyrifera*), es de suma relevancia ya que estas constituyen el alimento de diversas especies cuya demografía se ve afectada, como aves, peces, focas e iguanas marinas (Glynn, 1988). En las costas de Florida, USA, se reportó un incremento de lluvias durante el evento de El Niño 1997-98 que disparó la densidad de fitoplancton provocando alteraciones en la calidad del agua. Esto generó modificaciones morfológicas y demográficas en el pasto marino *Thalassia testudinum* el cual sirve de alimento a una alta diversidad de peces (Carlson *et al.*, 2003).

Aunque faltan muchos estudios para evaluar en toda su magnitud el efecto de El Niño en los ecosistemas acuáticos. La carencia de información en los ecosistemas y especies terrestres es aún mayor. En general se considera que el fenómeno de El Niño tiene una fuerte repercusión a una escala global en cuanto a los flujos de carbón en la biosfera, esto se refleja en variaciones en la productividad primaria en los ecosistemas terrestres (Squeo *et al.*, 2006). Al respecto, se evaluó el flujo de neto de CO₂ en la biosfera en el periodo 1983-1984, cuando ocurrió un evento de El Niño, donde hubo una extraordinaria recuperación de la productividad primaria global en 1985 (Potter & Klooster, 1999). Sin embargo, la productividad primaria difiere de acuerdo a las estrategias de vida de las plantas y a las modificaciones en la disponibilidad de recursos debido a eventos de El Niño (agua para desiertos), como por ejemplo entre herbáceas y pastos (Huxman & Smith, 2001).

Adicionalmente, se han realizado estudios y revisiones evaluando el efecto de El Niño sobre diferentes aspectos ecológicos en diversos niveles de organización, por ejemplo: (i) en el crecimiento poblacional de insectos (Zhang & Li, 1999); en el éxito de establecimiento de cactáceas (Bowers, 1997); en la dinámica del banco de semillas en desiertos (Gutiérrez *et al.*, 2000, Gutiérrez & Meserve, 2003); (iii) en la fenología floral (Walker *et al.*, 1995; Beaubien & Freeland, 2000; Dech & Nosko, 2004); (iv) en la producción de frutos y semillas (Wright & Calderón, 2006); (v) en el crecimiento y mortalidad de árboles (Nishimua *et*

al., 2007); (vi) en interacciones bióticas (Meserve *et al.*, 2003); y en la dinámica de los ecosistemas terrestres (Holmgren *et al.*, 2001; Jaksic, 2001).

En cuanto al último punto, se ha postulado que en las zonas áridas la estructura y dinámica de las comunidades mantienen una estrecha relación con los fenómenos de El Niño y La Niña (Holmgren *et al.*, 2006). En ese sentido en las zonas semiáridas de Chile, se ha considerado que El Niño funciona como una especie de interruptor en el que la estructura de la comunidad pasa de fuerzas “bottom up” a “top down” y viceversa; El Niño produce abundantes lluvias que generan recursos para un incremento en la productividad, así la dinámica ocurre de los niveles tróficos inferiores hacia los superiores (Meserve *et al.*, 2003). Por otro lado, el conocimiento de la relación entre El Niño y los ecosistemas permite establecer oportunidades para la restauración de los ecosistemas degradados, en particular en los ambientes áridos (Holmgren & Scheffer, 2001).

Sequías e Incendios

En el hemisferio norte, las principales afectaciones asociadas con eventos de El Niño son las sequías y los incendios relacionados con éstos. Las regiones del planeta donde las teleconexiones de El Niño están asociadas con un déficit hídrico frecuentemente se producen incendios de diversa magnitud, asociados con las sequías de verano (para el hemisferio norte) que con las oscilaciones climáticas (Meyn *et al.*, 2009). Las zonas tropicales o subtropicales del mundo son las más susceptibles a los incendios (Roman-Cuesta *et al.*, 2004).

Las sequías afectan a más personas que cualquier otro fenómeno climático. Una sequía se define como la carencia de lluvias durante un periodo de tiempo (días a años), que es causada por una “anormalidad” climática (Kallis, 2008). Las sequías provocadas por El Niño en el centro de México han sido de diferente intensidad. En un estudio paleo-limnológico realizado en dos lagos antiguos en el Valle de Santiago, se obtuvo la cronología de las sequías relacionadas con eventos de El Niño, destacándose periodos prolongados de 3 a 7 años en 1850’s, 1865, 1880, 1895, 1905, 1915, y en 1920’s (Kienel, 2009).

Actualmente, la relación entre las sequías y El Niño, ha subrayado la importancia de la predicción de este último fenómeno en gran parte por las pérdidas socio-económicas aunadas. De acuerdo con Kallis (2008), de 1970 a 2007 han sido afectadas por las sequías 1,885,881,000 personas, con pérdidas económicas por

\$17,574,135,300.00 dólares. Estas cifras son estratosféricas y reflejan la importancia trascendental que tiene el estudio de las sequías y los procesos que las originan. En cuanto a las afectaciones humanas directas el continente más afectado ha sido Asia. Sin embargo, si se considera sólo el aspecto económico entonces los más dañados son Norte América con pérdidas de \$ 9,504,800,000.00 dólares y Oceanía con pérdidas de \$8,004,800,000.00 dólares.

Gran parte de las pérdidas provocadas por la sequía es debido a los incendios asociados. El fenómeno de El Niño contribuye de manera importante con esta relación. En años normales los incendios ocurren principalmente durante la época seca y la vegetación con mayor susceptibilidad es aquella con material más flamable como los bosques de pino-encino. Mientras que en años de El Niño la sequía provoca un déficit hídrico en cualquier tipo de vegetación, generando incendios en ecosistemas considerados húmedos como las selvas (Roman-Cuesta *et al.*, 2003). En este sentido, durante El Niño de 1997, en Indonesia ocurrieron extensos incendios sobre ecosistemas boscosos establecidos en humedales (“forested peatlands”); en Borneo se quemó 32% del área donde los humedales representaron 91.5%; en total se quemaron 9 millones de hectáreas en 31,500 incendios registrados durante 12 meses, un tercio de ellos sucedieron en la semana del 12 al 18 de octubre de 1997 (Stolle & Tomich, 1999; Page *et al.*, 2002).

La relación El Niño – Sequía – Incendios al parecer es un patrón bajo una escala temporal. Los registros indirectos de incendios de los últimos 250 años relacionados con el índice de Oscilación del Sur (registrados, reconstruidos y con registros históricos de eventos de El Niño) muestran que durante las sequías de ENSO ocurre una mayor incidencia de incendios (Van der Kaars *et al.*, 2010).

Al igual que en Indonesia, en otras partes del planeta se han realizado evaluaciones donde es clara la relación entre El Niño y los incendios, como en Australia, en Centroamérica, en Colombia, en Chile, en la Sierra Nevada (USA), en la Florida y en el sureste de Estados Unidos, en Venezuela y en México (Magaña & Morales, 1999; Beckage *et al.*, 2003; Swetnam & Baison, 2003; Castillo *et al.*, 2003; North *et al.*, 2005; Santos, 2006; Greenville *et al.*, 2009).

En particular en México, la mayoría de los incendios son provocados intencionalmente. Muchos de ellos se generan por prácticas agrícolas como la roza, tumba y quema, por lo que gran parte de las áreas afectadas

son zonas agrícolas y ganaderas. Para el año 1998 se estimó una superficie afectada de 849,632 hectáreas debido a cerca de 14,445 incendios con pérdidas globales de 19 mil millones de pesos (Delgadillo 1999). El patrón ha continuado ya que para 2005 ocurrieron 9,709 incendios que afectaron 276,089 hectáreas y en 2006 se reportaron 8,725 incendios que afectaron 243,864 hectáreas del país (Villers & Hernández, 2007).

Es posible decir que los incendios que cubren mayor extensión y el mayor número de siniestros están asociados con eventos de El Niño o de La Niña (para el noroeste del país), mientras que los más pequeños son atribuidos a manejos agrícolas (Drury & Veblen, 2008; Skinner *et al.*, 2008). Pero el tipo de vegetación y el tiempo de acumulación de hojarasca son factores muy importantes para evaluar la probabilidad de siniestros aun durante ENSO (Skinner *et al.*, 2008; Manzo-Delgado *et al.*, 2009). En Tamaulipas la mayoría de los incendios mayores de mil hectáreas de extensión ocurrieron en bosques templados, mientras que en Oaxaca ocurrieron en selva alta (González-Ramírez *et al.*, 2007). El estado de la república con mayor incidencia de incendios es Chiapas, donde los eventos se incrementan significativamente durante años de El Niño (Roman-Cuesta *et al.*, 2004).

En Australia utilizando imágenes generadas por el satélite Landsat (1972 a 2003) trataron de describir la historia de los incendios como parte fundamental de programas de conservación biológica y evaluar la relación entre el índice de oscilación del sur (SOI por sus siglas en inglés) para predecir áreas incendiadas (Greenville *et al.*, 2009). En el sureste de Asia SOI está fuertemente relacionado con el índice del de El Niño cuando sus valores están en el intervalo de 3 a 4 ($r = 0.72$) y a su vez se ha establecido que los incendios inician 6 meses antes del máximo valor de SOI (Fuller & Murphy, 2006).

Con los datos del Inventario Forestal Nacional (2000) y mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (Arc View 3.3) se extrajo la información sobre la extensión de los diferentes tipos de vegetación que se distribuyen en cada una de las entidades federativas (en este caso se utilizaron sólo los órdenes jerárquicos de formación y de tipo de vegetación para las estimaciones). A partir de esta información se calculó el porcentaje que los matorrales representan de la extensión para cada estado. Se decidió usar sólo aquellos estados con más del 30% de su área con matorrales. Mediante sumatoria se estimó la cantidad de incendios ocurridos en los matorrales de los estados seleccionados. La razón por la cual utilizar el

Inventario Forestal Nacional, fue porque su cartografía se basa en la interpretación visual a escala 1:250 000 de imágenes satelitales Landsat del 2000 (Mas *et al.*, 2002).

Gracias a la nueva política de acceso a la información pública, se solicitó y se obtuvo de la Comisión Nacional Forestal una base de datos desde 1970 hasta el año de 2009, donde se indican para cada una de las entidades federativas el número de incendios, la cantidad de hectáreas (ha^{-1}) afectadas y un índice $\frac{\text{hectáreas afectadas}}{\text{número de fuegos}}$ que refleja la cantidad de hectáreas afectadas por cada fuego al cual denominamos como la intensidad del fuego (Datos obtenidos de la CONAFOR).

De esta base de datos se obtuvo el número de incendios, el número de hectáreas afectadas y el índice de intensidad de estos últimos 29 años para todo el país y una vez que se determinó qué estados estaban dominados por matorrales en su territorio se calculó sólo para ellos la sumatoria de las mismas variables que ya se tenían para el país.

Los valores obtenidos, en cuanto a los incendios, fueron relacionados con el Índice de Oscilación del Sur (SOI), el cual estima las fluctuaciones mensuales o de las estacionales de diferencias de presión atmosférica entre la isla de Tahití y la ciudad de Darwin. SOI se relaciona con varios eventos climáticos y en particular con el fenómeno del El Niño, los valores se obtuvieron de la página "Climate Prediction Center de la National Weather Services de los Estados Unidos (<http://www.cpc.noaa.gov/>)". Sólo analizamos la serie de datos de 1970 hasta 2009, debido a la carencia de información previa suficiente de incendios en México.

Los estados que tienen más del 30 % de su territorio ocupado con matorrales fueron Baja California Sur, Baja California Norte, Coahuila, Nuevo León, Sonora, San Luis Potosí Chihuahua y Zacatecas (Fig. 3). Estos estados se usaron para calcular los valores de los incendios para las zonas de matorrales.

Existe una gran variación intra-anual en el número de incendios que se presentan en México, con un intervalo entre 2,740 y 14,445 incendios al año. Por otro lado el intervalo de extensión afectada al año varía entre 44,401 y 849,635 ha^{-1} , y en cuanto al índice de intensidad de fuego se registró una variación que va desde 12.90 a 58.81 ha^{-1} afectadas por incendio.

Las regresiones muestran que sólo hay una significancia estadística entre SOI y el índice de intensidad

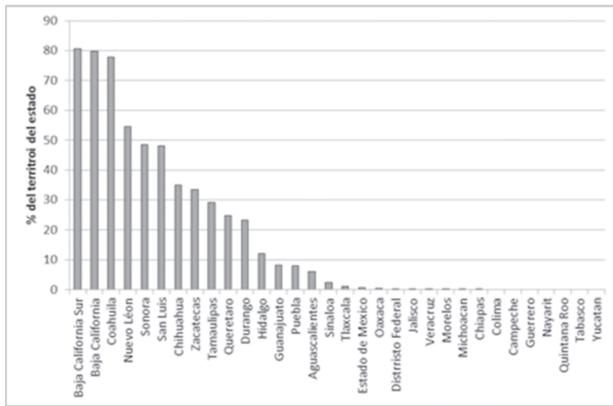


Figura 3. Valores del porcentaje de extensión territorial dentro de los entidades federativas, del tipo de vegetación de los matorrales xerófilos, basándose en la información del Inventario forestal nacional basado en foto interpretación del años 2000.

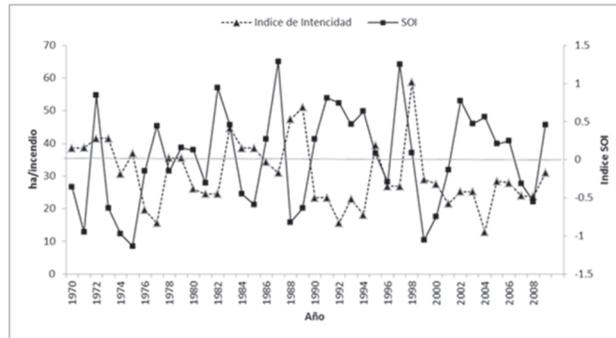


Figura 4. Se presentan los valores para el país (línea solida) y para los estados dominados por matorrales (línea punteada) del número de hectáreas afectadas por incendio durante el periodo que comprenden los años de 1970 a 2009.

de fuego, tanto para los todo el país ($b = -5.47$, $F = 5.47$; $P = 0.026$) como para los estados dominados por matorrales ($b = -30.254$, $F = 5.153$; $P = 0.029$). En ambos casos, la varianza explicada del modelo de regresión fue de solo el 12 %. (Fig. 4)

Estos resultados nos muestran que el índice SOI parece afectar la intensidad de los fuegos en el país y

dentro de los estados dominados por los matorrales, que hay una tendencia muy parecida entre los valores del índice de hectáreas afectadas del país y la de los matorrales a lo largo de los años (Fig. 5). Sin embargo, hay un cambio muy importante en la magnitud siendo mucho más sensibles los matorrales a los incendios en los años con valores negativos de SOI (que son los años usualmente donde se presenta el fenómeno del Niño), ya que se incrementa considerablemente el número de hectáreas afectadas de las regiones dominadas por matorrales con respecto al país (Fig. 5).

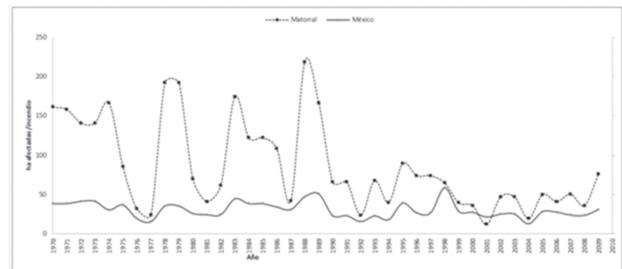


Figura 5. Se muestran, a lo largo del periodo de 1970 a 2009, los valores del índice SOI ("Southern Oscillation Index") y los valores del índice de intensidad de incendio.

Los matorrales xerófilos representan uno de los tipos de vegetación predominantes en México, se estima en 60 millones de hectáreas que comprende la zona de distribución potencial de esta vegetación (Sánchez *et al.*, 2009). A su vez tienen mayor predisposición a los incendios, debido a las frecuentes sequías asociadas que ocurren en estos ecosistemas semiáridos. Por lo que es de suma importancia considerar la relación entre los fenómenos de El Niño y La Niña en la conservación de la biodiversidad en este tipo de vegetación.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo recibido por el proyecto FOMIX (98122) "Efecto del cambio climático sobre la biodiversidad en el estado de Hidalgo" así como a la Comisión Nacional Forestal por su apoyo al proporcionarnos la información de los incendios.

Literatura citada

- Arntz W.E. & Fahrbech E. 1996.** El Niño, experiment climatic de la naturaleza. Fondo de Cultura Económica, México, D.F. 312 p.
- Beaubien E.G. & Freeland H.J. 2000.** Spring phenology trends in Alberta, Canada: links to ocean temperature. *International Journal of Biometeorology* 44: 53–59.
- Beckage B., Platt W.J., Slocum M.G. & Pank B. 2003.** Influence of the El Niño Southern Oscillation on fire regimes in the Florida everglades. *Ecology* 84: 3124–3130.
- Bowers J.E. 1997.** Demographic patterns of *Ferocactus cylindraceus* in relation to substrate age and grazing history. *Plant Ecology* 133: 37–48.
- Carlson Jr P.R., Yarbro L.A., Madley K., Arnold H., Merello M., Vanderbloemen L., Mcrae G. & Dukako M.J. 2003.** Effect of El Niño on demographic, morphological, and chemical parameters in turtle-grass (*Thalassia testudinum*): an unexpected test of indicators. *Environmental Monitoring and Assessment* 81: 393–408.
- Castillo M., Pedernera P. & Peña E. 2003.** Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *Revista ambiente y desarrollo de CIPMA* 29: 44–53.
- Dech J.P. & Nosko P. 2004.** Rapid growth and early flowering in an invasive plant, purple loosestrife (*Lythrum salicaria* L.) during an El Niño spring. *International Journal of Biometeorology* 49: 26–31.
- Delgadillo M.J., Aguilar O.T. & Rodríguez V.D. 1999.** Los aspectos económicos y sociales de El Niño. 181–210 pp. En: Magaña Rueda V. O. (Edit.) *Los Impactos de El Niño en México*. Dirección de protección civil, Secretaría de Gobernación, México, D.F.
- Drury S.A. & Veblen T.T. 2008.** Spatial and temporal variability in fire occurrence within the Las Bayas Forestry Reserve, Durango, Mexico 197: 299–316.
- Farrar P.D. 2000.** Are cosmic rays influencing oceanic cloud coverage or is it only El Niño. *Climatic Change* 47: 7–15.
- Fuller D.O. & Murphy K. 2006.** The ENSO-fire dynamic in insular Southeast Asia. *Climatic Change* 74: 435 – 455.
- Gergis J. L. & Fowler A.M. 2009.** A history of ENSO events since A.D. 1525: implications for future climate change. *Climatic Change* 92:343–387.
- Glantz M.H. 2001.** Currents of change: impacts of El Niño and La Niña on Climate and Society. Cambridge University Press, 2a edition. 252 p.
- Glynn P.W. 1988.** El Niño- Southern Oscillation 1982-1983: nearshore population, community, and ecosystem responses. *Annual Review in Ecology and Systematic* 19: 309 – 345.
- González-Ramírez L.M., Galicia L. & Gómez-Mendoza L. 2007.** El efecto de El Niño (ENSO) en la presencia de incendios forestales extremos. Resúmenes de las comunicaciones de la IV Conferencia Internacional sobre incendios forestales. 13-17 mayo de 2007, Sevilla España.
- Greenville A.C., Dickman C.R., Wardle G.M. & Letnic M. 2009.** The fire history of an arid grassland: the influence of antecedent rainfall and ENSO. *International Journal of Wildland Fire* 18: 631- 639.
- Gutiérrez J.R., Arancio G. & Jaksic F.M. 2000.** Variation in vegetation and seed bank in a Chilean semi-arid community affected by ENSO 1997. *Journal of Vegetation Science* 11: 641–648.
- Gutiérrez J. R. & Meserve P. L. 2003.** El Niño effects on soil seed bank dynamics in north-central Chile *Oecologia* 134: 511–517.
- Han Y., Zhao J. & Li Z. 2002.** Inter-annual variation of the earth rotation and El Niño. *Chinese Science Bulletin* 47:105–107.
- Handler P. & Andsager K. 1994.** El Niño, volcanismo, and global climate. *Human ecology* 22: 37–57.
- Holmgren M. & Scheffer M. 2001.** El Niño as a Window of Opportunity for the Restoration of Degraded Arid Ecosystems. *Ecosystems* 4: 151–159.
- Holmgren M., Scheffer M., Ezcurra E., Gutiérrez J.R. & Mohren G.M.J. 2001.** El Niño effects on the dynamics of terrestrial ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution* 16: 89–94.
- Holmgren M., Stapp P., Dickman C.R., Gracia C., Graham S., Gutiérrez J.R., Hice C., Jaksic F., Kelt D.A., Letnic M., Lima M., López B.C., Meserve P.L., Milstead W.B., Polis G.A., Previtalli M. A., Richter M., Sabaté S. & Squeo F.A. 2006.** Extreme climatic events shape arid and semiarid ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment* 4: 87–95.
- Huxman T.E. & Smith S.D. 2001.** Photosynthesis in an invasive grass and native forb at elevated CO₂ during an El Niño year in the Mojave Desert. *Oecologia* 128: 193–201.
- Jaksic F.M. 2001.** Ecological effects of El Niño in terrestrial ecosystems of western South America. *Ecography* 24: 241–250.

- Kallis G. 2008.** Droughts. *Annual Review of Environmental and Resources* 33: 85-118.
- Kienel U., Bowen S.W., Byrne R., Park J., Böhnel H., Dulski P., Luhr J.F., Siebert L., Haug G.H. & Negendank J.F.W. 2009.** First lacustrine varve chronologies from Mexico: impact of droughts, ENSO and human activity since AD 1840 as recorded in maar sediments from Valle de Santiago. *Journal of Paleolimnology* 42: 587–609.
- Kim H.-M., Webster P.J. & Curry J.A. 2009.** Impact of Shifting Patterns of Pacific Ocean Warming on North Atlantic Tropical Cyclones. *Science* 325: 77 – 80.
- Laurance, W. F. & B. Williamson 2001.** Positive feedbacks among forest fragmentation, drought, and climate change in the Amazon. *Conservation Biology* 15: 1529-1535
- Liao D., Zhou Y. & Liao X. 2003.** A weak El Niño event in 2002 detected by the astronomical observation. *Chinese Science Bulletin* 48: 1709 – 1713.
- Magaña V.O., 1998.** Climatología de México. En: *Los Impactos de El Niño en México*. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM, México.
- Magaña V. & Morales C. 1999.** Introducción. 1-22 pp. En: *Magaña Rueda V. O. (Edit.) Los Impactos de El Niño en México*. Dirección de protección civil, Secretaría de Gobernación, México, D.F.
- Magaña, V.O., Vazquez, J. L. Pérez, J. L. & Pérez J. B. 2003.** Impact of the Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica International* 42:313-330
- Manzo-Delgado L., Sanchez-Colon S. & Alvarez R. 2009.** Assessment of seasonal forest fire risk using NOAA-AVHRR: a case study in central Mexico. *International Journal of Remote Sensing* 30: 4991-5013.
- Mas J.-F., A. Velázquez J. L. Palacio-Prieto G., Bocco, A. Peralta & Prado J. 2002.** Assessing forest resources in Mexico: Wall-to-wall land use/ cover mapping”, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68: 966-969.
- Mendez Gonzalez J., Nívar Cháidez J.J., Gonzalez Rodríguez H. & Treviño Garza E.J. 2007.** Teleconexiones del fenómeno ENSO a la precipitación mensual en México. *Ciencias UANL* 10: 290 – 298.
- Meserve P.L., Kelt D.A., Milstead W. B., & Gutiérrez J.R. 2003.** Thirteen Years of Shifting Top-Down and Bottom-Up Control. *BioScience* 53: 633 – 646.
- Meyn A., Taylor S.W., Flannigan M.D., Thonicke, K. & Cramer W.. 2009.** Relationship between fire, climate oscillations, and drought in British Columbia, Canada, 1920–2000. *Global Change Biology* 16: 977-989.
- Nishimua T.B., Suzuki E., Kohyama T. & Tsuyuzaki S. 2007.** Mortality and growth of trees in peat-swamp and heath forests in Central Kalimantan after severe drought. *Plant Ecology* 188: 165–177.
- Ngecu W.M. & Mathu E.M.. 1999.** The El-Niño-triggered landslides and their socioeconomic impact on Kenya. *Environmental Geology* 38: 277-284.
- North M., Hurteau M., Fiegner R. & Barbour M. 2005.** Influence of fire and El Niño on tree recruitment varies by species in Sierran mixed conifer. *Forest Science* 51: 187-197.
- Page S.E., Siegert F., Rieley J.O., Boehm H.D.V., Jaya A. & Limin S. 2002.** The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature* 420: 61-65.
- Pavón N.P. & Meza-Sánchez M. 2009.** Cambio climático en el estado de Hidalgo: clasificación y tendencias climáticas. *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*. 168 p.
- Pérez-Enríquez R., Mendoza B. & Alvarez-Madrigal M. 1998.** Solar activity and El Niño: the auroral connection. *Il Nouvo Cimento* 12: 223 – 230.
- Philander S.G. 2004.** Our affair with El Niño. *Princeton University Press, New Jersey*. 275 pp.
- Potter C.S. & Klooster S.A. 1999.** Detecting a terrestrial biosphere sink for carbon dioxide: interannual ecosystem modeling for mid-1980s. *Climatic Change* 42: 489–503.
- Rasmusson E.M. & Carpenter TH. 1983.** The relationship between Eastern equatorial pacific sea surface temperatures and rainfall over India and Sri Lanka. *Monthly Weather Review* 11. 517 - 528
- Roman-Cuesta R.M., Gracia M. & Retana J. 2003.** Environmental and human influencing fire in ENSO and non-enso years in tropical Mexico. *Ecological applications* 13: 1177-1192.
- Roman-Cuesta R.M., Retana J. & Gracia M. 2004.** Fire trends in tropical Mexico –a case study of Chiapas. *Journal of Forestry* 102: 26-32.
- Sánchez C., A. Flores-Martínez I. Cruz-Leyva & Velázquez A. 2009.** Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas. En: *Capital natural de México. Estado de conservación y tendencias del cambio*. CONABIO, México.
- Santos J. L. 2006.** The Impact of El Niño – Southern Oscillation Events on South America. *Advances in Geosciences* 6: 221–225.

Skinner C.N., Burk J.H., Barbour M.G., Franco-Vizcaino E. & Stephens S.L. 2008. Influences of climate on fire regimes in montane forests of north-western Mexico. *Journal of Biogeography* 35: 1436-1451.

Squeo F.A., Tracol Y., López2, D. Gutiérrez J. R., Cordova A.M. & Ehleringer J.R. 2006. ENSO effects on primary productivity in Southern Atacama desert. *Advances in Geosciences* 6: 273-277.

Stolle F. & Tomich T.P.1999. The 1997-1998 fire event in Indonesia. *Nature & Resources* 35: 22-30.

Swetnam T.W. & Baisan C.H. 2003. Tree-ring reconstructions of fire and climate history in the Sierra Nevada and Southwestern United States. En: Veblen, W. Baker, L., Montenegro, G. & Swetnam, T.W. (eds). *Fire and Climatic Change in Temperate Ecosystems of the Western Americas*. Springer, New York. 158-195 pp.

Tsonis A.A. 2009. Dynamical changes in the ENSO system in the last 11,000 years. *Climate Dynamics* 33:1069-1074.

Van der Kaars, S., Tapper N. & Cook E.J. 2010. Observed relationships between El Niño-Southern Oscillation, rainfall variability and vegetation and fire history on Halmahera, Maluku, Indonesia *Global Change Biology* 16: 1705-1714.

Villers R.L. & Hernández L.J. 2007. Incendios forestales y el fenómeno de El Niño en México. Resúmenes de las comunicaciones de la IV Conferencia Internacional sobre incendios forestales. 13-17 mayo de 2007, Sevilla España.

Walker M.D., Ingersoll R.C. & Webber P.J. 1995. Effects of interannual climate variation and growth of two alpine forbs. *Ecology* 76: 1067-1083.

Weng H., Ashok K., Behera, S.K., Rao S.A. & Yamagata T. 2007. Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer. *Climate Dynamics* 29:113-129.

Weng H., Behera S.K. & Yamagata T. 2009. Anomalous winter climate conditions in the Pacific rim during recent El Niño Modoki and El Niño events. *Climate Dynamics* 32: 663-674.

Wright S.J. & Calderón O. 2006. Seasonal, El Niño and longer term changes in flower and seed production in a moist tropical forest. *Ecology Letters*, 9: 35-44.

Zhang Z. & Li D. 1999. A posible relationship between outbreaks of the oriental migratory locust (*Locusta migratoria manilensis*) in China and the El Niño episodes. *Ecological research* 14: 267 - 270.

Capítulo VII

Implicaciones del cambio climático en la fisiología ecológica de las plantas

Víctor L. Barradas, José Luis Landa y Juan Cervantes Pérez.

Resumen

El cambio climático global es un mecanismo muy complejo, arduo de entender, controversial y muy difícil de pronosticar. Por ello, la amenaza que representa para todos los seres vivos de nuestro planeta, es aún mayor de lo que se cree. Por otro lado, un cambio climático no solo involucra un cambio en la temperatura y la precipitación pluvial, sino en todas las demás variables climáticas ya que actúan en concordancia y que los modelos de distribución de especies o de nicho no toman en cuenta. En este capítulo se presenta una abstracción de las posibles implicaciones que puede tener este mecanismo en la vegetación desde el punto de vista funcional. Para ello, se presentan evidencias de un cambio climático en la región central montañosa del estado de Veracruz, México y su posible efecto en dos especies de encinos. Esto se realizó utilizando un modelo ecofisiológico basado en las funciones envolventes de la conductancia estomática en dependencia de las variables microclimáticas.

Palabras clave: conductancia estomática, ecofisiología vegetal, potencial hídrico, tendencias de precipitación,

Abstract

Global climate change is a very complex mechanism, very hard to understand, controversial, and very difficult to forecast. For that reason, the menace that this mechanism is representing to the living organisms of our planet is uneven harder than it is believed. On the other hand, a climate change not only implies a change in temperature and precipitation but in other climatic variables which acts synergistically, that niche or distribution models does not take into account. In this chapter, an abstraction about possible implications of this mechanism in vegetation from the ecophysiological point of view is made. To do this, some climate change evidences in the central mountainous region of the Veracruz State, Mexico and its possible effect on two oak species, is presented. This was made by using an ecophysiological model based on enveloping functions of the dependence of stomatal conductance on microclimate variables.

Keywords: plant ecophysiology, precipitation tendencies, stomatal conductance, water potential

Introducción

Hay muy pocas regiones del planeta donde las condiciones ambientales son continuamente favorables para todas las funciones fisiológicas de las plantas, lo que sí es frecuente, es que a lo largo del año la variabilidad del clima es evidente (Vázquez-Yanes, 1992). Una de las principales características de algunas regiones en los trópicos, es la restricción de la precipitación en algunos periodos del año donde al menos el 90% ocurre durante la estación lluviosa (Barradas *et al.*, 2004a). El crecimiento de las plantas en áreas de clima fuertemente estacional se confina a los períodos de condiciones favorables. Casi en todo el país, las condiciones favorables ocurren principalmente durante los meses de verano considerando que en las áreas con una pronunciada estación seca, el crecimiento es principalmente confinado al período de lluvias.

En un caso extremo, la adaptación de las plantas a altas altitudes es visto como una analogía de adaptación al clima (Hovenden y Brodribb, 2000). Siendo de gran interés la influencia de la altitud en las variables ambientales, como son la radiación fotosintéticamente activa, temperatura del aire, déficit de presión de vapor, precipitación pluvial, y de la posibilidad de aclimatación y adaptación de las plantas a condiciones medioambientales particulares (Körner *et al.*, 1986; Friend *et al.*, 1990). Las pendientes altitudinales proporcionan la oportunidad de estudiar la fisiología como una respuesta de las plantas a las condiciones ambientales particulares (Cordell *et al.*, 1999); y con ello poder inferir si las plantas serán capaces o no de enfrentar un cambio climático ya sea local o regional, o el global.

No obstante, los modelos de cambio climático generan escenarios de dimensión global aunque muchos de sus impactos se presenten a escala regional en combinación con modelos de mesoescala, además de presentar solo dos variables como la temperatura del aire y la precipitación pluvial que aunque muy importantes, éstas se encuentran en sinergia con otros

elementos del clima como la radiación solar, la humedad del aire, el viento y la evapotranspiración. Es decir, al mencionar un cambio climático no solo se refiere a que la precipitación y la temperatura cambien, sino también a todos los demás elementos. Un aumento o disminución de la precipitación implica una probable disminución o aumento de la radiación solar vía nubosidad, o un aumento de la temperatura del aire induce una mayor saturación conteniendo una mayor cantidad de vapor de agua con lo que se altera el déficit de presión de vapor, estableciéndose de esta manera una serie de retroalimentaciones que no son detectadas por los diferentes modelos de cambio climático.

Otras soluciones que se han dado para predecir una futura distribución de una especie o un conjunto de especies ante el cambio climático, son las del uso de modelos biológicos-ecológicos-climáticos como el denominado GARP (Genetic Algorithm for Rule-set Production) y el BIOCLIM (Species distribution model). GARP es un algoritmo que crea un modelo de nicho ecológico para una especie que representa las condiciones ambientales donde dicha especie sería capaz de mantener su población. GARP utiliza como entrada un conjunto de localidades (puntos) donde se sabe que la especie está presente y un grupo de coberturas geográficas que representan los factores ambientales que pueden, potencialmente, limitar la capacidad de supervivencia de la especie (Stockwell, 1999; Stockwell y Peters, 1999). BIOCLIM es un algoritmo que identifica a todas las zonas con un clima similar a los lugares donde se encuentran las especies de interés (Nix, 1986; Busby, 1991; McMahon, et al., 1996) y semejante al modelo GARP, genera el área potencial donde determinada especie puede prosperar. Estos modelos son alimentados con futuros escenarios climáticos y generan la nueva distribución potencial de la especie de interés; no obstante, para especies animales, estos modelos pueden tener buen éxito, pero en las especies vegetales existen algunos factores que no son tomados en cuenta como el síndrome de dispersión de las diferentes especies el cual es muy importante para conocer la potencialidad de la especie para colonizar nuevas áreas.

Desde el punto de vista de determinar la vulnerabilidad o la fragilidad de los diferentes ecosistemas ante el cambio climático se requiere que los modelos tengan una mejor precisión espacial y generen aquellas variables que afectan directamente a las plantas mencionadas anteriormente. Por otro lado, si se introduce la definición de grupos funcionales, que es cuando un grupo de diferentes especies presentan una función semejante, ésta provee una herramienta efectiva para

analizar la diversidad de respuestas ecofisiológicas en los ecosistemas naturales (Lambers *et al.*, 1998). Asimismo, también se consideran como grupos funcionales a las especies indicadoras ya que es poco probable que una especie con amplia distribución sea limitada por un solo factor ambiental en todo el intervalo de presencia. Sin embargo, mientras más pequeño y cercano sea el intervalo a las condiciones extremas para la vida, es más probable que un solo factor climático determine los límites de distribución de las especies. De esta manera, ciertas especies pueden servir como especies indicadoras; pero debe considerarse que en las diferentes etapas del ciclo de vida, tanto de plantas como de animales, generalmente se presentan diferentes tolerancias climáticas. Las mejores especies indicadoras climáticas son aquellas con amplias tolerancias edáficas (Heide-Jørgensen y Johnsen, 1998).

Una respuesta clave de las plantas al clima es el comportamiento estomático ya que controla tanto la transpiración (estatus hídrico) como la asimilación de CO₂. Así, al determinar las respuestas estomáticas a los diferentes factores climáticos en conjunción con modelos que describan ese comportamiento, se es capaz de inferir los posibles efectos que pudiera tener un cambio climático involucrando todos los elementos cruciales para esta función.

Con esto en mente, se explora desde las respuestas fisiológicas que pueden tener las diferentes especies vegetales a las diferentes variables climáticas hasta como las poblaciones pueden ser afectadas construyendo grupos funcionales resistentes o frágiles a estos cambios y se elucida sobre el posible efecto del cambio climático global. A modo de ejemplo se presenta en este trabajo el efecto que podría tener un cambio climático en dos especies de encinos de la región central montañosa del estado de Veracruz.

El cambio climático en la región central montañosa del estado de Veracruz

La región de las Grandes Montañas en el Estado de Veracruz, es parte del sistema montañoso donde existe una zona de contacto entre la parte más oriental del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre Oriental. Una de las principales características de esta región es su topografía tan característica de un gradiente altitudinal muy pronunciado, único en el mundo ya que en una distancia de 100 km ó menos de la costa se pueden encontrar altitudes de hasta 5.500 m snm y desde comunidades de bosques templados y de niebla hasta comunidades semiáridas y áridas (García-García y Montañez, 1991;

Barradas, 1983; Gómez-Pompa, 1978). Así, el clima en esta región es el resultado de una interacción compleja de los sistemas sinópticos que predominan (sistemas tropicales en verano y de latitudes medias en invierno por el desplazamiento del anticiclón de Las Azores-Bermudas), de la topografía-orografía, de la interacción planta-atmósfera y de la gran cercanía al litoral del Golfo de México.

La región también ha estado sujeta desde finales del siglo XIX a un cambio sistemático y extensivo del uso del suelo. Actualmente, estos cambios van desde un sistema forestal hasta un sistema de ganadería intensiva pasando por los sistemas agrícolas extensivos (García-Romero, et al., 2010)

En la actualidad, se han realizado algunos estudios climáticos en esta región del estado de Veracruz, y se ha detectado un cambio climático donde la precipitación pluvial ha disminuido a barlovento pero ha aumentado a hacia el parteaguas y a sotavento del sistema montañoso; y muy similarmente la frecuencia de la niebla se ha visto disminuida en ciertos niveles (Barradas, et al., 2004a), donde es evidente que el nivel de condensación por ascenso ha aumentado de unos 200 a unos 400 m de altura (Barradas, et al., en prensa). En el cuadro 1 se muestran las tendencias que se han detectado tanto en la precipitación pluvial como en la frecuencia de nieblas.

El método de funciones envolventes como una alternativa de análisis ecofisiológico en relación con el clima

El efecto que cada variable climática tiene sobre la conductancia estomática (g_s) se determina a partir de modelos sencillos a los que denominan como funciones envolventes. Este método consiste en seleccionar los datos del probable límite superior de la función representada por una nube de puntos en cada uno de los diagramas producidos al graficar la conductancia estomática como una función de cualquier variable (edáfica y/o climática). Este método tiene tres supuestos: 1) que la función envolvente representa la respuesta óptima estomática a la variable seleccionada (e.g. Radiación Fotosintéticamente Activa RFA), 2) los puntos que se encuentran por debajo de la función seleccionada son el resultado de un cambio en cualquiera de las otras variables (Déficit de Presión de Vapor, DPV, Temperatura del Aire, T_A) y 3) que no existen interacciones sinérgicas (Jarvis, 1976; Fanjul y Barradas, 1985; Jones, 1992; Ramos-Vázquez y Barradas, 1998; Barradas et al., 2004b). Otra variable que se puede añadir a este método

es la dependencia de g_s en el estatus hídrico de la planta, denominado como potencial hídrico (Ψ) variable ecofisiológica que da mayor información tanto ambiental como fisiológica, si solo se tratase de la humedad del suelo.

Las curvas utilizadas para cada variable ambiental que se ajustan a valores experimentales son de las formas que se observan en la figura 1

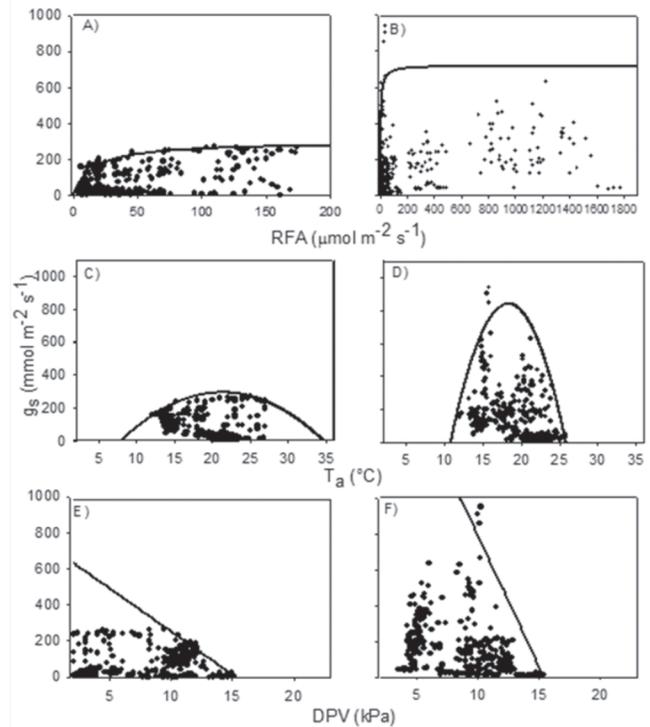


Figura 1. Diagramas de dispersión y función envolvente (línea continua) de la conductancia estomática (g_s) en relación con la radiación fotosintéticamente activa (RFA) (A, B), temperatura del aire (T_A) (C, D) y déficit de presión de vapor (DPV) en *Quercus sartorii* (A, C y E) y *Quercus candicans* (B, D y F) en la época húmeda en la región central montañosa de Veracruz.

Los valores envolventes de la conductancia estomática (g_s) en función de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) se ajustan a una función hiperbólica:

$$g_s(RFA) = \frac{aRFA}{b + RFA} \quad \text{Ec (1)}$$

donde a representa el valor asintótico de g_s ó g_{sMAX} y b indica la sensibilidad de g_s a cambios en RFA.

En cuanto a la relación de g_s en función de la temperatura del aire (T_A) los valores envolventes se ajustan a una ecuación cuadrática:

$$g_s(T_A) = A + BT_A + CT_A^2 \quad \text{Ec (2)}$$

Cuadro 1. Tendencias de la precipitación pluvial (mm año^{-1} ; T_{PP}) y de la frecuencia de nieblas (T_{NIEBLA}) en la región central montañosa del estado de Veracruz. El signo positivo se refiere a un incremento en la tendencia y el negativo a un decremento.

Precipitación pluvial	T_{PP}	Niebla	T_{NIEBLA}
Cd. Serdán	0.40	Altotonga	T+
Tecamachalco	0.30	Atzálan	T+
Tlacotepec	0.30	Huatusco	T+
Altotonga	1.10	Jalacingo	T+
Jalacingo	0.80	Xalapa	T+
El Coyol	-0.60	Coatepec	T-
Elotepec	-0.60	Perote	T-
Xalapa	-1.24	Las Minas	T-
Naranjal	-1.00	Los Pescados	T-
Naolinco	-0.80	Tembladeras	T-
		Teocelo	T-

donde A, B y C son constantes propias de la parábola con las que es posible conocer la temperatura óptima a la que ocurre $g_{S,MAX}$ y las temperaturas cardinales (mínima y máxima) en las que la función estomática es nula. Mientras que la función de g_s en relación con el déficit de presión de vapor (DPV) generan una ecuación lineal simple:

$$g_s(DPV) = a + b(DPV) \quad \text{Ec (3)}$$

de manera muy semejante la respuesta estomática al potencial hídrico también es una ecuación lineal simple:

$$g_s(\Psi) = \alpha + \beta(\Psi) \quad \text{Ec (4)}$$

donde, b y β muestran la sensibilidad de g_s al DPV y a Ψ , respectivamente; a y α son los corrimientos del cero.

Aplicación de las funciones envolventes a dos especies de encino de la región central montañosa del estado de Veracruz

Se realizó una serie de mediciones microambientales (RFA, T_{Ar} , HR [DPV]) y ecofisiológicas (g_s , Ψ) en tres sitios de estudio en la región: Xaltepec, La Joya y Casa Blanca

en el área central montañosa del estado de Veracruz. Xaltepec se encuentra ubicada sobre las estribaciones orientales del Cofre de Perote ($19^{\circ} 35' N$ y $96^{\circ} 56' W$) a 1570 m snm; su clima es templado-húmedo C (fm) con una temperatura anual promedio de $18^{\circ} C$ y precipitación anual promedio de 1509 mm. La Joya se ubica en el municipio de Acajete ($19^{\circ} 36' N$ y $97^{\circ} 01' W$) a 2179 m snm; su clima es frío-húmedo (A)C(fm) con una temperatura anual promedio de $16^{\circ} C$ y su precipitación media anual es de 1000 mm (García, 1964). Casa Blanca se encuentra en $19^{\circ} 38' N$ y $97^{\circ} 08' W$ y 2462 m snm; su clima frío-húmedo (A) C(fm) con una temperatura anual promedio de $12.4^{\circ} C$ y su precipitación media anual es de 473.5 mm (García, 1964). Las mediciones se realizaron de abril de 2005 a marzo del 2006.

El efecto de la RFA en la conductancia estomática

De acuerdo a la ecuación 1, los valores de a ó $g_{S,MAX}$ en *Quercus sartorii* se mantuvieron más bajos en la época húmeda (279.74; $r^2 = 0.88$) y en la época seca (423.89; $r^2 = 0.63$) en comparación con *Quercus candicans* que presentó valores más altos en la época húmeda (721.88; $r^2 = 0.88$) y en la época seca (496.85; $r^2 = 0.79$). Mientras que los valores de b en *Quercus sartorii* fueron consistentemente más bajos en la época húmeda (8.35;

$r^2 = 0.88$) en comparación con la época seca (25.00; $r^2 = 0.63$). El comportamiento en *Quercus candicans* fue muy similar presentando valores de b bajos en la época húmeda (3.97; $r^2 = 0.88$) en comparación con la época seca (82.57; $r^2 = 0.79$). Esto refleja una creciente sensibilidad en ambas especies de g_s a la RFA, de la época húmeda a la época seca (Fig. 2A y B, Cuadro 2).

El efecto de T_A en la conductancia estomática

Las constantes de la ecuación 2 (A, B y C) fueron para *Quercus sartorii* de -448.34, 69.58 y -1.63 ($r^2 = 0.97$) en la época húmeda y de -923.86, 123.23 y -3.07 ($r^2 = 0.91$) en la época seca. Para *Quercus candicans* los valores que se obtuvieron en la época húmeda fueron de -658.84, 231.60 y -7.93 ($r^2 = 0.95$) y en la época seca fueron de -954.31, 147.85 y -3.84 ($r^2 = 0.96$). Con el análisis de las curvas se determinaron las temperaturas óptimas (T_O), y las temperaturas cardinales (T_{MIN} y T_{MAX}), para la función de la g_s , en las que los estomas tienden a cerrarse. Los estomas de *Quercus candicans* fueron más sensibles a T_A en la época húmeda aunque con una tendencia preferente (T_O) más baja en las dos épocas; mientras que en *Quercus sartorii* se refleja una T_O por las temperaturas altas (Fig. 1C y D; Cuadro 3) en las dos épocas.

El efecto del DPV en la conductancia estomática

En la época húmeda se registraron valores bajos en déficit de presión de vapor (DPV) en ambas especies y valores altos en la época seca. En *Quercus sartorii* la conductancia estomática decreció linealmente al aumentar el DPV en la época húmeda ($b = 733.53$ y $a = -47.64$ $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{kPa}^{-1}$, $r^2 = 0.95$) y se mantiene la tendencia en la época seca ($b = 785.56$ y $a = -39.19$ $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{kPa}^{-1}$, $r^2 = 0.97$) mostrando un ligero aumento en la g_s al aumentar el DPV. En *Quercus candicans* el comportamiento fue diferente, presentando valores de g_s altos en la época húmeda ($b = 2235.66$ y $a = -145.19$ $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{kPa}^{-1}$, $r^2=0.95$) y bajos en la época seca ($b = 807.07$ y $a = -36.30$ $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{kPa}^{-1}$).

$r^2=0.87$) siendo éste más sensible a los cambios de DPV que *Q. sartorii* (Fig. 1E y F).

El efecto de Ψ en la conductancia estomática

Una relación lineal (ecuación 4) describió el efecto de Ψ en g_s , siendo la pendiente la sensibilidad de los estomas a los cambios de Ψ . El efecto de Ψ sobre g_s en *Quercus sartorii* no fue tan evidente en la época húmeda ($\alpha=24$ $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$, $r^2 = 0.94$) como en la época seca ($\alpha=77$ $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$, $r^2=0.98$) mostrando una correlación positiva consistente con el Ψ , donde los estomas tienden a abrirse al aumento de Ψ . Los estomas de *Q. candicans* en la época húmeda, mostraron más sensibilidad ($\alpha = 231$ $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$, $r^2 = 0.88$) a los cambios de Ψ ; sin embargo, en la época seca ($\alpha = 77$ $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$, $r^2 = 0.91$) los estomas fueron menos sensibles que en la época húmeda (Fig. 2).

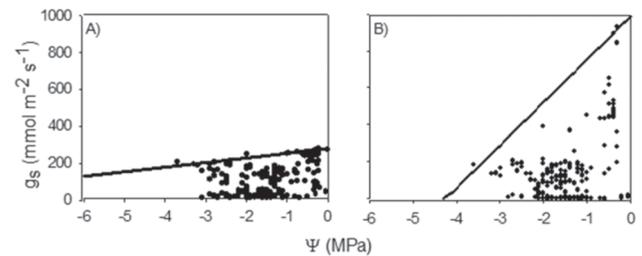


Figura 2. Diagramas de dispersión y función envolvente (línea continua) de la conductancia estomática (g_s) en relación con el potencial hídrico foliar (Ψ), en *Quercus sartorii* (A) y *Quercus candicans* (B) en la época húmeda, en la región montañosa central de Veracruz.

Algunas implicaciones del cambio climático global en las especies estudiadas

Con el desarrollo de los modelos presentados se pueden inferir los efectos de un posible cambio climático en estas especies que afecte su distribución. *Q. candicans* es una especie que podría desaparecer debido a su intervalo óptimo térmico restringido, que probablemente

Cuadro 2. Valores estimados de los parámetros a y b , valores asintótico y de sensibilidad de g_s a cambios en RFA, para las dos especies *Quercus sartorii* y *Quercus candicans* en la época húmeda y seca en la región central montañosa del estado de Veracruz .

Especies	Época húmeda			Época seca		
	a ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	b ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	r^2	a ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	b ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	r^2
<i>Q. sartorii</i>	279.74	8.35	0.88	223.89	25.00	0.63
<i>Q. candicans</i>	721.88	3.97	0.88	496.85	82.57	0.79

no le permitirá sobrevivir donde actualmente se encuentra; no obstante, esta especie podría acceder a sitios más favorables en altitudes superiores donde la temperatura fuera más adecuada para su desarrollo, pero esta migración depende principalmente del síndrome de dispersión de sus semillas en cuanto que algún vector fuera capaz de transportarlas a altitudes superiores de donde se encuentra actualmente. *Q. sartorii* es una especie asociada a climas cálido-húmedos que probablemente pueda sobrevivir al aumentar la temperatura del aire como consecuencia de un cambio climático; sin embargo, esta especie no es tolerante a altas radiaciones, más bien es una especie de sombra (Fig. 1A). Como se mencionó anteriormente, esta región donde habita *Q. sartorii* se está incrementando la intensidad de la radiación solar al disminuir la frecuencia de nieblas y la nubosidad (por la disminución de la precipitación pluvial), por esta razón esta especie también podría estar destinada a desaparecer.

En la Fig. 3 se presenta la densidad relativa actual de los dos encinos en estudio y de acuerdo con los registros obtenidos, se encontró que a lo largo del gradiente altitudinal en los sitios de Xaltepec (1570 m snm), La Joya (2179 m snm) y Casa Blanca (2462 m snm), las

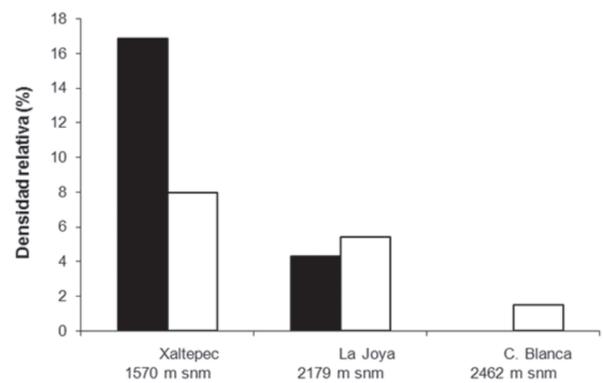


Figura 3. Densidad relativa de *Quercus sartorii* (■) y *Quercus candicans* (□) a lo largo de un gradiente altitudinal en la región central montañosa del estado de Veracruz.

algunos individuos en Casa Blanca (1.4%) (Fig. 3). Esta distribución actual de estas dos poblaciones de encinos definitivamente cambiará en frente de un cambio climático disminuyendo en altitudes inferiores y aumentando si existe un mecanismo de traslado (síndrome de dispersión) de sus semillas a altitudes superiores llevando consigo un cambio en la estructura y composición florística del bosque de pino encino de esta región del estado de Veracruz.

Cuadro 3. Temperaturas óptima (T_o) y cardinales (T_{MIN} y T_{MAX}) de la función de g_s de *Quercus sartorii* y *Quercus candicans* en la época húmeda y seca en la región central montañosa del estado de Veracruz. .

Especies	Época húmeda			Época seca		
	T_{MIN} (°C)	T_{MAX} (°C)	T_o (°C)	T_{MIN} (°C)	T_{MAX} (°C)	T_o (°C)
<i>Q. sartorii</i>	12	27	23	14.2	30.2	22.2
<i>Q. candicans</i>	12	25.8	21	12.4	29.6	16

poblaciones varían, registrando un mayor número de individuos en la parte baja y disminuyendo con la elevación. *Q. sartorii* presentó su mayor densidad en Xaltepec (16.8 %) y al aumentar la altitud, el número de individuos fue disminuyendo con un 4.3% en La Joya y sin presencia alguna en Casa Blanca; similarmente, la población de *Q. candicans* disminuyó su densidad, al aumentar la altitud de Xaltepec (7.9 %), en La Joya (5.3 %), pero a diferencia de *Q. sartorii* con presencia de

Agradecimientos

Agradecemos a la LCA Mónica Ballinas Osegura su apoyo técnico, y el apoyo económico brindado por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales mediante el proyecto SEMARNAT-2004-C01-332/A-1 "Modelación de los servicios ambientales hidrológicos, de captura de carbono y de biodiversidad en ecosistemas de la región central del estado de Veracruz".

Literatura citada

- Barradas, V. L. 1983.** Capacidad de captación de agua a partir de la niebla en *Pinus montezumae* Lambert, de la región de las Grandes Montañas del Estado de Veracruz. *Biótica* 8: 427-431.
- Barradas, V.L., J. Cervantes Pérez. & C. Puchet Anyul. 2004a.** Evidencia de un cambio climático en la región de las Grandes Montañas del estado de Veracruz, México. Pp. 213-219. En: García Codrón J.C., C. Diego Liaño, P. Fernández de Arroyabe Hernández, C. Garmendia Pedraja & D. Rasilla Álvarez (eds). *El Clima entre el Mar y la Montaña*. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC) Serie A, No. 4. Universidad de Cantabria, Santander, España.
- Barradas, V.L., A. Ramos-Vázquez. & A. Orozco-Segovia. 2004b.** Stomatal conductance in a tropical xerophilous shrubland at a lava substratum. *International Journal of Biometeorology* 48:119-127.
- Barradas, V.L., J. Cervantes-Pérez, R. Ramos-Palacios, C. Puchet-Anyul, P. Vázquez-Rodríguez. & R. Granados-Ramírez. (2010).** Meso-scale climate change in the central mountain region of Veracruz State, Mexico. Pp. 549-556 En: Bruijnzeel LA et al. (eds), Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Busby, J.R. 1991.** BIOCLIM - A Bioclimatic Analysis and Prediction System. Pp. 64-68. En: Margules, C.R. & M.P. Austin (eds) *Nature Conservation: Cost Effective Biological Surveys and Data Analysis*. CSIRO Canberra, Australia.
- Cordell, S., Goldstein, G., Meinzer, F.C. & Handley, L.L. 1999.** Allocation of nitrogen and carbon in leaves of *Metrosideros polymorpha* regulates carboxylation capacity and $\delta^{13}\text{C}$ along an altitudinal gradient. *Functional Ecology* 13: 811-818.
- Fanjul, L. & Barradas, V.L. 1985.** Stomatal behaviour of two heliophile understorey species of a tropical deciduous forest in Mexico. *Journal of Applied Ecology* 22: 943-954.
- Friend, A.D., F.I. Woodward & V.R. Switsur. 1989.** Field measurements of photosynthesis, stomatal conductance, leaf nitrogen and $\delta^{13}\text{C}$ along altitudinal gradients in Scotland. *Functional Ecology* 3: 117-122.
- García, E. 1964.** *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koeppen*. Instituto de Geografía. UNAM. México, D.F.
- García-García, F., & R. A. Montañez. 1991.** Warm fog in eastern Mexico: A case study. *Atmósfera* 4: 53-64.
- Gómez-Pompa, A. 1978.** *Ecología de la vegetación del estado de Veracruz*. CECSA, México.
- García-Romero, A., Y. Montoya Resendiz, M.V. Ibarra García & G.G. Garza Merodio. 2010.** Economía política en la evolución contemporánea de los usos del suelo y la deforestación en México: El caso del volcán Cofre de Perote. *Interciencia* 35: 321 – 328.
- Heide-Jørgensen, H.S. & I. Johnsen. 1998.** *Ecosystem vulnerability to climate change in Greenland and the Faroe islands*. Miljønyt No. 33, Danish Environmental Protection Agency, Denmark.
- Hovenden, J.M. & T. Brodribb. 2000.** Altitude of origin influences stomatal conductance and therefore maximum assimilation rate in southern Beech *Nothofagus cunninghamii*. *Australian Journal of Plant Physiology* 27: 451-456.
- Jarvis, P.G. 1976.** The interpretation of the variation in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philos Trans R Soc Lond (Biol)* 273: 593-610.
- Jones H.G. 1992.** *Plants and microclimate*. Cambridge University Press. Cambridge. UK
- Körner, Ch., P. Bannister & A.F. Mark. 1986.** Altitudinal variation in stomatal conductance, nitrogen content and leaf anatomy in different plant lifeforms in New Zealand. *Oecologia* 69: 577-588.
- Lambers, H., F.S. Chapin III & T.L. Pons. 1998.** *Plant physiological ecology*. Springer, NY. E.U.A.
- McMahon, J.P., M.F. Hutchinson, H.A. Nix, & K.D. Ord. 1996.** ANUCLIM Version 1 User's Guide. ANU, CRES. Canberra, Australia.
- Nix, H.A. 1986.** A biogeographic analysis of Australian Elapid snakes. En: Longmore, R. (ed.) *Atlas of Australian Elapid Snakes*. *Australian Flora and Fauna Series* 8: 4-15.
- Ramos-Vázquez A. & Barradas V.L. 1998.** El efecto del microambiente en la conductividad estomática de *Buddleia cordata* H.B.K., en la Reserva del Pedregal de San Ángel. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 62: 63-71.
- Stockwell, D.R.B. 1999.** Genetic algorithms II. Pp. 123-144. En: Fielding, A.H. (ed.) *Machine Learning Methods for Ecological Applications*. Kluwer Academic Publishers, Boston. EUA.
- Stockwell, D. R. B., & D. P. Peters. 1999.** The GARP modelling system: Problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographic Information Systems* 13: 143-158.
- Vázquez-Yanes, C. 1992.** La fisiología ecológica de plantas. *Ciencias* 6: 63-68

Capítulo VIII

Las arecáceas de la península de Yucatán ante el cambio climático: aproximación ecofisiológica y de distribución

Roger Orellana, Lilia Carrillo, y Celene Espadas

Resumen

Para evaluar el posible efecto de los escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán, en este trabajo se presenta un análisis climático regional de diez escenarios proyectados hacia el año 2020, basándonos en los modelos HADCM3, GFDL-R30, CGCM2 y ECHAM4. El procedimiento para generar los escenarios fue a través de la reducción de escala, para lo cual se seleccionaron 48 estaciones meteorológicas a las que se aplicaron los incrementos de temperatura y precipitación de las salidas de los escenarios. Los datos fueron analizados climáticamente con base en el Sistema Climático de Köppen, modificado para las condiciones de México (García, 2004) y posteriormente se estimaron los promedios anuales de temperatura y precipitación, el porcentaje de lluvia invernal, el índice P/T, la sequía intraestival, y las anomalías de temperatura y precipitación para identificar los cambios y la variabilidad entre los escenarios y el escenario base, así como los tipos climáticos. Para indagar señales biológicas de cambio climático se realizaron experimentos para analizar la sensibilidad de las palmeras nativas de la península de Yucatán ante diferentes condiciones de incremento de CO₂. Para ello, se seleccionaron 10 especies de palmeras, las cuales fueron confinadas en cámaras con condiciones controladas de CO₂ (360ppm y 750ppm) y temperaturas máximas. Los parámetros analizados fueron asimilación de CO₂, crecimiento y pigmentos. Las especies clasificadas como umbrófilas presentaron diferencias significativas en la asimilación de CO₂ entre cámaras, pero la concentración duplicada de CO₂ no afectó significativamente el crecimiento ni los pigmentos fotosintéticos. Para evaluar el posible efecto del cambio climático en la distribución de las palmeras se modeló la distribución potencial de cuatro especies endémicas ante dos escenarios muy contrastados el CGCM2A21 y el HADCM3B21. Los resultados muestran cambios moderados en las áreas de distribución potencial de las especies ante ambos escenarios, pero cabe señalar que se presentan cambios ligeramente superiores ante el escenario CGCM2A21.

Palabras clave: palmas, Concentración de CO₂, distribución potencial, Yucatán

Abstract

In order to recognize the possible future effect of climate change in Yucatan Peninsula we selected the GCM models HADCM3, GFDL-R30, CGCM2 and ECHAM4T, outlined in ten different possible climatic scenarios drawn by the IPCC, and were projected to the year 2020. For regional projections we applied the "down scaling" method using a temperature and rain data set from 48 meteorological stations; the outputs of climate change scenarios were expressed in temperature increases. We estimated the annual averages of temperature and rainfall, the winter rain, Lang index or P/T, midsummer drought, as well as temperature and rainfall anomalies between the base scenario and possible future scenarios. Additionally the information was analyzed through the modified Köppen Climatic System (García, 2004). To estimate any biological effects to climate change we experimented with ten native palms species, Individuals of them were confined in chambers under CO₂ controlled conditions (370ppm and 740ppm), and maximum temperatures. CO₂ assimilation, growth and pigments concentration parameters, were analyzed to determine the species level sensibility to different increases of atmospheric CO₂. The species classified previously as shade tolerant presented significant differences for CO₂ assimilation between neither concentrations; while the duplicated concentration of CO₂ affects significantly neither the growth nor the photosynthetic pigments concentrations. The potential distribution of four endemic palm species in two contrasting scenarios (CGCM2A21 and HADCM3B21), was analyzed as a possible effect of the climate change. The potential distribution of the species show moderate changes under both scenarios. Moreover, there are major changes in the potential distribution of these palms under the scenario CGCM2A21.

Keyword: palms, CO₂ concentration, potential distribution, Yucatan

Introducción

Es un hecho evidente que en la actualidad, el calentamiento global está conduciendo hacia cambios

ambientales, tanto en grandes regiones del planeta, así como en zonas particularmente frágiles. Estos cambios ambientales son consecuencia de lo que hoy puede denominarse cambio climático antropogénico. Las actividades humanas han repercutido en el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Estas emisiones se remontan desde la revolución agrícola en Asia, aproximadamente hace cinco mil años y las debidas sobre todo a la revolución industrial iniciada a mediados del siglo XIX. Además, los cambios de uso de suelo han ocasionado grandes transformaciones en el paisaje que han conllevado a grandes emisiones de GEI. Actualmente, ambas fuentes de emisiones continúan su ascenso.

El clima y sus variaciones están mostrando alteraciones en sus patrones, las zonas de transición climática, tales como las de climas subhúmedos o los semiáridos son las más susceptibles a tales cambios. Sin embargo, las señales sobre el cambio climático son discutibles en buena medida, pero el hecho que se presenten desfases a consecuencia del adelanto de las temperaturas altas o retrasos en la estación lluviosa, evidencian que nos aproximamos a cambios en el clima. Es un hecho que en el planeta desde hace tiempo en algunas regiones los climas tienden a ser:

- 1) Más secos, con evidentes procesos de desertización.
- 2) Más húmedos, con estacionalidad lluviosa muy marcada.
- 3) Más calientes, con las consecuencias evidentes.

Los expertos en el tema se han basado en evidencias registradas en los sistemas "sensibles" a los cambios atmosféricos. Se ha documentado que el riesgo de extinción de especies está en función del estrés térmico, como consecuencia de los incrementos de temperatura, al que se ven sometidos numerosos sistemas biológicos. Asimismo, se ha planteado que cambios en la temperatura y en los regímenes de precipitación pluvial ocasionarían cambios notables en las latitudes altas y menos apreciables en los trópicos. No obstante, la sensibilidad en muchas regiones tropicales se ha visto favorecida por la fragmentación y alteración de los ecosistemas naturales, así como por la degradación de los suelos.

La península de Yucatán es una región natural, cultural y económica que no está libre de la influencia del cambio climático, a pesar de que no ha sido un gran

contribuyente al calentamiento global. Sin embargo es de considerar que las condiciones geográficas que la conforman la hacen sensible a que sufra tales consecuencias, por lo siguiente:

- 1) Está en una zona de transición entre los climas secos y húmedos.
- 2) Tiene una alta influencia marítima.
- 3) Está sujeta al embate de fenómenos hidrometeorológicos (nortes, ondas tropicales y ciclones), los que pueden intensificarse en número, frecuencia e intensidad como producto del calentamiento de la superficie oceánica.
- 4) En la península se ha transformado y fragmentado gran parte de su cubierta vegetal, se estima que en Yucatán se ha transformado el 80% de sus selvas, en tanto que Campeche y Quintana Roo el 50% (González-Iturbe et al., 2002).

¿Hay señales de cambio climático en la Península de Yucatán?

En la Península de Yucatán se han recibido diferentes tipos de señales al respecto en los ciclos térmicos, hidrológicos y biológicos. Como precedente se muestran las series largas de un estudio de caso, donde se distinguen las tendencias de la temperatura y la precipitación en la ciudad de Izamal, Yucatán y que ejemplifican claramente algunas variaciones, tales como el incremento de la temperatura y la disminución de la precipitación (Figura 1).

El Cambio climático trae consecuencias en el medio natural, que se expresan en posibles escenarios de sensibilidad a los cambios de temperatura, y en la dimensión humana, la vulnerabilidad, la mitigación y la adaptación al cambio climático.

Es importante transmitir a los pobladores de esta región la magnitud de esos posibles cambios, ya que pueden ser desde imperceptibles hasta catastróficos y dependerán de la intensidad y duración de una anomalía en la lluvia o la temperatura, así como del grado de vulnerabilidad de la sociedad o ecosistema.

Escenarios de cambio climático.

Los escenarios de cambio climático son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro. Constituyen un instrumento apropiado para analizar de

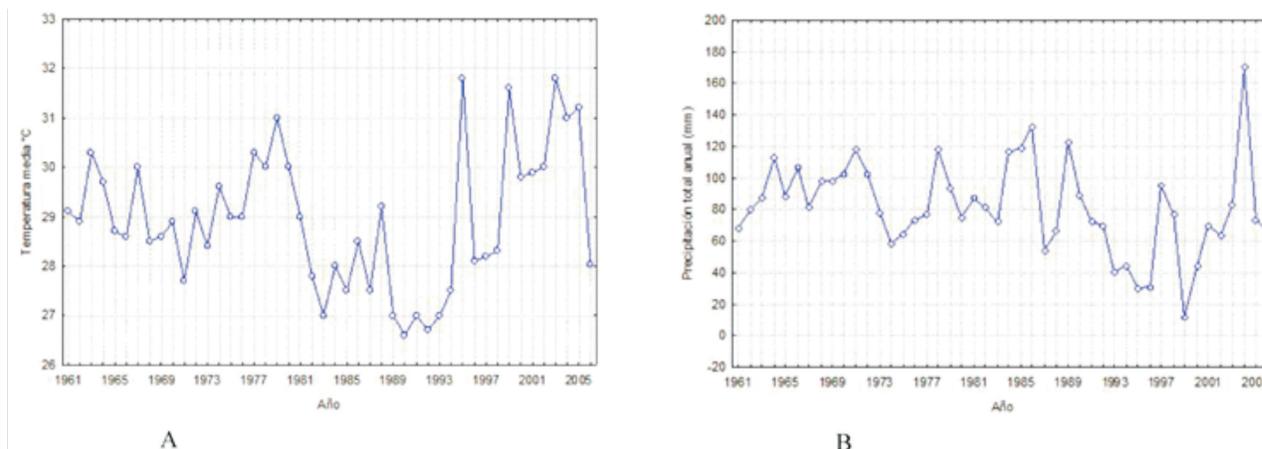


Figura 1. Valores históricos de la a) temperatura media anual en Izamal, Yucatán, y de la b) precipitación anual que abarcan desde el año 1960 hasta 2005.

qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) futuras y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis; *no son predicciones ni pronósticos*. Debido a que indudablemente hay incertidumbres asociadas a las proyecciones futuras del clima, se hace indispensable utilizar varios modelos que reflejen un rango posible de cambio climático ante las variaciones de las emisiones de GEI por actividades humanas. La mayoría de los escenarios se representan por medio de mapas a escala regional, ya que la escala de los incrementos es a nivel de grandes territorios y con diferentes resoluciones.

Una de las principales utilidades de la proyección de los escenarios de cambio climático es la valoración de los efectos que tendrán estos cambios sobre el ambiente, y consecuentemente sobre las actividades socioeconómicas de la población. En este sentido, a través de su contribución en la identificación de sitios vulnerables y sitios con mayores y menores riesgos, se pretende que contribuyan a la planeación de estrategias en el Programa Especial de Cambio Climático del gobierno federal.

Familias de escenarios posibles que se han propuesto.

Se han generado diversos tipos de escenarios posibles de acuerdo a los componentes socioeconómicos y por

Cuadro 1. Resumen de las características de los escenarios socioeconómicos del IPCC, (Las cifras entre paréntesis corresponden a proyecciones) Fuente: Stern 2007

Escenarios IPCC	A1Fi	A2	B1	B2
Nombre	Mercados Mundiales	Empresa Nacional	Sostenibilidad Global	Tutela Local
Crecimiento de la población	Bajo (7,000 millones)	Elevado (15,000 millones)	Bajo (7,000 millones)	Medio (10,000 millones)
Crecimiento del PIB mundial	Muy elevado 3.5% anual (550 billones de US DLL)	Medio 2% anual (243 billones de US DLL)	Elevado 2.75 anual (328 billones de US DLL)	Medio 2% anual (225 billones de US DLL)
Grado de convergencia: Cociente de la relación entre el PIB de los países ricos y los países pobres	Elevado (1,6)	Bajo (4,2)	Elevado (1,8)	Medio (3,0)
Emisiones	Elevadas	Medio Elevadas	Bajas	Medio - Bajas

tanto de posibles intensidades en las emisiones de los gases de efecto invernadero. Cada línea evolutiva está basada en una dirección de los acontecimientos futuros globales y regionales, de tal manera que entre ellas difieren con un grado de irreversibilidad creciente. Describen futuros divergentes que cubren una parte considerable de las incertidumbres inherentes a las principales fuerzas determinantes. Abarcan una gran diversidad de características futuras decisivas, como el cambio demográfico, el desarrollo económico o el cambio tecnológico. Para tener idea de la relación existente entre las emisiones de los GEI y las condiciones socioeconómicas en las regiones del planeta, en el cuadro 1 se muestran las diferentes características de dichas familias. Las del grupo A ponen énfasis en el desarrollo económico, en tanto que las del grupo B en el desarrollo sustentable. Entre sí difieren en cuanto al grado de convergencia económica y social.

Con base en análisis recientes de calentamiento global se han propuesto 40 escenarios del clima repartidos en las cuatro líneas evolutivas. Para ello se emplearon seis modelos basados en las características y los forzamientos asociados a cada una de las líneas evolutivas. Los resultados están disponibles a través del centro de distribución de los datos de IPCC. Nosotros hemos seleccionado únicamente cuatro modelos, los que se detallan más adelante.

Modelos utilizados y su resolución.

El trabajo que hemos realizado ha quedado concretado en la obra "Atlas Escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán" (Orellana *et al*, 2010). Hemos seleccionado cuatro modelos generales de circulación de la atmósfera acoplados al océano. No todos los modelos cuentan con salidas de las posibles familias de escenarios socioeconómicos y de emisiones.

En el cuadro 2 se muestran las diez salidas que hemos trabajado, combinando modelos y familias de escenarios posibles socioeconómicos. Las salidas de cada modelo son diferentes, en tanto tienen diferente resolución, diferente malla, rejilla o escala. Además no consideran exactamente las mismas variables como por ejemplo el número de capas atmosféricas o el número de gases de invernadero considerados. Esto los hace incomparables. El contar con varios modelos y varias salidas nos hace saber los niveles de incertidumbre hacia diferentes horizontes o años de análisis.

Procedimientos que se han seguido.

Para lograr la creación de los posibles escenarios, se ha hemos seguido el procedimiento de reducción de escala o "downscaling" que conduce a que se detallen los escenarios a escala regional. Sin embargo, el detalle de estos dependerá de la información con la que se disponga, para lo cual se seleccionaron los datos de 48 estaciones meteorológicas de la península, con base en un control de calidad espacial y temporal basado en herramientas manuales y estadísticas. Para la representación cartográfica de los escenarios se siguieron los siguientes procedimientos:

1. Control de calidad de las bases de datos de las estaciones meteorológicas (programa Out- detect).
2. Análisis climático de los incrementos de temperatura y precipitación con base en el Sistema climático de Köppen, modificado para las condiciones climáticas de México (García 2004).
3. Interpolación de los incrementos con Kriging y despliegue espacial de la información (programas GS+, IDRISI 14.0 Kilimanjaro, ARC GIS 9.1 y COREL).
4. Edición cartográfica e interpretación de los mapas.

Cuadro 2. Modelos de Circulación General utilizados y las salidas con que cuentan

MODELOS DE EMISIONES	CGCM2	ECHAM4	GFDL-R30	HADCM3
AIFI	NO	NO	NO	SI
B1	NO	NO	NO	SI
A2	SI	SI	SI	SI
B2	SI	SI	SI	SI

Resultados sobre los escenarios.

Se estimaron los promedios anuales de temperatura y precipitación, el porcentaje de lluvia invernal, el índice P/T, la sequía intraestival, y las anomalías de temperatura y precipitación para identificar los cambios y la variabilidad entre los escenarios y el escenario base. En estos hemos encontrado una marcada tendencia al aumento de la temperatura, sobre todo hacia la zona suroeste de la región peninsular (ilustración 6)*. Se espera que la información espacial obtenida sobre los posibles escenarios para la península contribuya para realizar diversos estudios y en la evaluación de diversos parámetros:

1. Parámetros ambientales:
 - a) deforestación,
 - b) degradación,
 - c) erosión,
 - d) aumento del nivel del mar,
 - e) reducción del acuífero, etc.
2. Actividades socioeconómicas y agropecuarias.
3. Niveles de infraestructura.
4. Niveles de marginación y pobreza de la población.
5. Migración humana.

Estudios con Arecáceas.

Algunas investigaciones se han dirigido a las posibles consecuencias del cambio climático a nivel biológico y se está en la búsqueda de posibles señales en algunas especies. Estas investigaciones deberían dirigirse en varios niveles:

- Especies
- Comunidades
- Grupos biológicos
- Grupos funcionales

Uno de estos grupos que pueden ser "clave" en los trópicos es el de las palmeras (Arecaceae). Las palmeras en los trópicos son la segunda Familia botánica en importancia económica y cultural. En algunas sociedades, son fuente de extracción de alimento, materiales de construcción, artefactos, ceremoniales, etc. México no es un país con gran riqueza de especies, tan solo se han registrado 74 (Cuadro 3), aunque podría pensar en un número un poco más elevado.

La porción mexicana de la península de Yucatán (al exceptuar El Petén de Guatemala y parte de Belice que forman parte fisiográfica de esta región) cuenta con 20 especies (Cuadro 4), siendo solamente tres especies endémicas a la región.

La investigación que hemos realizado ha sido diseñada en dos vertientes:

A) El estudio de las posibles respuestas de las palmeras nativas al calentamiento global y por tanto al cambio climático.

B) El estudio de los posibles escenarios de distribución, teniendo en cuenta los cambios en el clima de acuerdo con los escenarios de cambio climático.

A) Posibles respuestas de las palmeras nativas al calentamiento global y por tanto al cambio climático.

De las 20 especies peninsulares, fueron elegidas diez para la evaluación del grado de sensibilidad que presentan ante el cambio climático:

Cuadro 3. Número de especies por Género, presentes en México.

SUBFAMILIA	Género	Cantidad de spp.
Coryphoideae	<i>Acoelorrhaphe</i>	1
	<i>Brahea</i>	13
	<i>Coccothrinax</i>	1
	<i>Cryosophila</i>	2
	<i>Sabal</i>	8
	<i>Thrinax</i>	1
	<i>Washingtonia</i>	2
Ceroxyloideae	<i>Chamaedorea</i>	27
	<i>Gaussia</i>	2
	<i>Pseudophoenix</i>	1
	<i>Synecanthus</i>	1
Arecoideae	<i>Acrocomia</i>	1
	<i>Astrocaryum</i>	1
	<i>Attalea</i>	3
	<i>Bactris</i>	2
	<i>Desmoncus</i>	1
	<i>Geonoma</i>	3
	<i>Reihardtia</i>	2
	<i>Roystonea</i>	2
		74 (prob. 100)

* Nota: La Ilustración se encuentran en las página 114

Cuadro 4. Distribución de las 20 especies de palmeras nativas en la península de Yucatán.

ESPECIE	Vegetación que habita	Hábita
<i>Acoelorrhaphes wrightii</i>	Sabanas, humedales asociados a manglares	Suelos inundables, expuestos
<i>Acrocomia aculeata</i>	Sabanas y pastizales, selva mediana secundaria	Sitios planos de suelos profundos
<i>Attalea cohune</i>	Selvas altas primarias y secundarias	Suelos profundos, resiste fuego
<i>Attalea liebmanii</i>	Selvas medianas secundarias	Sitios planos, suelos arcillosos
<i>Bactris major</i>	Sabanas, humedales, vegetación riparia	Sitios expuestos, suelos arcillosos
<i>Bactris mexicana</i>	Selva alta y mediana subperennifolia	Sitios planos, umbríos
<i>Chamaedorea oblongata</i>	Selva alta y mediana perenne y subperennifolia	Sitios con pendiente, umbríos
<i>Chamaedorea seifrizii</i>	Selva mediana subcaducifolia	Sitios rocosos, planos, semiumbríos
<i>Coccothrinax readii</i>	Matorral dunas costeras, selva baja y mediana. costera	Expuesta o umbría, suelos arenosos
<i>Cryosophila stauracantha</i>	Selva alta y mediana, perennifolia y subperennifolia	Suelos someros en pendiente, umbrío
<i>Desmoncus orthacanthos</i>	Selva alta y mediana subperennifolia, primaria y secundaria	Suelos someros y profundos, expuesto
<i>Gaussia maya</i>	Selva alta perennifolia	Sitios calizos, rocosos con pendiente
<i>Pseudophoenix sargentii</i>	Selva baja subcaducifolia, matorral dunas costeras	Sitios expuestos, rocosos o arenosos
<i>Roystonea dunlapiana</i>	Selva mediana inundable, vegetación riparia	Sitios inundables, expuestos
<i>Roystonea regia</i>	Petenes, humedales, vegetación de cenotes	Sitios inundables, suelos c/ materia orgánica.
<i>Sabal gretheriae</i>	Selva mediana subperennifolia secundarias, potreros	Sitios perturbados, suelos someros
<i>Sabal mauritiformis</i>	Selva alta y mediana perennifolia y subperennifolia	Vegetación primaria y secundaria, suelo rocosos
<i>Sabal mexicana</i>	Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia	Sitios perturbados y quemados
<i>Sabal yapa</i>	Selva baja y mediana caducifolia y subcaducifolia	Sitios perturbados y quemados
<i>Thrinax radiata</i>	Matorral de dunas, selva mediana y baja subcaducifolia y subperennifolia	Sitios abiertos y cerrados, suelo somero

1. <i>Desmoncus orthacanthos</i>	H
2. <i>Thrinax radiata</i>	H
3. <i>Coccothrinax readii</i>	H
4. <i>Pseudophoenix sargentii</i>	H
5. <i>Sabal yapa</i>	H
6. <i>Cryosophila stauracantha</i>	U
7. <i>Chamaedorea oblongata</i>	U
8. <i>Bactris mexicana</i>	U
9. <i>Gaussia maya</i>	U
10. <i>Chamaedorea seifrizii</i>	U

Protocolos establecidos para el estudio del efecto del cambio climático en areáceas:

1. Conocer aspectos básicos de los grupos funcionales que presentan las diez especies seleccionadas para el estudio.

2. Tomar los elementos más básicos de éstos: heliófilos (H) y umbrófilos (U).

3. Elegir aquellas especies de portes más manejables para poder experimentar con éstas.

4. Confinarlas y crecerlas en cámaras con condiciones controladas de CO₂ (Concentración actual 360ppm y duplicada 750ppm) y temperatura máximas.

5. Tomar lecturas de asimilación de CO₂ y crecimiento, durante al menos un ciclo anual una vez aclimatadas.

6. Contar con testigos en vivero y en campo.

7. Realizar cosechas finales y analizar resultados a nivel macroscópico y microscópico.

Resultados de los experimentos.

Asimilación de CO₂.

No existen diferencias significativas entre la cámara de CO₂ Normal y la de CO₂ Duplicado (P= 0.000001), por lo que aumento en la concentración de CO₂, al parecer, no tuvo efectos significativos en la tasa fotosintética (asimilación de carbono) de los individuos que estuvieron sometidos a estas dos condiciones. Sin

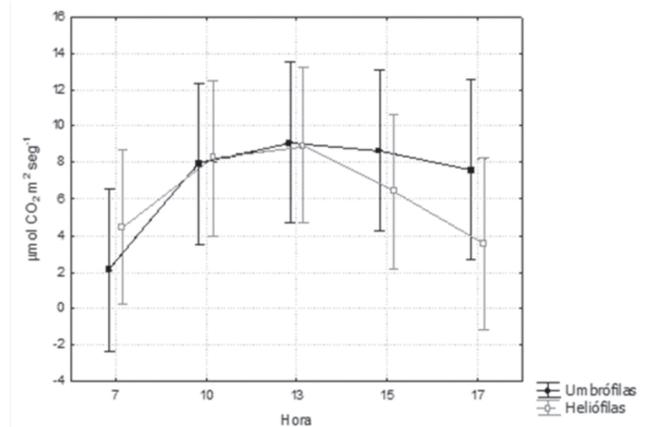


Figura 3. Valores de la fijación del carbono entre especies umbrófilas y heliófilas de palmas que se distribuyen en Yucatán.

embargo, las especies consideradas como umbrófilas presentan aparentemente mayor tasa fotosintética que las del grupo de heliófilas. Al compararlas como grupo, se encontraron diferencias significativas (P= 0.000002) (Figura 3).

Crecimiento.

La ganancia de biomasa no fue significativamente mayor en las plantas que crecieron bajo condiciones aumentadas de CO₂ (750ppm) con respecto a las que provenían de cámaras con atmósferas normales actuales (370ppm). Al realizar una prueba de X², no presentaron diferencias estadísticas significativas cuando se compararon las biomásas de la parte aérea (Cuadro 5) y la de la raíz (Cuadro 6), entre los individuos de la cámara con concentración de CO₂ normal y los de la cámara con el CO₂ duplicado. La única diferencia significativa se presentó en la biomasa aérea de la especie *Chamaedorea oblongata* (P= 0.04330814). Esto lleva a pensar que muy probablemente una duplicación en la concentración de CO₂ atmosférico no sería suficiente para modificar la generación de biomasa en estas especies de palmeras.

Análisis de pigmentos.

Las concentraciones de pigmentos (clorofila **a** y **b** y carotenoides), no presentaron cambios entre las palmeras que estuvieron confinadas en las cámaras con atmósfera duplicada de CO₂ y las que estuvieron en condiciones normales, sin embargo, cuando se comparan como grupo las heliófilas con las umbrófilas si se presentan diferencias. (Cuadro 7). Por lo tanto se presume, que un aumento al doble en la concentración del gas, no afecta significativamente los pigmentos fotosintéticos. Los datos, fueron analizados mediante una ANOVA.

Cuadro 5. Promedios Biomasa Aérea (peso seco g), de las cosechas inicial y final de las diez especies de palmas.

ESPECIE	COSECHA INICIAL	COSECHA FINAL (CO ₂ N)	COSECHA FINAL (2CO ₂ D)
<i>T. radiata</i>	39.32	159.22	180.725
<i>C. readii</i>	39.99	139.31	137.0275
<i>D.orthacanthos</i>	23.09	200.58	182.8075
<i>C.oblongata</i>	17.61	236.8766	197.2325
<i>B. mexicana</i>	13.47	167.5125	112.975
<i>C.stauracantha</i>	31.88	147.23	129.235
<i>S. mexicana</i>	4.98	411.65	515.9
<i>P. sargentii</i>	21.97	340.3	324
<i>G.maya</i>	8.003	307.9	320.4
<i>Ch. seifrizii</i>	9.33	300.1	271.9

Cuadro 6. Promedios Biomasa RAICES (peso seco g), de las cosechas inicial y final de las diez especies de palmas.

ESPECIE	COSECHA INICIAL	COSECHA FINAL (CO ₂ N)	COSECHA FINAL (2CO ₂ D)
<i>T. radiata</i>	70.3	288.975	319.275
<i>C. readii</i>	68.775	158.0825	216.0925
<i>D.orthacanthos</i>	18.475	237.8225	267.93
<i>C.oblongata</i>	13.6	101.19	91.64
<i>B. mexicana</i>	12.5	168.8875	168.7125
<i>C.stauracantha</i>	51.28	213.0475	231.4475
<i>S. mexicana</i>	18.14	281.7	325.9
<i>P. sargentii</i>	26.57	1009.8	569.8
<i>G.maya</i>	6.37	256.4	243.4
<i>Ch. seifrizii</i>	12.44	451.3	416.8

Cuadro 7. Resultados de los análisis estadísticos la concentración de pigmentos (clorofila a, b y carotenos), en las diez especies de palmeras.

Entre cámaras (CO ₂ /2CO ₂)	Clorofila a p= 0.252640	Clorofila b p= 0.244935	Carotenosp= 0.221086
Umbrófilas/ Heliófilas	clorofila a p= 0.01785	clorofila b p= 0.0158	CarotenosP= 0.0034
Entre especies	clorofila a p= 0.00030	clorofila b p= 0 .000018	Carotenosp= 0.000012

Definitivamente, será importante, ampliar los tratamientos de concentraciones elevadas de CO₂ para poder estimar la concentración que favorece el cierre estomático y por consiguiente el impacto sobre la fotosíntesis y otras tales como la Tasa de Crecimiento relativa y la velocidad de exposición de hojas, etc., ya que es muy posible que con mayores aumentos en la concentración de CO₂, ésta tenga efectos sobre las palmeras nativas de la región, que pueden manifestarse morfológica o fisiológicamente.

B) Posible distribución de especies en diferentes escenarios climáticos.

Se presentan dos escenarios proyectados al horizonte 2020 muy contrastados:

- 1) Bajo las condiciones del escenario CGCM2A21 la península sería más cálida y más húmeda respecto al escenario base.
- 2) Las condiciones de la península, con base al escenario HADCM3B21, serían más cálidas pero además mucho más secas, la zona árida se extendería a la mayor parte del territorio.

Los resultados de la modelación de la distribución potencial de cuatro especies de palmas muestran cambios diferentes en cada caso, pero en general las palmeras parecen presentar cambios moderados en las áreas de distribución (Ilustración 7)*, aunque es importante considerar que los modelos no están considerando las relaciones de suelos, la posible alteración de la fenología

propia de las palmeras, la posible alteración del ajuste con los agentes polinizadores, la posible alteración del ajuste con los agentes dispersores, la posible alteración del ajuste con los depredadores

Esto nos lleva a las siguientes reflexiones:

- Ante el inminente cambio climático se hace necesario emprender trabajos de investigación aplicada en torno a este hecho. Consecuentemente, existe la necesidad de conocer la sensibilidad de los distintos sistemas naturales y la vulnerabilidad de los sistemas humanos.
- Se pretende que la información que se genere de las investigaciones, contribuya a fortalecer las medidas de adaptación y mitigación ante la serie de cambios que están ocurriendo.
- La evaluación de los posibles impactos y vulnerabilidad por zonas, estará dada a partir de la definición de áreas que presenten fuertes cambios en el clima.

Además, las alteraciones antropogénicas sobre el paisaje, en el que podría haber nuevas colonizaciones, son un elemento limitativo que viene también a ser sinérgico. Finalmente se puede concluir que las fluctuaciones y las tendencias de los elementos del clima son factores que se deben agregar de forma sinérgica a las alteraciones ambientales ocasionadas por las actividades humanas, lo cual para las especies silvestres representan elemento limitantes.

* Nota: Las Ilustración se encuentran en las páginas 115

Literatura citada

García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). UNAM-Instituto de Geografía. México, DF. 246 pp.

Orellana, R., C. Espadas-Manrique; C. Conde & C. Gay. 2010. *Atlas de escenarios de cambio climático en la península de Yucatán*. CICY. ISBN: 9786077823018. 111pp.

Stern, N. 2007. *El Informe Stern. La verdad del cambio climático*. Ed. Paidós Ibérica S.A. 389 pp.

Capítulo IX

Efecto del cambio climático en la distribución de especies del Desierto Chihuahuense del pleistoceno al siglo XXI

Claudia Ballesteros-Barrera

Resumen

A lo largo de la historia de la Tierra se han presentado cambios significativos en el clima, sin embargo el calentamiento global que se ha registrado a partir del siglo XX se está suscitando de manera acelerada, modificando rápidamente el hábitat de las especies. Se han postulado dos posibles respuestas de las especies ante eventos de cambio climático: la adaptación a nuevas condiciones o que modifiquen sus áreas de distribución. Durante el último ciclo glacial/interglacial, *Larrea tridentata*, especie que habita actualmente en todo el Desierto Chihuahuense presentó contracciones o expansiones en su área de distribución. Trabajos recientes han concluido que esta zona de México será una región particularmente vulnerable en términos de biodiversidad debido al calentamiento global. En este trabajo se analizó si las poblaciones de *Larrea tridentata*, planta que se distribuyen en el Desierto Chihuahuense mantiene sus nichos constantes y si responden mediante cambios en su distribución geográfica concomitantes con los movimientos de su nicho a los cambios del clima durante tres ventanas de tiempo: 1) último ciclo glacial/interglacial, 2) en el presente y 3) futuro (para los años 2020 y 2050). Se utilizó el método del Modelado de Nicho Ecológico en los diferentes tiempos estudiados. Los resultados muestran que durante la última glaciación, algunas poblaciones se refugiaron en sitios donde existían condiciones ambientales que estaban dentro de su nicho climático. Para el calentamiento global actual y para el año 2050 las proyecciones muestran que no habrá un cambio drástico en su distribución, aunque podrían aparecer sitios para colonización. Este trabajo apoya la hipótesis del conservadurismo del nicho que implica que los nichos permaneces constante durante escalas de tiempo evolutivo y son una limitante para el cambio en la distribución de las especies.

Abstract

Climate changes have occurred throughout the Earth's history, however global warming detected since the XX century is raising in a quick way, altered biotic environment very fast. In the face of environmental change, species may respond by: adaptation to new conditions outside their present niches or changing their distributions tracking

their niches spatially. During the last glacial/interglacial cycle *Larrea tridentata*, specie that inhabited the current Chihuahuan Desert experienced contractions or expansions in their geographical range. Also recent survey of projected climate change effects in Mexico concluded that the spatial foci of the most serious effects of global warming on biodiversity are focused in the Chihuahuan Desert. In this paper we analyzed if population of *Larrea tridentata* have tracked consistent climate profiles throughout three drastic climate change events: 1) in the past (across the last glacial/interglacial transition), 2) present and 3) future (years 2020 and 2050). We use ecological niche modeling to predict geographical distributions across these periods. The results show that during the last glaciations, some populations took refuge in sites where environmental conditions were inside their climatic niche. For current global warming and for the future, year 2050, is projected that there will be no drastic change in their distribution, although it could appear sites for new colonization This study provides support for conservative assumptions that the ecological niches tend to remain relatively constant over evolutionary timescales and across space and represent long-term stable constraints on the distributional potential of species.

Palabras Claves: Cambio climático, calentamiento global, distribución de especies, modelado de nicho ecológico, Pleistoceno, Holoceno, glaciación, *Larrea tridentata*, Desierto Chihuahuense.

Keywords: Climate change, global warming, species distribution, Ecological niche modeling, Pleistocene, Holocene, glaciations, *Larrea tridentata*, Chihuahuan Desert.

El cambio climático

Cada día es más frecuente escuchar noticias acerca de las altas temperaturas alcanzadas en algunos sitios sobre la Tierra, ondas frías intensas, tormentas más fuertes o sequías más pronunciadas. Aunque las frases cambio climático y calentamiento global empiezan a formar parte del vocabulario no sólo de los científicos, sino de políticos, periodistas, educadores y del público en

general, éstas siguen siendo confusas. El término cambio climático suele usarse de forma poco apropiada como sinónimo de calentamiento global, para hacer referencia tan sólo a los cambios que se están presentando en el clima actual.

Las fluctuaciones climáticas no son eventos recientes, sino que se han presentado desde el origen mismo de la Tierra. Así, el cambio climático debe entenderse como un corrimiento o variación estadística significativa en el "estado del tiempo promedio" que persiste durante un largo periodo de tiempo (IPCC, 2002). Estas oscilaciones climáticas son el resultado de la interacción entre los componentes del sistema terrestre (hidrósfera, biósfera y litósfera), así como consecuencia de los procesos exógenos (vulcanismo), endógenos (tectónica de placas), de las variaciones en los parámetros orbitales de la Tierra y de la actividad solar (Drake, 2000). El calentamiento global, por otro lado, se refiere a un incremento en el valor medio de la temperatura de la atmósfera cerca de la superficie terrestre y en la tropósfera, lo que puede contribuir a cambios en los patrones climáticos globales. El informe del IPCC (2007) afirma que la mayoría del incremento en la temperatura media observado globalmente desde mediados del siglo XX es, "muy probablemente", debido al incremento observado en las concentraciones de gases de invernadero tales como el dióxido de carbono, metano, óxidos nitrosos y clorofluorocarbonos derivados de actividades humanas que están atrapando una porción creciente de radiación infrarroja terrestre. Los experimentos con modelos muestran que, incluso si se mantienen constantes todos los agentes de forzamiento en los niveles del año 2000, se esperaría una tendencia al calentamiento en las próximas dos décadas a un ritmo de unos 0.1°C por decenio, debido principalmente a la lenta respuesta de los océanos (IPCC, 2007).

La preocupación actual acerca de estos temas es que según algunos autores, la vida en la Tierra está pasando por el sexto evento de extinción masiva de su historia (Chapin *et al.*, 1988; Primack & Ros, 2002). Si bien en el pasado, dichos acontecimientos se debieron a cambios ambientales provocados por fenómenos naturales, como la deriva continental o el choque de meteoritos con la superficie terrestre, las actividades humanas del presente como la fragmentación y transformación de los hábitats naturales, la introducción de especies y la emisión excesiva de gases a la atmósfera están llevando a los ecosistemas a un ritmo de deterioro demasiado acelerado (Leakey & Lewin, 1998). En conjunto, a dichos eventos se les conoce como cambio global, y de éstos, el calentamiento global es quizá el que presupone un mayor riesgo

para las especies, ya que tiene el potencial de influir en cualquier sitio del planeta, incluyendo aquellos que están lejos de los centros de actividad humana. Esto es, los cambios que en condiciones naturales pueden tomar miles de años en producirse ahora se están suscitando en pocas décadas y podrían poner en grave riesgo la supervivencia de miles de especies (Zaccagnini, 2002).

Cambio climático y la distribución de las especies

Si bien las dimensiones físicas del cambio climático están siendo analizadas en detalle y se cuenta con herramientas que permiten modelar escenarios de cambio de clima al futuro o al pasado, apenas se empieza a conocer el impacto que estos fenómenos han tenido y tendrán sobre la biodiversidad del planeta. Un tema fundamental en diversas disciplinas tales como biogeografía, evolución, ecología y conservación es determinar el efecto del clima en la existencia y persistencia de las especies y sus poblaciones, ya que se considera que actúa directa o indirectamente como un factor de selección natural y moldea en gran medida sus distribuciones geográficas (Mac Arthur, 1972). Tanto la temperatura como la humedad atmosférica pueden tener relación con la distribución espacial, las dinámicas poblacionales e interacciones entre las especies, por tanto es de esperar que cambios importantes en los patrones climáticos de la Tierra -como los que estamos viviendo en la actualidad- tengan un efecto en las biodiversidad (Hulme, 2005).

Se han postulado tres posibles patrones de respuesta de las especies ante el cambio climático global en relación a su distribución geográfica: 1) que cambien su distribución y/o abundancia conforme a los regímenes ambientales a los que han estado adaptadas, 2) que se adapten a las nuevas condiciones, y por ende, no observen cambios importantes en su distribución, o bien, 3) si las especies no pueden moverse o adaptarse, su distribución geográfica tenderá a reducirse a los sitios que se mantengan propicios; en casos extremos de esta última situación, las especies pueden llegar a la extinción (Holt, 1990). Sin embargo, si suponemos que una de las características del nicho ecológico es que tiende a ser estable en tiempo evolutivo (i. e., "conservadurismo del nicho"), es decir, que las especies cambian sus requerimientos bióticos y abióticos pero de manera muy lenta, esperaríamos entonces que la respuesta de las especies frente al actual cambio climático fuera la del movimiento espacial de sus poblaciones, reflejándose en desplazamientos de sus distribuciones geográficas en concordancia con los movimientos de sus nichos ecológicos (Peterson *et al.*, 1999).

Para estimar los cambios en la distribución de las especies debidos al cambio en el clima se han usado diferentes aproximaciones. Por medio de estudios paleoecológicos se han realizado reconstrucciones con los registros fósiles, sin embargo, en términos generales, los sitios estudiados y los depósitos fosilíferos son muy escasos, dejando muchos huecos en el conocimiento de la distribución (Davis, 1990). En el caso de las distribuciones actuales, se han realizado estudios de monitoreo a largo plazo que registran los efectos que el calentamiento global ha tenido sobre la distribución de algunas especies (Hansen *et al.* 2001; Parmesan, 1996; Parmesan *et al.*, 1999). Sin embargo, los estudios que demuestran cambios distribucionales, requieren contar con registros detallados de los movimientos de las especies por periodos de tiempo prolongados, además no permiten hacer predicciones acerca de la dirección y magnitud de los movimientos geográficos en la distribución de las especies. Otra forma en que se han analizado las distribuciones pasadas ha sido aplicando modelos espaciales a fin de obtener los factores climáticos limitantes en la distribución de las especies en el presente. Estos resultados se interpolan a los factores de la época que se desea reconstruir y se determinan áreas de posible presencia (Arundel, 2002).

En los últimos 20 años, la revolución tecnológica ha traído consigo un importante avance de la informática y su aplicación tanto en las ciencias de la Tierra como en las ciencias biológicas. Esto ha permitido la generación de información y de técnicas de análisis novedosas que están impulsando una forma de investigación científica predictiva que vale la pena analizar.

Modelado del nicho ecológico y la distribución de especies frente al cambio climático

Recientemente se han utilizado nuevas metodologías que han permitido modelar los requerimientos climáticos de las especies (Austin *et al.*, 1990; Carrol *et al.*, 1999; Nix, 1986; Stockwell & Peters, 1999). Este nuevo campo, conocido como modelado de nichos ecológicos (MNE) o del espacio climático de las especies, se fundamenta en los principios de la teoría del nicho ecológico, propuesta desde principios del siglo XX (Grinnell, 1917). El nicho ecológico se puede entender como las condiciones ambientales bajo las cuales las poblaciones de las especies pueden prosperar indefinidamente sin la necesidad de inmigración de individuos de otras poblaciones (Grinnell, 1917; Hutchinson, 1957). Este concepto se refiere a los límites de tolerancia de las especies tanto a las condiciones climáticas como a las de sus especies interactuantes (densidad de competidores,

presas, etc.). Por lo tanto, el nicho de una especie determina su distribución y su abundancia a lo largo de la misma.

Un principio de la teoría del nicho es que generalmente las especies tienden a mantener sus nichos constantes por largo tiempo, incluso millones de años (i. e., “conservadurismo del nicho”); es decir, que las especies cambian sus requerimientos bióticos y abióticos pero de manera muy lenta; entonces, ante alteraciones climáticas de gran magnitud, las especies generalmente “siguen” en el espacio las condiciones ambientales a las que están adaptadas (Peterson *et al.*, 1999).

Para modelar los nichos ecológicos se requiere contar con localidades individuales y registros puntuales de las especies (longitud/latitud) así como variables ambientales (climáticas, topográficas) de dichas localidades. Existe una variedad amplia de algoritmos, que se diferencian entre sí en los métodos que usan para producir los modelos: los hay estadísticos (regresiones múltiples o análisis de conglomerados) y heurísticos (árboles de decisión, algoritmos genéticos, redes neuronales y otros). En esencia, todos estos métodos buscan determinar las asociaciones significativas entre los puntos de localidades de presencia (y a veces de ausencia) de las especies y datos ambientales que caracterizan las condiciones ambientales bajo las cuales es factible que la especie persista (i.e. su nicho ecológico); posteriormente, estas condiciones son proyectadas en un espacio geográfico para producir un mapa de distribución potencial el cual puede ser visualizado el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Pearson & Dawson, 2003; Soberón & Peterson, 2005). La posibilidad de obtener una aproximación confiable de la distribución de las especies por estos métodos, debido a su poder de predicción, ha permitido su utilización en diversas áreas de la biología, tales como en la biogeografía, la búsqueda de patrones de distribución de las especies y de comunidades (Ferrier & Guisan, 2006; Fera & Peterson, 2002; Peterson, 2001); en la biología de la conservación, para definir estrategias y planes de manejo (Sánchez-Cordero *et al.*, 2005), entre muchos otros ejemplos de sus usos. Una de las aplicaciones más recientes del MNE es la creación de escenarios predictivos de distribuciones potenciales en distintos periodos de tiempo (proyecciones hacia el pasado o futuro) como respuesta al cambio climático global (e.g., Aráujo *et al.*, 2006; Martínez-Meyer, 2005; Peterson *et al.*, 2002). Al proporcionar un pronóstico de la reducción o la expansión de las áreas adecuadas para la especie, estos escenarios del impacto del cambio del clima pueden ayudar a identificar las tendencias que se pueden esperar.

No obstante los avances que representan tales trabajos, estos también presentan algunos inconvenientes. Por ejemplo, las predicciones a futuro no comprueban que los cambios en la distribución se estén dando. Tales modelos dan resultados estáticos que revelan dónde existirán sitios con las condiciones ambientales convenientes para las especies en un futuro climáticamente cambiante, pero no consideran explícitamente todos los procesos que conducen a los cambios predichos. Los mapas resultantes son la expresión geográfica del nicho ambiental y no toman en cuenta restricciones históricas, barreras geográficas o interacciones bióticas (Soberón & Peterson, 2005). Asimismo, estas predicciones están sujetas a elevados niveles de incertidumbre (Guisan & Thuiller, 2005). Estudios recientes han demostrado que las proyecciones derivadas de estos modelos son sensibles a los supuestos sobre los que se basan, al tipo, cantidad, y resolución espacial de las variables ambientales, escenarios de cambio climático futuro seleccionados y la clase de algoritmo seleccionado (Araújo *et al.*, 2005; Martínez-Meyer, 2005; Hijmans & Graham, 2006). Además, el supuesto fundamental del conservadurismo del nicho requiere de más evidencia empírica para conocer que tan generalizado es en la naturaleza, ya que existe también evidencia de la adaptación de las especies a condiciones ecológicas nuevas, sobre todo aquellas que implican aumentos en tolerancias fisiológicas a distintos factores (Réale *et al.*, 2003; Jump & Peñuelas, 2005).

El Desierto Chihuahuense

Aunque a primera vista pareciera que los desiertos son regiones desoladas, simples y con una baja diversidad de formas de vida, en realidad son de los biomas más interesantes y complejos del planeta. Sus extraños paisajes, clima extremoso, especies con adaptaciones peculiares, son el resultado de su intrincada historia geológica. Los desiertos de Norteamérica han sido motivo de diversas investigaciones para explicar su establecimiento y evolución, debido, entre otros factores, a un alto grado de endemismo y a las adaptaciones características de su flora y fauna que les permiten sobrevivir a las condiciones ambientales extremas. Unos de los eventos importantes a considerar en el origen y distribución de las especies en tales desiertos son, sin lugar a dudas, los cambios climáticos que se presentaron durante la época del Pleistoceno (2 millones a 10 mil años Antes del Presente [A.P.]). En este periodo sucedieron al menos 20 ciclos glaciales/interglaciares, lo que llevó a cambios drásticos no sólo en el ambiente sino en la

composición de las comunidades bióticas que lo conformaban (Pielou, 1991; Tarbuck & Lutgens, 2001).

Asimismo, Peterson *et al.* (2002) utilizaron MNE para predecir cambios esperados para el año 2050 en la distribución de 416 especies de mamíferos, 176 especies de mariposas y 1,179 especies de aves que habitan en nuestro país. En este estudio se llegó a la conclusión de que en el norte de México se concentrará el mayor número de extinciones y colonizaciones locales (recambio de especies), principalmente hacia la planicie costera noroeste y el Desierto Chihuahuense.

El Desierto Chihuahuense es una de las tres ecoregiones desérticas más ricas y diversas del mundo, junto con el desierto de Tanmi en Australia y el de Namib-Karoo en África. Aproximadamente 3,500 especies de plantas viven en este desierto, y algunas estimaciones indican que existen cerca de 1,000 especies (29%) y al menos 16 géneros endémicos (Toledo, 1988; WWF, 2007), así como un gran número de animales propios de la región. Debido a este inusual número de taxones endémicos es urgente evaluar los efectos que el cambio climático está teniendo sobre esta región, así como el futuro que les depara.

Este desierto tiene una extensión de aproximadamente 70 millones de hectáreas que ocupan gran parte de los estados mexicanos de Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas, porciones de San Luis Potosí, Nuevo León, Tamaulipas, Sonora y áreas significativas de Texas, Arizona y Nuevo México, en los Estados Unidos (Ilustración 8)*. El área se caracteriza por las cuencas desérticas y cordilleras del Altiplano Mexicano, rodeada por los cerros de la Sierra Madre Oriental y Occidental. Aunque más húmedo que algunas partes desérticas de Estados Unidos, el desierto Chihuahuense experimenta veranos calientes, inviernos fríos y secos y lluvia intermitente, principalmente de origen monzónico. La vegetación de la ecorregión es típicamente matorral y pastizal desértico, con áreas de bosques en las laderas de las montañas, bandas estrechas de vegetación riparia y matorrales a lo largo de los ríos y arroyos. Con la notable excepción del Río Grande o Río Bravo, la mayoría de los sistemas hidrológicos son cuencas cerradas y muchos son arroyos aislados (Hernández-Macías, 2006).

Por una parte el comprender cómo han cambiado las distribuciones de las especies bajo cambios climáticos del pasado, en este caso los ciclos glacial/interglacial, puede permitir analizar los efectos que el calentamiento global actual tendrá sobre la biodiversidad y revelar

* Nota: La Ilustración se encuentran en la página 116

patrones y procesos no detectados en estudios que comprenden sólo unas pocas décadas (Lyford *et al.*, 2003). Asimismo, las relaciones entre la distribución pasada y actual de una especie y los parámetros climáticos pueden proporcionar la base para estimar cómo los cambios climáticos futuros pueden influenciar las distribuciones de las especies (Thompson & Anderson, 2000).

En este trabajo se analizó si las poblaciones de una especie representativa del Desierto Chihuahuense mantienen sus nichos constantes y responde mediante cambios en su distribución geográfica concomitantes con los movimientos de su nicho a los cambios del clima durante dentro de tres ventanas de tiempo: 1) en el pasado, durante el último ciclo glacial/interglacial, 2) en la actualidad (siglo XX y principios del XXI) y en el futuro (año 2050).

Estudio de caso: El efecto del cambio climático en la distribución de *Larrea tridentata*

Una de las especies vegetales que hoy día habita en todos los desiertos de Norteamérica y que es considerada como representativa de las zonas áridas es *Larrea tridentata* (Zygophyllaceae), comúnmente conocida como “la gobernadora”. Esta planta posee un área geográfica relativamente bien definida, exhibe un fenotipo característico (figura 1), ha sido estudiada en diversos aspectos, como su taxonomía, fisiología, fitoquímica (Mabry *et al.*, 1977), es ampliamente usada y recolectada comercialmente en México, utilizándose como alimento para humanos y forraje de animales (Shreve & Wiggins, 1964; Vázquez-Yañes *et al.*, 1999). Se le considera como generadora de islas de fertilidad (McAulliffe 1984, Valiente-Banuet & Ezcurra, 1991) y como una planta que ayuda a mantener la biodiversidad en las zonas áridas de Norteamérica, ya que su papel de “nodriza” hace que muchas especies encuentran protección contra las condiciones ambientales adversas, por lo que el establecimiento y supervivencia de semillas y plántulas de diversas especies pueden mantenerse estables bajo su cubierta (Callaway 1995; Valiente-Banuet & Ezcurra, 1991).

Sin embargo, no sólo su llegada y la diferenciación en los desiertos de Norteamérica, sino su distribución durante la última glaciación son temas de debate. Algunos investigadores afirman que su evolución debió ser relativamente rápida, pues ciertos estudios indican que *Larrea* no estuvo presente en el Desierto Chihuahuense sino hasta hace apenas 9 mil años (Axelrod, 1979; Morafka *et al.*, 1992; Wells & Hunziker,

1976). Otros investigadores proponen que durante las glaciaciones del Pleistoceno se refugió en ciertos lugares entre los ríos Étorax y Tula, en Querétaro e Hidalgo (Rzedowski, 1991), respectivamente. Sin embargo, en algunas partes de los desiertos de Norteamérica se han descubierto restos datados en más de 20 mil años, lo que ha permitido sugerir que durante el Pleistoceno la gobernadora quedó limitada a unos cuantos refugios situados en tierras bajas, desde donde se habrían expandido para alcanzar su distribución actual una vez que la aridez aumentó hacia finales de la última glaciación (Cole, 1986).

Métodos Modelos de Nicho Ecológico

Se generó una base de datos de localidades de presencia para *L. tridentata* para el Pleistoceno Tardío de 26 mil a 10 mil años Antes del Presente (A. P.) y para el Holoceno Medio entre 8 mil y 4 mil años A.P a partir de registros recopilados de las siguientes bases de datos: USGS/NOAA North American Packrat Midden Database version 3; The Fossil Packrat Midden Database y The Paleontology Database Network, así como de la literatura. Asimismo se realizó una búsqueda de localidades de presencia actual de la especie en distintas bases de datos de colecciones y herbarios en línea: Red Mundial de Información sobre la Biodiversidad (REMIB) de la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO); Global Biodiversity Information Facility (GBIF); Plant Resources Center; The University of Texas at Austin, así como de información proveniente de la literatura.

Los modelos de nicho se generaron usando distintos tipos de superficies ambientales: datos topográficos que incluyeron: pendiente, aspecto e índice topográfico se obtuvieron de la base de datos Hydro 1k del Geological Survey de los Estados Unidos (Gesch & Larson, 1996). Los datos climáticos incluyeron temperatura media anual y la precipitación media anual. Las coberturas para el Pleistoceno (21 mil años A.P.) y Holoceno Medio (6 mil años A.P) se obtuvieron del *Hadley Climate Change Centre* mediante el *Paleoclimate Modelling Intercomparison Project* (Kim *et al.*, 2002), mientras que las coberturas climáticas actuales (1961–90; New *et al.*, 1999) se encuentran disponibles en la página del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC). Los escenarios de cambio de clima se extrajeron del IPCC SRES, que corresponde al modelo de circulación general conservador B2-CGCM2, producido por Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Flato *et al.*, 2000). Todas las coberturas fueron remuestreadas a una resolución de 1 km².



Figura 1.- La gobernadora, *Larrea tridentata*, arbusto ramificado y perennifolio, representativo de los desiertos de Norteamérica.

Los modelos se generaron con el algoritmo genético GARP por sus siglas en inglés (*Genetic Algorithm for Rule-set Prediction*) (Stockwell & Noble, 1992; Stockwell & Peters, 1999). GARP es un algoritmo genético que produce de manera iterativa una serie de reglas que definen las condiciones ecológicas en las cuales se encuentra la especie, las evalúa e incorpora o rechaza. Los detalles matemáticos del método se han descrito en Stockwell y Noble (1991) y Stockwell y Peters (1999).

Se produjeron los modelos de la distribución para el Pleistoceno y el Holoceno medio utilizando localidades de los registros fósiles (de cada periodo de tiempo 21 mil años A. P. y 6 mil años A. P. respectivamente) y utilizando las coberturas climáticas de esos periodos de tiempo. Para el modelo al presente se generó un modelo del nicho ecológico utilizando las localidades en donde ha sido recolectada en el presente y las variables topográficas y de condiciones climáticas actuales. De la misma manera, para evaluar el cambio en la distribución geográfica en el siglo XX y principios del XXI se generaron los modelos del nicho ecológico utilizando las coberturas ambientales del periodo 1961-1990. Una vez construidos estos modelos de nicho se proyectaron a los escenarios climáticos de 1901-1930; 1931-1960 y 2000-2010. Y

finalmente para la estimación al futuro se proyectó el modelo del presente a un escenario climático para los años 2045-2050.

Resultados y discusión

Respecto a la historia biogeográfica de la gobernadora, los resultados de los MNE permiten generar una hipótesis acerca de los cambios en su distribución geográfica debidos al cambio climático del último ciclo glacial/interglacial. Durante el Último Máximo Glacial (UMG) en el Pleistoceno Tardío, las condiciones climáticas y de composición de especies en los sitios donde hoy se encuentran los desiertos de Norteamérica fueron completamente distintas a las actuales. Con el aumento en la precipitación de invierno y la disminución en la temperatura se presentó en estas zonas una expansión de muchas especies típicas de bosques (Peñalba & Van Devender 1997; Van Devender, 1990 a y b; Van Devender & Burgess 1985). Pero al parecer existieron sitios en los cuales se mantuvieron condiciones ambientales propicias para especies de afinidades xéricas como la gobernadora, en los estados de California, Arizona, sur de Nuevo México y Texas, así como Baja California, Sonora, Chihuahua y posiblemente Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas (Ilustración 9)*. Con la subsecuente

* Nota: Las Ilustración se encuentran en las páginas 117

deglaciación, el aumento en la temperatura y los cambios en los patrones de lluvia, las especies de bosques quedaron confinadas en sitios reducidos, con poblaciones pequeñas y aisladas (Webb, 1992). Por el contrario muchas especies adaptadas a condiciones áridas comenzaron a expandir sus áreas, así pasaron de ser elementos raros en las comunidades a abundantes (Betancourt *et al.* 1990).

El cálculo de las áreas de distribución de *L. tridentata* para cada periodo de tiempo permite estimar, las tasas de colonización hacia nuevas áreas. Conforme el clima fue cambiando, hubo nuevos lugares con las condiciones adecuadas para que se estableciera la especie, tomado en cuenta que entre el UMG y el Holoceno Medio hubo un lapso de 15 mil años y que la gobernadora en ese tiempo duplicó su área de distribución (Ilustración 8)*. Esto nos puede dar una idea de que conforme aparecieron nuevos sitios con las condiciones de su nicho, se estableció de manera más rápida en comparación a la velocidad en que lo hizo durante el Holoceno Medio al presente en que las condiciones para esa época ya eran cercanas a las actuales y al parecer ya se había establecido en los sitios disponibles. Es importante aclarar que los mapas resultantes del modelado del nicho deben interpretarse como distribuciones potenciales, por lo que existe un nivel de incertidumbre en estos cálculos, pero al menos nos permite tener una idea de la magnitud de las tasas de colonización.

Para el siglo XX, los modelos también permitieron determinar posibles tasas de transformación del nicho en los sitios donde habitan a lo largo del tiempo. Los resultados obtenidos muestran que si bien desde 1901 se puede apreciar una cierta disminución en el nicho óptimo, es a partir del periodo de 1961-1990 donde se presentan los cambios de clima más drásticos que conllevan a un decremento en áreas adecuadas para la especie. Para el periodo 2000-2010 y aún usando un escenario de cambio de clima conservador, las tendencias son más marcadas, la pérdida de área para *Larrea* puede llegar a ser del 10% de su tamaño original. Sin embargo, no sólo se pierden sitios con condiciones adecuadas, sino que también se generan nuevas zonas que se vuelven adecuadas al menos en términos ambientales para su establecimiento.

Es importante considerar que la colonización involucra varios procesos: la tasa de dispersión, hábitat disponible, el establecimiento y la reproducción exitosa (Pitelka, 1997). En este sentido, *L. tridentata* ha mostrado durante

la transición del Pleistoceno-Holoceno Medio su gran capacidad de colonización. Su capacidad de dispersión de “larga” distancia y persistencia en los lugares, se debe a diversos rasgos de su biología e historia de vida: tiene reproducción sexual y clonal, produce múltiples fases reproductivas durante una misma estación de crecimiento (Vasek, 1980), se autopoliniza y también es polinizada por distintas especies de insectos (Minckley *et al.*, 2000), florece durante todo el año y posee frutos consumidos por agentes de dispersión de larga distancia, tiene un alto porcentaje de germinación, es prolífica y territorialista, allopata y con compuestos que inhiben la herbivoría (Hunziker *et al.*, 1977).

Posee una amplia tolerancia a los factores ambientales, lo que al parecer ha permitido que dadas las tendencias del cambio en el clima actual, se hayan creado zonas adecuadas que le permitan establecerse. Mediante trabajo de campo dirigido hacia los sitios predichos por el modelo como sitios de colonización, se pudieron encontrar poblaciones de la planta por lo que podría pensarse que son producto de procesos de colonización (Ilustración 9)*

En cuanto a la proyección realizada para las condiciones climáticas del año 2050, el impacto que tendrá el calentamiento global sobre la distribución potencial de la especie varía dependiendo si se asume una dispersión universal de la especie en cuyo caso se ganará un 8% de su área, con sitios potenciales para su colonización. Mientras que si se asume una dispersión restringida, es decir que la especie no tiene la capacidad de dispersarse a sitios que cambien hacia las condiciones de su nicho entonces podría haber potencialmente de una pérdida del 25% del área (Ilustración 10)*.

Conclusiones

La aplicación de lo aquí generado puede ser de gran utilidad para visualizar escenarios de problemas globales en poco tiempo, de manera que se puedan desarrollar mejores estrategias de conservación y empezar a comprender de una manera más amplia los procesos ecológicos que conllevan el cambio climático, que están experimentando las especies biológicas. Por lo que se considera que los MNE, a pesar de los inconvenientes antes mencionados, son una herramienta eficaz que permite : 1) inferir tanto las posibles paleo-distribuciones de diversas especies con un número limitado de variables bioclimáticas y bajo número de localidades fósiles, 2) las proyecciones generadas proporcionan una

* Nota: Las Ilustración se encuentran en las páginas 117

aproximación acerca de cuánto y cómo se puede modificar el área de distribución potencial de la especie por el efecto de los cambios climáticos, 3) realizar hipótesis biogeográficas, 4) mostrar sitios de posible cambio en el nicho de las especies y así indicar sitios para realizar monitoreos de las poblaciones, lo cual ofrece una alternativa rápida y eficiente para conocer el estatus de las poblaciones y 5) Realizar proyecciones al futuro próximo y evaluar cómo el calentamiento global podría actuar como una de las causas principales en el recambio de especies en muchos sitios.

Sin embargo, otra amenaza a considerar es la pérdida del hábitat, que actualmente afecta a muchas especies y se proyecta que este incremento continuará con el crecimiento de las poblaciones. Si bien, como ya se vio una especie puede persistir en ciertas localidades menos afectadas por el cambio de clima, su supervivencia a largo plazo puede estar comprometida seriamente por el creciente deterioro del hábitat. México presenta uno de índices más altos de deforestación en Latinoamérica lo que puede llevar a la pérdida de la mayor parte de la

vegetación natural en pocas décadas (FAO, 2001), con lo cual se aumenta el riesgo de extinción ya que pueden llevar a una disminución de la variabilidad genética, reduciendo la capacidad de los individuos para responder a los cambios ambientales o evitar la dispersión de los organismos.

Agradecimientos:

Al Dr. Enrique Martínez Meyer y al M. en C. Constantino González Salazar, al Instituto de Biología, UNAM, al Posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM, por el apoyo recibido para este trabajo, así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología –CONACYT– y a la Dirección de Estudios de Posgrado –DGEP UNAM– por las becas recibidas para el desarrollo de mi tesis Doctoral: Ballesteros-Barrera, C. 2008. Efecto del cambio climático global en la distribución de especies del Desierto Chihuahuense. Tesis de Doctorado. Posgrado en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.

Literatura citada:

- Araújo, M. B., Pearson, R. G., Thuiller, W. & M. Erhard. 2005.** Validation of species-climate impact models under climate change. *Global Change Biology* 11: 1504-1513.
- Araújo, M. B., Thuiller, W. & R. G. Pearson. 2006.** Climate warming and the decline of amphibians and reptiles in Europe. *Journal of Biogeography* 33: 1712-1728.
- Arundel, S. T. 2002.** Modelling climate limits of plants found in Sonoran Desert packrat middens. *Quaternary Research* 58: 112-121.
- Austin, M. P., Nicholls, A. O. & C. R. Margules. 1990.** Measurement of the realized qualitative niche: Environmental niches of five Eucalyptus species. *Ecological Monographs* 60: 161-177.
- Axelrod, D.I. 1979.** Age and Origin of the Sonoran Desert Vegetation. *Occasional Papers of California Academy of Science* 132:1-74
- Betancourt, J. L. 1990.** Late Quaternary biogeography of the Colorado Plateau. Pp. 259-292. En Betancourt, J. L., Van Devender T. R. & P. S. Martin (eds.). *Packrat middens: the last 40,000 years of biotic change*. University of Arizona Press, Tucson.
- Callaway, R. M. 1995.** Positive interactions among plants. *Botanical Review*. 61:306-349
- Carroll, C., Zielinski, W. J. & R. F. Noss. 1999.** Using presence-absence data to build and test spatial habitat models for the fisher in the Klamath Region, U.S.A. *Conservation Biology*. 13: 1344-1359.
- Chapin III, F. S., Sala, O. E., Burke, I. C., Grime, J. P., Hooper, D. U., Lauenroth, W. K., Lombard, A., Mooney, H. A., Mosier, A. R., Naeem, S., Pacala, S. W., William, J. R., Steffen L. & D. Tilman. 1988.** Ecosystem consequences of changing biodiversity. *BioScience* 48: 45-52
- Cole, K.L. 1986.** The Lower Colorado Valley: A Pleistocene desert. *Quaternary Research* 25. 392-400.
- Davis, O. K. 1990.** Caves as sources of biotic remains in arid western North America. *Palaeogeography, Palaeoclimatology & Palaeoecology* 76: 331-348.
- Drake, F. 2000.** *Global Warming*. Arnold Publishers, Oxford University Press, New York.
- FAO (Food and agricultural organization). 2001.** *Global forest resources assessment*. <http://www.fao.org/forestry/fo/fra/index.jsp>
- Feria, T. P. & A. T. Peterson. 2002.** Prediction of bird community composition based on point-occurrence data and inferential algorithms: a valuable tool in biodiversity assessments. *Diversity and Distribution* 8:49-56.
- Ferrier, S. & A. Guisan. 2006.** Spatial modeling of biodiversity at the community level. *Journal of Applied Ecology* 43: 393-404.
- Flato, G.M., Boer, G. J., Lee, W.G., McFarlane, N.A., Ramsden, D., Reader, M. C. & A. J. Weaver, 2000.** The Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis Global Coupled Model and its Climate. *Climate Dynamics* 16:451-467.
- Gesch, D.B. & K. S. Larson, 1996.** Techniques for development of global 1-kilometer digital elevation models. Pp 20-22. En: *Pecora Thirteen, Human Interactions with the Environment - Perspectives from Space*, Sioux Falls, South Dakota.
- Guisan, A. & W. Thuiller. 2005.** Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters* 8: 993-1009.
- Grinnell, J. 1917.** Field test of theories concerning distributional control. *The American Naturalist* 51: 115-128.
- Hansen, A., Neilson, R. P., Dale, V. H., Flather, C. H., Iverson, L. R., Currie, D. J., Shafer, S., Cook, R. & P. J. Bartlein. 2001.** Global changes in forest: Responses of species, communities and biomes. *BioScience* 51: 765-779.
- Hernández-Macías, H. 2006.** *La vida en los desiertos mexicanos. Colección: La Ciencia para Todos* No. 213. Fondo de Cultura Económica, México, D. F.
- Hijmans, R. J. & C. H. Graham. 2006.** The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions. *Global Change Biology* 12: 1-10.
- Holt, R. D. 1990.** The microevolutionary consequences of climate change. *Trends in Ecology and Evolution* 5: 311-315.
- Hulme, P. E. 2005.** Adapting to climate change: is there scope for ecological management in the face of a global threat? *Journal of Applied Ecology* 42: 784-794
- Hunziker, J. H., Palacios, R. A., Poggio, L., Naranjo, C. A. & T. W. Yang. 1977.** Geographic distribution, morphology, hybridization, cytogenetics and evolution. Pp. 10-47 En: Marbr, T. J., Hunziker, J. H. & D. R. DiFeo (eds.). *Creosote Bush. Biology and Chemistry of Larrea in New World Deserts*. US/IBP Synthesis Series No. 6. Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Pennsylvania.
- Hutchinson, G. E. 1957.** *Concluding remarks*. Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology 22:415-427.

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2002. *Cambio climático y Biodiversidad*. World Meteorological Organization and United Nations Environment Program.

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Secretariat, Ginebra, Suiza.

Jump, A. S. & J. Peñuelas. 2005. Running to stand still: adaptation and the response of plants to rapid climate change. *Ecology Letters* 8: 1010-1020.

Kim, S.J., Flato, G. M., Boer, G. J. & nN A. Mcfarlane, 2002: A coupled climate model simulation of the Last Glacial Maximum, Part 1: transient multi-decadal response. *Climate Dynamics* 19: 515-537.

Leakey, R. & R. Lewin. 1998. *La sexta extinción: El futuro de la vida y de la humanidad*. Tusquets Editores, Barcelona.

Lyford, M. E., Jackson, S. T., Betancourt, J. L. & S. T. Gray. 2003. Influence of landscape structure and climate variability on a late Holocene plant migration. *Ecological Monographs* 73: 567-583

Macarthur, R. H. 1972. *Geographical Ecology. Patterns in the distribution of species*. Harper and Row. New York.

Martínez-Meyer, E. 2005. Climate change and biodiversity: some considerations in forecasting shifts in species' potential distributions. *Biodiversity Informatics* 2:42-55.

McAulliffe, J. R. 1984. Sahuaro-nurse tree associatios in the Sonoran Desert: Competitive effects of sahuaros. *Oecologia* 64: 319-321.

Minckley, R. L., Cane, J. H. & L. Kervin. 2000. Origins and ecological consequences of pollen specialization among desert bees. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences* 267: 265– 271.

Morafka, D. J., Adest, G. A., Reyes, L. M., Aguirre, G. & S. Lieberman. 1992. Differentiation of North American Deserts: A Phylogenetic Evaluation of a Vicariance Model. *Tulane Studies in Zoology and Botany. Suppl Publ.* 1:195-226.

Nix, H. A. 1986. A biogeographic analysis of the Australian elapid snakes. Pp. 4-15. En: R. Longmore (ed.) *Atlas of elapid snakes*. Australian Flora and Fauna Series No. 7.

Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V. N., Underwood, E. C., D'amico, J. A., Itoua, I., Strand, H. E., Morrison, J. C., Loucks, C. J., Allnutt, T. F., Ricketts, T. H., Kura, Y., Lamoreux, J. F., Wettengel, W. W., Hedao, P., & K.R. Kassem. 2001. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth. *BioScience* 51:933-938.

Parmesan, C. 1996. Climate and species' range. *Nature* 382: 765-766.

Parmesan, C., Nils, R., Stefanescu, C., Hill, J.K., Thomas, D., Descimon, H., Huntley, B., Kaila, L., Kullberg, J., Tammaru, T., Tennent, W. J., Thomas, J. A. & M. Warren. 1999. Polewards shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature* 399: 579-583.

Pearson, R. G., Dawson, T. P., Berry, P. M. & P. A. Harrison. 2002. Species: a spatial evaluation of climate impact on the envelope of species. *Ecological Modelling* 154: 289-300.

Peñalba, M. C. & T. R. Van Devender. 1997. Cambios de vegetación y clima en Baja California, México, durante los Últimos 20,000 años. *Geología del Noroeste* 2:21-23

Peterson, A. T. 2001. Predicting species' geographic distributions based on ecological niche modeling. *Condor* 103: 599-605.

Peterson, A. T., Soberón, J. & V. Sánchez-Cordero. 1999. Conservatism of ecological niches in evolutionary time. *Science* 285: 1265-1267.

Peterson, A. T., Ortega- Huerta, M. A., Bartley, J., Sánchez-Cordero, J., Soberón, J., Buddemeier, R. H. & D. R. B. Stockwell. 2002. Future projections form Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature* 416: 626-629.

Pielou, E.C. 1991. *After the Ice Age: The Return of Life to Glaciated North America*. 1991. University of Chicago Press, Chicago, Illinois, USA.

Pitelka, L. F. 1997. Plant migration and climate change. *American Scientist* 85: 464-473.

Primack, R. B. & J. ROS. 2002. *Introducción a la biología de la conservación*. Ariel Ciencia, Barcelona.

Réale, D., Mcadam, A. G., Boutin, S. & B. Dominique. Genetic and plastic responses of a northern mammal to climate change. *Proceedings of the Royal Society of London - B - Biological Sciences* 270: 591-596.

- Rzedowski, J. 1991.** Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. *Acta Botánica Mexicana* 14:3-22
- Sánchez-C, V., Illoldi-Rangel, P., Linaje, M., Sarkar, S. & A. T. Peterson. 2005.** Deforestation and extant distributions of Mexican endemic mammals. *Biological Conservation* 126:465-473.
- Shreve, F. & I. L. Wiggins. 1964.** *Vegetation and flora of the Sonoran Desert*. Vol. 1, 2. Stanford University Press. California. U.S.A
- Soberón, J. & A. T. Peterson. 2005.** Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics* 2:1-10
- Stockwell, D. R. B. y I. R. Noble. 1992. Induction of sets of rules from animal distribution data a robust and informative method of data analyst. *Mathematics and Computers in Simulation* 33: 385-390.
- Stockwell, D. R. B. & D. Peters. 1999.** The GARP modeling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographic Information Science* 13: 143-158.
- Tarbut E. & F. Lutgens. 2001.** *Ciencias de la Tierra, Una Introducción a la Geología Física*. Prentice Hall, Madrid.
- Toledo, V. M: 1988.** La diversidad biológica de México. *Ciencia y Desarrollo* 81: 17-30.
- Thompson, R.S. & K. H. Anderson. 2000.** Biomes of western North America at 18,000, 6,000 and 0 14C yr B.P. reconstructed from pollen and packrat midden data. *Journal of Biogeography* 27: 555-584.
- Valiente-Banuet, A. & E. Ezcurra. 1991.** Shade as a cause of the association between the cactus *Neobuxbaumia tetepo* and the nurse plant *Mimosa luisana* in the Tehuacan Valley, Mexico. *Journal of Ecology* 79:961-971.
- Van Devender, T. R. 1990a.** Late Quaternary vegetation and climate of the Chihuahuan Desert, United States and Mexico. Pp: 104-133. En: Betancourt, J. L., Van Devender, T. R. & P.S. Martin (eds.). *Packrat middens: the last 40,000 years of biotic change*. University of Arizona Press, Tucson.
- Van Devender, T. R. 1990b.** Late Quaternary vegetation and climate of the Sonoran Desert, United States and Mexico. Pp. 134-165. En: Betancourt, J. L., Van Devender, T. R. & P.S. Martin (eds.). *Packrat middens: the last 40,000 years of biotic change*. University of Arizona Press, Tucson.
- Van Devender, T. R. & T. L. Burgess. 1985.** Late Pleistocene woodlands in the Bolson de Mapimi; a refugium for the Chihuahuan Desert biota? *Quaternary Research* 24: 346-353.
- Vasek, F. C. 1980. Creosote bush: long-lived clones in the Mojave Desert. *American Journal of Botany*. 67: 246-255.
- Vázquez-Yanes, C., Batis Muñoz, A. I., Alcocer Silva, M. I., Gual Díaz, M. & C. Sánchez Dirzo. 1999.** *Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación*. Reporte técnico del proyecto J084. CONABIO - Instituto de Ecología, UNAM.
- Wells, P.V. & J. H. Hunziker. 1976.** Origin of the creosote bush (*Larrea*) deserts of southwestern North America. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 63: 843-861.
- WWF (World Wild Life Found) 2007.** *El Desierto Chihuahuense*. (http://www.wwf.org.mx/wwfmex/prog_desierto.php)
- Zaccagnini, M. E. 2002.** Agricultura y conservación: el aguilucho langostero de Argentina. Pp 212-223. En Primack, R. Rozzi, R., Feinsinger, P., Dirzo, R. & F. Massardo (eds.). *Fundamentos de Conservación Biológica: Perspectivas Latinoamericanas*. Fondo de Cultura Económica, México.

Capítulo X

Efecto del cambio climático en la distribución de los lepidópteros mesoamericanos *Itaballia demophile centralis* Joicey & Talbot, 1928 y *Pieriballia viardi viardi* (Boisduval, 1836)

Teresa P. Feria Arroyo, Marysol Trujano Ortega,
Armando M. Luis Martínez, Jorge Llorente Bousquets,
Jon M. Dale, y Jesús Muñoz

Resumen

Pieriballia viardi viardi e *Itaballia demophile centralis*, dos especies de lepidópteros mesoamericanos con límites de distribución en el sur de Tamaulipas, se reportaron en el Valle del Río Grande Texas recientemente, área que se encuentra a cientos de kilómetros de sus distribuciones originales. Con el fin de entender los efectos del cambio climático en la distribución de estas especies, se modeló su distribución potencial actual y futura usando el modelo Handley A2 para los años 2020 y 2050 mediante el uso de MaxEnt y variables climáticas obtenidas de WorldClim. Los mapas de distribución potencial se evaluaron estimando el área bajo la curva (AUC) en los estadísticos ROC. Se determinó el estatus de conservación de las áreas naturales que se encuentran dentro de las áreas potenciales de distribución predichas utilizando los mapas de Influencia Humana, Regiones Terrestres Prioritarias y Áreas Naturales Protegidas. Los modelos de distribución actual fueron predichos con AUCs > 0.9, por lo que se utilizaron estos modelos para proyectar el área de distribución potencial usando los escenarios de cambio climático. *P. viardi viardi* muestra una posible tendencia a expandir su distribución hacia el norte sin afectar su distribución original en América Central, mientras que *I. demophile centralis* podría perder sus poblaciones locales en el sur, principalmente en la península de Yucatán, sin tener posibles sitios de expansión hacia el norte del continente. La mayor parte de las áreas del norte de Tamaulipas y sur de Texas sufren un impacto alto de las actividades humanas sobre las áreas naturales. La distribución potencial de *P. viardi viardi*, se proyectó en ocho Regiones Terrestres Prioritarias (RTP) y un Área Natural Protegida (ANP) y la de *I. demophile centralis* se proyectó en cinco RTP y ninguna ANP. La RTP de mayor relevancia para la expansión de *P. viardi viardi* es Laguna Madre, Tamaulipas. Se recomienda que en trabajos futuros se incluyan análisis de los efectos del clima en las especies huésped, así como análisis de las tasas del uso de suelo y vegetación así como realizar estudios a nivel regional y local con el fin de evaluar el impacto del cambio climático en las poblaciones.

Palabras clave: Distribución potencial, cambio climático, MaxEnt, *Itaballia demophile centralis*, *Pieriballia viardi viardi*.

Abstract

Pieriballia viardi viardi and *Itaballia demophile centralis*, two Mesoamerican butterflies with northern limits of distribution in southern Tamaulipas, Mexico, were recently reported in the Lower Rio Grande Valley of Texas, an area hundreds of kilometers apart of their original distributions. In order to better understand the effects of climatic change on the distribution of these species, we predict the current and future potential distribution (2020 and 2050, respectively) using the Handley A2 model and MaxEnt software. Climatic variables were obtained from WorldClim and potential distribution maps were evaluated using the AUC in an ROC plot. The status of conservation of the natural areas predicted was assessed by overlapping the predicted potential areas of future distribution with The Human Footprint, Terrestrial Protected Areas, and Natural Protected Areas maps. Models of current potential distribution were predicted with AUC > 0.9, thus these maps were used to project the potential area of distribution under climatic change scenarios. *Pieriballia viardi viardi* displayed a plausible expansion of its distribution to the north without affecting the original distribution in Central America, while *I. demophile centralis* may be contracting its distribution in the south, mainly in the Yucatan Peninsula, without expanding its distribution in the north. Most natural areas in northern Tamaulipas and extreme southern Texas have been heavily impacted by humans. The *P. viardi viardi* potential distribution was projected in eight RTP and one ANP (Regiones Terrestres Prioritarias and Áreas Naturales Protegidas, respectively), while the *I. demophile centralis* distribution was projected in five RTP and no one ANP. Laguna Madre, Tamaulipas, is the RTP most important in the expansion of *P. viardi viardi*. Future work aiming to understand the impact of climatic change in populations should include assessments of climate change in the host plants, land use transformations, and regional and local studies of populations.

Key words: Potential distribution, Climate change, MaxEnt, *Itaballia demophile centralis*, *Pieriballia viardi viardi*

Introducción

Los efectos actuales y futuros del calentamiento global en la biodiversidad incluyen cambios latitudinales, altitudinales, así como de expansión o de contracción de la distribución de las especies (Forister *et al.*, 2010; Sinervo *et al.*, 2010). Estas modificaciones en la distribución se observan marcadamente en aquellas especies que tienen una dependencia biológica acentuada hacia ciertos umbrales de tolerancias climáticas (p.ej., los huevos sólo eclosionan a ciertas temperaturas), tal es el caso de algunas especies de mariposas, aves, mamíferos, peces, reptiles, anfibios, plantas e invertebrados marinos (Thomas *et al.*, 2001; Parmesan & Yohe, 2003; Root *et al.*, 2003, 2005). Debido a las altas probabilidades de que el calentamiento global se acelere (IPCC, 2001) se recomienda realizar estudios con el fin de predecir los cambios en las áreas de distribución de diferentes especies y biotas.

Los insectos, como organismos poiquilotermos y estenomésicos, por lo regular son particularmente sensibles a los cambios climáticos. Por lo que se espera que la respuesta más frecuente al calentamiento global sea que estos organismos alteren o amplíen su distribución latitudinal hacia el norte o bien altitudinal hacia lugares más elevados (Root *et al.*, 2003; 2005), tal y como sucede con las mariposas europeas, cuyos cambios en su distribución se han monitoreado relativamente bien (Asher *et al.*, 2001). En cambio, existe poca información con respecto a los desplazamientos de las mariposas del continente americano (Crozier, 2004). Registros recientes muestran que algunas especies de mariposas tropicales están iniciando movimientos hacia el norte del continente. Por ejemplo, varias especies de mariposas con límites de distribución históricos en el sur de Tamaulipas, México, se han reportado recientemente en el Valle del Río Grande de Texas (VRGT) (p.ej., *Pieriballia viardi viardi* e *Itaballia demophile centralis*), región que se encuentra a varios cientos de kilómetros de sus distribuciones reconocidas (Llorente *et al.*, 1997; Dauphin *et al.*, 2005, Bordelon & Knudson, 2006).

Los Modelos de Distribución de Especies (MDE) juegan un papel importante en la evaluación de la potencialidad y magnitud de las consecuencias que el cambio climático ocasionará en la distribución de las especies (Pearson & Dawson, 2003; Araújo *et al.*, 2005). Los MDE relacionan la distribución geográfica (latitud/longitud) conocida para las especies con variables climáticas, para caracterizar ambientes en donde las especies pueden potencialmente vivir, asumiendo que la distribución conocida (presencia/



Figura 1. *Pieriballia viardi viardi* (A) e *Itaballia demophile centralis* (B) Foto A tomada de: www.mariposasmexicanas.com. Foto B tomada de www.naba.org/chapters/nabast/photoschecklist.html.

ausencia) de una determinada especie proporciona información suficiente para describir sus requerimientos ecológicos (Kadmon *et al.*, 2003). Las áreas predichas pueden ser visualizadas y proyectadas en un espacio geográfico con la ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Araújo & Guisan, 2006; Kearney, 2006). De tal forma que la relación espacial de la distribución de las especies vs. el clima puede emplearse para inferir cambios espaciales en las distribuciones sobre el tiempo en función del cambio climático (Mitikka *et al.*, 2008).

En este estudio se utilizan los MDE para predecir la distribución potencial actual y futura a 10 y 40 años de dos especies de mariposas tropicales de la tribu Pierini (*Pieriballia viardi viardi* e *Itaballia demophile centralis*).

(ver figura 1) Dado que las observaciones recientes indican una posible expansión de la distribución de estas especies hacia el norte del continente, se plantean los siguientes objetivos:

1. Predecir la distribución potencial actual y futura con escenarios de cambio climático para los años 2020 y 2050 mediante el uso de los MDE.

Son varios los factores que determinan la distribución de una especie. Entre ellos se destacan los factores abióticos (como el clima y la topografía; (Udvardy, 1969), los bióticos (interacciones), capacidades de dispersión, accesibilidad de las regiones de dispersión, capacidad evolutiva de las poblaciones para adaptarse a nuevas condiciones (Pulliam, 2000; Soberón & Peterson, 2005), así como factores antropogénicos (transformación de hábitats). De estos, el uso de variables climáticas (factores abióticos) es frecuente para estimar la distribución potencial de las especies (Austin, 2002), ya que el clima puede limitar la distribución de las especies y afecta su crecimiento y supervivencia directamente (p.ej., temperaturas letales altas o bajas) e indirectamente vía interacciones biológicas (p.ej., fuentes de alimento, patógenos, competidores, predadores y otros). Por ello, en este estudio únicamente se incluyeron variables climáticas para obtener los modelos de distribución potencial actual y futura bajo escenarios de cambio climático de las especies estudiadas.

Para proponer los escenarios de cambio climático es indispensable la construcción de patrones de emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 , N_2O), los cuales son el producto de sistemas dinámicos muy complejos, determinados por fuerzas tales como el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico y el cambio tecnológico, cuya evolución es muy incierta (IPCC, 2000). Los escenarios climáticos son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro, en los que se toman en cuenta una gama de posibles condiciones de desarrollo global para los próximos 100 años. En un sentido más amplio son escenarios del estado de crecimiento de la población y la economía, y han resultado ser un instrumento apropiado para investigar los posibles efectos del cambio climático debido a causas antropogénicas, así como para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis. Existen diversos escenarios de cambio climático, sin embargo en este estudio se utilizó el escenario A2, caracterizado por una emisión de gases invernadero alto y un incremento de moderado a alto en la temperatura (IPCC, 2001), y que describe un mundo muy heterogéneo con desarrollo económico regionalizado, un crecimiento de población humana elevado y un

incremento de las emisiones de CO_2 a causa de la pérdida de bosques. El rápido crecimiento de la población unido a aumentos menos rápidos de la productividad agraria, determinan un crecimiento rápido y continuo de las emisiones de metano y de óxido nitroso provenientes del uso de la tierra (IPCC, 2000).

El cambio climático podría tener efectos positivos o negativos en la distribución espacial de las especies estudiadas. Un efecto positivo se observaría si se presenta una expansión de la distribución, por la suma de áreas más favorables climáticamente, sin que esto afecte la distribución nativa más sureña. Por el contrario, un efecto negativo se observaría si la distribución nativa se contrae, sin adiciones ya que esto es un reflejo de posibles extinciones locales de las poblaciones.

2. Determinar el estatus de conservación de las áreas naturales que se encuentran dentro de las áreas potenciales de distribución predichas.

La distribución espacial de los hábitats y su estado de conservación tienen y tendrán gran impacto en la capacidad de respuesta de las especies ante los cambios climáticos. La notable transformación de áreas naturales podría provocar que sitios con climas (mesoclimas y microclimas) adecuados para las especies no se encuentren disponibles, obstaculizando el amortiguamiento de los efectos del cambio climático en aquellas especies que se están desplazando (Hill *et al.*, 1999). Los estudios enfocados a la conservación deben considerar por tanto el análisis del estatus en que se encuentran las áreas naturales, en los "sitios de expansión nuevos" de las especies. El norte de Tamaulipas y el Valle del Río Grande de Texas (VRGT) afrontan un gran reto para conservar sus hábitats naturales dado el gran desarrollo urbano/rural y las prácticas agrícolas no sustentables que han fragmentado considerablemente la zona (Banda-Valdez 2004; Ramírez-Albores, *et al.*, 2007). Esto afectará negativamente a las especies que tengan la capacidad de desplazarse a estas zonas; particularmente aquellas especies que requieren de hábitats no perturbados para establecer sus poblaciones, de tal modo que no serán capaces de persistir fuera de áreas naturales protegidas o reservas ecológicas después del año 2050 (Soulé & Sanjayan, 1998). Es posible que en las siguientes décadas, las áreas protegidas sean cruciales para mantener las poblaciones de muchas y diversas especies. En este trabajo se espera que las áreas potenciales predichas para el presente correspondan con algunas de las áreas protegidas de la región de estudio. Sin embargo, estas áreas no necesariamente concordarán con áreas predichas para los años 2020 y 2050.

Método

Especies. Las especies de mariposas estudiadas tienen su distribución más sureña en América Central, principalmente en Guatemala, Belice y Honduras. Se extienden por México a lo largo de las dos vertientes; del lado del Pacífico su límite es el estado de Nayarit, mientras que del lado del Golfo llegan hasta el sur de Tamaulipas (Ilustración 11 A-C)*. Estas especies se encuentran desde el nivel del mar, pero *Itaballia demophile centralis* llega hasta los 900 m; mientras que *Pieriballia v. viardi* alcanza hasta los 1500 m de altitud. Están asociadas a los bosques tropicales perennifolios y subperennifolios, que son bosques lluviosos de las tierras bajas; aunque a veces alcanzan los pisos inferiores del bosque mesófilo de montaña de media montaña de acuerdo con Llorente (1984).

Pieriballia viardi viardi (Boisduval, 1836).- Mariposas con envergadura alar de 35-38 mm, con las antenas negras y en su extremo blancas, la cabeza es negra y el cuerpo es negro con algunos pelos blancos por su parte dorsal y blanco por su parte ventral. Los adultos son dimórficos; el macho dorsalmente es blanco con márgenes negros y un punto negro en el extremo superior de la célula discal; el ala posterior es completamente blanca; ventralmente presenta escamas rojas en la base del ala posterior y éstas son más oscuras que las alas anteriores. La hembra, en su mayoría, es negra con franjas de color amarillo o naranja, tanto dorsal como ventralmente. Esta especie vuela por los senderos, límites de los bosques o a través de él, con un vuelo rápido. Las densidades poblacionales son bajas y sus poblaciones no representan distribuciones amplias. Las plantas de alimentación de las larvas pertenecen a la familia Capparidaceae, especialmente *Capparis* spp.

Itaballia demophile centralis (Joyce & Talbot, 1928). Mariposas con envergadura alar de 30 a 35 mm, cabeza y antenas negras y cuerpo recubierto con pelos blancos. Las alas anteriores son redondas en el ápice, dorsalmente son blancas con un margen negro marcado y amplio en las alas anteriores y muy estrecho en las posteriores. Por la cara ventral las alas son blancas. Las anteriores son atravesadas por una serie de escamas oscuras que dibujan una línea hasta el borde. Las posteriores presentan escamas amarillas en la base del margen costal. Los adultos son ligeramente dimórficos, en las hembras las marcas negras son más prominentes y el blanco suele estar salpicado por escamas amarillas pálidas. Son solitarias y se les encuentra en senderos y a lo largo de los

arroyos; las poblaciones suelen ser bajas y no estacionales. El vuelo es errático y los individuos de ambos sexos suelen posarse sobre las hojas por algunos segundos. Las hembras ovipositan durante la mañana hasta el medio día en lugares donde la vegetación es densa. Las plantas huéspedes pertenecen a la familia Capparidaceae: *Capparis indica* y *C. frondosa*. A menudo, los imagos visitan flores de *Lantana*, *Psychotria* y *Hamelia*.

Modelos de distribución y su instrumentación

Distribución geográfica. El primer requisito para modelar la distribución de las especies es contar con datos de distribución geográfica (latitud/longitud). La información geográfica para América Central se obtuvo al consultar el *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF) y los datos de Papilionoidea en Guatemala de Salinas-Gutiérrez *et al.* (2009). Los datos de distribución para México se obtuvieron al consultar la base MARIPOSA del Museo de Zoología "Alfonso L. Herrera" (MZFC), de la Facultad de Ciencias, UNAM, con información de 13 colecciones científicas nacionales e internacionales (Luis *et al.*, 2005). Todos los datos geográficos fueron revisados previamente.

Variables climáticas. El segundo requisito para modelar la distribución de las especies es contar con las variables climáticas que serán usadas durante el proceso. Para obtener los modelos finales de distribución potencial actual y futura previamente se eligieron las variables que, de acuerdo al algoritmo MaxEnt (Phillips *et al.*, 2006), tienen mayor peso dentro del modelo para predecir la distribución de las especies de estudio. Primero se corrieron los datos geográficos conocidos para la especie con 19 variables obtenidas de WorldClim 1.3 (Cuadro 1) (Hijmans *et al.*, 2005). Estas variables se utilizan ampliamente en estudios de modelado por considerarse biológicamente significativas para caracterizar distribuciones de especies, ya que representan tendencias anuales, estacionalidad y factores limitantes o extremos (Hijmans *et al.*, 2005). MaxEnt analiza cuáles de estas 19 variables tienen un mayor peso en el análisis y despliega esta información en forma de gráficos y un cuadro que contiene la información del valor estimado que cada variable aporta en el modelo. Para obtener los modelos robustos de distribución potencial actual y futura, bajo escenarios de cambio climático se eligieron sólo las variables que aportaron más del 75 % de información. Los mapas de *Pieriballia viardi viardi* se obtuvieron con las variables temperatura anual, precipitación del mes más lluvioso y temperatura

* Nota: Las Ilustraciones se encuentran en la página 118

Cuadro 1. Variables bioclimáticas de Worldclim 1.3 usadas para modelar la distribución potencial de *Pieriballia viardi viardi* e *Itaballia demophile centralis*.

Variables
Temperatura media anual
Intervalo medio diario (media mensual (t° máx.- t° min.))
Isotermalidad (B2/B7) (* 100)
Temperatura estacional (desviación estándar *100)
Temperatura máxima del mes más cálido
Temperatura mínima del mes más frío
Rango de temperatura anual (B5 - B6)
Temperatura media del mes más húmedo
Temperatura media del mes más seco
Temperatura media del trimestre más cálido
Temperatura media del trimestre más frío
Precipitación anual
Precipitación del mes más húmedo
Precipitación del mes más seco
Precipitación estacional (Coeficiente de variación)
Precipitación del trimestre más húmedo
Precipitación del trimestre más seco
Precipitación del trimestre más cálido
Precipitación del trimestre más frío

media del trimestre más frío, mientras que para *Itaballia demophile centralis* fueron temperatura anual, precipitación del mes más lluvioso y la temperatura mínima del mes más frío.

Las variables climáticas para el futuro corresponden al modelo de circulación general (MCG) HADCM3, un

modelo acoplado atmósfera-océano desarrollado por el Hadley Centre for Climate Prediction and Research. Se utilizó el escenario A2 (alta emisión) que considera altas concentraciones de CO₂ atmosférico (alta emisión) y un incremento en la temperatura que va de moderado a alto. Este escenario describe un panorama muy heterogéneo caracterizado por la autosuficiencia, la

conservación de las identidades locales y una población mundial en continuo crecimiento (Arnell *et al.*, 2004; IPCC, 2000).

Modelos de distribución de especies (MDE). El tercer requisito para modelar la distribución de las especies es decidir la técnica con la que se generarán los MDEs. Existen varios métodos que pueden utilizarse para generar modelos de distribuciones potenciales de las especies (Guisan & Zimmermann, 2000; Elith *et al.*, 2006). En este caso se utilizó MaxEnt, ya que estudios recientes muestran que este método determina de una mejor forma las áreas de distribución potencial adecuadas vs. no adecuadas, en comparación con otros métodos (Elith *et al.*, 2006; Hernández *et al.*, 2006, Phillips 2008; Phillips *et al.*, 2004, 2006; Feria *et al.*, In prep.). MaxEnt hace predicciones usando sólo los datos de presencia de las especies. Este programa modela una distribución probable (distribución potencial) del hábitat disponible en el área de estudio, la cual está en función de los datos ambientales (temperatura y precipitación) y de la distribución geográfica conocida de la especie (latitud/longitud). De acuerdo con este programa, la distribución potencial de una especie es aquella más cercana a la uniforme (es decir, la más cercana a tener probabilidades iguales de presencia a lo largo de toda el área de estudio) sujeta a la restricción de que la expectativa en la distribución modelada, para cada variable ambiental, debe concordar con su promedio empírico a lo largo de la distribución real conocida (Elith *et al.*, 2011). Por lo tanto, el valor calculado por MaxEnt no es de probabilidad de presencia, sino de "similitud del hábitat" conocido con el predicho. MaxEnt asigna un valor de idoneidad de hábitat por cada celda de la cuadrícula en el área de estudio, que va de 0 a 1, donde la celda con un valor de 1 presenta una similitud del hábitat conocido alta, mientras que aquellas celdas con valores cercanos a 0 presenta una similitud baja o nula. Para estimar la distribución potencial de las especies de estudio se utilizó MaxEnt versión 3.2.19. (Phillips *et al.*, 2006), con los parámetros predefinidos (umbral de convergencia = 10^5 , máximo número de iteraciones = 500, valor de regularización β = auto) siguiendo a Phillips *et al.* (2006).

Evaluación de las predicciones. Finalmente es necesario realizar una evaluación de qué tan fidedignas son las predicciones hechas por los MDE. En este caso se utilizó el área bajo la curva AUC (por sus siglas en inglés: *Area Under the Curve*) de los gráficos ROC, para evaluar únicamente las predicciones de las distribuciones en el presente obtenidas con MaxEnt. Este estadístico nos permite evaluar los casos clasificados correctamente para todos los umbrales de predicción (del 0 al 1). El valor de AUC está entre 0,5 y 1; donde un valor de 0,5

equivale a una clasificación al azar; mientras que un valor de 1 indica un ajuste perfecto; es decir, que todos los casos han sido clasificados correctamente (Fielding & Bell, 1997). De cada una de las especies se utilizó el 70% de los datos de presencia conocida para generar el modelo de distribución potencial y el 30% para evaluarlo. Este proceso requiere la obtención de pseudo-ausencias, las cuales se obtuvieron aleatoriamente usando la extensión Random Point Generator v. 1.28 en ArcView 3.2 (ESRI, 1999).

Estimación del área de distribución actual y futura. Los modelos de distribución potencial obtenidos para el presente y el futuro fueron reclasificados para la obtención de mapas binarios (presencia, 1/ausencia, 0). Se realizó una intersección entre los puntos de presencia de la especie y los datos de probabilidad de presencia del hábitat generado por MaxEnt. Con ello se obtuvo el punto de corte para designar los valores de presencia/ausencia al nuevo mapa binario. Los mapas binarios se proyectaron a coordenadas UTM 14 con una resolución espacial (tamaño de píxel) de 1000 x 1000 m. El área de distribución fue calculada considerando únicamente los píxeles con valores de presencia (1).

Áreas de distribución potencial y su estado de conservación. Se realizó un análisis cuantitativo para establecer el estatus de conservación de las áreas naturales en donde la distribución potencial de la especie se predijo, a partir del solapamiento de los mapas binarios actuales y futuros con el mapa de influencia humana de Sanderson *et al.* (2002). Este mapa se diseñó con una resolución de 1 km x 1 km y es producto de la sumatoria que considera la densidad poblacional, uso del suelo y vegetación, accesibilidad (p. ej. presencia de carreteras) e infraestructura eléctrica. La influencia humana se representa con valores de 0 a 100. Los valores de 0-10 denotan áreas intactas, mientras que los, mayores de 10 presentan algún tipo de influencia humana (Sanderson *et al.*, 2002). Dada la naturaleza de las especies estudiadas (dependencia de áreas verdes), se consideró que valores >50 representan un impacto alto de las actividades humanas sobre las áreas naturales, 25-49 un impacto medio y de 0-24, un impacto bajo. Esto fue interpretado con relación a la presencia de la especie como: valores de > 50 son hostiles o muy limitantes para la distribución de la especie, mientras que valores de 25-49 son intermedio o limitantes y de 0-24, propicio o poco limitantes. Con el fin de realizar la estimación cuantitativa los mapas ráster binarios se transformaron a mapas de puntos. Con la ayuda de la extensión GetGrid (Davids, 2000) se extrajeron los valores del mapa de Sanderson *et al.* (2002) a cada punto de la distribución predicha para el norte de Tamaulipas y el VRGT.

Para determinar si las especies se encuentran en algún área natural protegida o de gran importancia biológica, en el caso de México, se solaparon los mapas de las Regiones Terrestres Prioritarias (RTP) (Arriaga *et al.*, 2000) y el de las Áreas Naturales Protegidas (ANP) (Anónimo, 1999). El primer mapa representa las áreas con una biodiversidad importante y un nivel de amenazas alto; por lo tanto, pueden ser elegidas para fines de conservación, aunque actualmente carecen de un decreto nacional de protección. El segundo mapa muestra las áreas que cuentan con un decreto nacional para su protección. En el caso de Texas, se usaron los mapas de Refugios Silvestres y Parques Nacionales obtenidos de la página (http://www.tpwd.state.tx.us/landwater/land/maps/gis/data_downloads/).

Resultados

Todos los modelos de distribución actual alcanzaron valores de AUC > 0.9, lo que indica que tienen un desempeño muy bueno, por lo que se utilizaron estos modelos para proyectar el área de distribución potencial usando los escenarios de cambio climático para los años 2020 y 2050. MaxEnt predijo el hábitat potencial actual y futuro para *Pieriballia viardi viardi* en las zonas norte de Tamaulipas y sur de Texas (Ilustración 10 B-D). Por el contrario, para *Itaballia demophile centralis* la distribución potencial actual y futura se limita al sur de Tamaulipas (Ilustración 12B-D)*.

La distribución potencial actual de *P. viardi viardi* muestra una reducción con respecto a las distribuciones futuras para los años 2020 y 2050. No obstante, no se observa pérdida de distribución en los límites sureños de la distribución original. Por el contrario, en el caso de *I. demophile centralis* se observa una disminución marcada en el sur de su distribución, particularmente en la península de Yucatán, de donde se estima una pérdida del hábitat de más del 50 %.

Áreas de distribución potencial y su estado de conservación

La mayor parte de las áreas del norte de Tamaulipas y sur de Texas se encuentran en un grado de perturbación con valores entre 50 y 100, de acuerdo con el mapa de Sanderson *et al.* (2002) (Ilustraciones 12 y 13)*; es decir que el impacto sobre las áreas naturales es alto por las actividades humanas y, por ende, son hostiles o muy limitantes para la distribución geográfica de las especies. No obstante, la distribución potencial de *P. viardi viardi*, coincide con ocho RTP's que se encuentran en Tamaulipas

y Nuevo León, principalmente (Cañón de Iturbide, encinares tropicales de Lomas Las Pitas y Sierra Maratines, El Cielo, El Potosí-Cumbres de Monterrey, Laguna Madre, Laguna de San Andrés, San Antonio-Peña Nevada, Sierra de Tamaulipas, Valle de Jaumave) y un ANP (Cumbres de Monterrey). La distribución potencial para *Itaballia demophile centralis* se proyectó en cinco RTP (encinares tropicales de Lomas Las Pitas y Sierra Maratines, El Cielo, Laguna Madre, Laguna de San Andrés y Sierra de Tamaulipas) y ninguna ANP.

Discusión

Las especies pueden responder de dos formas fundamentales a los efectos del cambio climático: expandiendo y/o contrayendo sus distribuciones (Sinervo *et al.*, 2010), y nuestro estudio ilustra ambas situaciones. Por un lado, *Pieriballia viardi viardi* muestra una posible tendencia a expandir su distribución norteña sin afectar su distribución original en América Central, mientras que *Itaballia demophile centralis* podría perder sus poblaciones locales en el sur, principalmente en la península de Yucatán, sin tener posibles sitios de expansión hacia el norte (Texas).

Si el tiempo y las capacidades de dispersión y de adaptación lo permiten, el cambio climático podría favorecer a la expansión de *P. viardi viardi*. Tres condiciones adicionales al clima podrían favorecer este hecho: (1) al momento ya se han registrado los primeros adultos en el VRGT en el 2005 (Bordelon & Knudson, 2006) visitando el tipo de flores de su preferencia en jardines para mariposas criados en diferentes parques, lo que coincide con las predicciones hechas por MaxEnt; (2) hay representantes de la familia Capparidaceae, plantas de alimentación de la larva, en el norte de Tamaulipas y en el VRGT; (3) la presencia de la RTP Laguna Madre, que conecta áreas naturales con México y EEUU. Los primeros adultos de esta mariposa se registraron fotográficamente en Betsen National Park en el 2005. Los avistamientos incluyen a un macho y a una hembra de la especie. Al momento no ha habido nuevos registros, pero tampoco se ha establecido una búsqueda continua de poblaciones de la especie, lo que es altamente recomendable. Además de estos parques, el auge por plantar especies nativas que atraen mariposas se está incrementando en la zona, por lo que los monitoreos de avistamientos nuevos de ésta y otras especies podrían darse también en las zonas urbanas.

Pese a que no se conoce con exactitud cuáles son las plantas huéspedes de esta especie, ejemplos con abejas de la familia Apidae muestran que las asociaciones

* Nota: Las Ilustraciones se encuentran en las páginas 119 y 120.

mutualistas no son necesariamente exclusivas. Cuando las condiciones climáticas en las zonas de expansión son similares a las zonas nativas, las especies pueden adaptarse iniciando interacciones nuevas con otras especies (Hinojosa-Díaz *et al.*, 2009). Además, la presencia de la RTP Laguna Madre representa una posible área de transición para la expansión de *P. viardi viardi*. Esta región cuenta con una superficie de 5.854 km² representa un corredor biológico altamente productivo, caracterizado por la presencia de un alto número de especies endémicas. Contiene una gran variedad de hábitats en buen estado de conservación, que incluyen islas de barrera, dunas, pastizales marinos, estuarios, islotes, marismas, pastizales y manglares. Es considerada una zona de transición para la fauna neártica ligada a humedales y el límite sur de la distribución en México de varias especies neárticas. Algunos problemas que existen en esta área se deben a la conexión del canal intracostero a través de la zona con el canal de Texas como parte de un proyecto mega-turístico, la desecación y destrucción de la vegetación, la contaminación del río Bravo y su azolve, el uso de plaguicidas y salinización por fertilizantes. Adicionalmente, existen inventarios florísticos, faunísticos y de algas, pero no hay información sobre ecología de las comunidades (Arriaga *et al.*, 2000). Lamentablemente, no existen actividades de conservación en la región, actividades que son muy necesarias ya que, además de su importancia como RTP, en el caso de cumplirse la hipótesis de migraciones de especies tropicales hacia el norte como resultado de los efectos del cambio climático, la Laguna Madre estaría jugando un papel primordial.

En cambio, *Itaballia demophile centralis*, pese a que también se ha registrado en el VRGT, no cuenta con áreas de distribución potencial en esa zona. Su área de distribución potencial, así como la presencia de las plantas huéspedes se limitan a la parte sur de Tamaulipas. Esto podría contradecir la idea clásica de que los efectos de las interacciones bióticas en las distribuciones no son discernibles a escalas macroecológicas (Araújo & Luoto, 2007) por lo que es importante realizar estudios sobre los efectos del cambio climático en las plantas huéspedes. Lo que resulta preocupante para *I. demophile centralis* es la pérdida del hábitat en la península de Yucatán, de donde podría prácticamente desaparecer, al igual que otras especies de valencia ecológica equivalente o similar.

El cambio de uso de suelo y vegetación es una de las principales causas de extinción de poblaciones (Pimm & Raven, 2000; Thomas *et al.*, 2004), por lo que encontrar áreas conservadas en zonas de posible expansión para las especies de estudio es alentador. Sin embargo, en este ejercicio no se consideró un análisis sobre la tasa de deforestación anual en Tamaulipas y/o VRGT y no se realizaron modelos sobre la posible desaparición de las áreas conservadas para los años 2020 ó 2050. Los impactos de los cambios resultantes en el clima dependen del estado futuro mundial (Arnell *et al.*, 2004). La incorporación de otros escenarios de cambio climático al análisis podría ayudar a realizar comparaciones que permitan visualizar de una manera más clara los posibles impactos del cambio climático en la distribución de las especies estudiadas. Con ellos se podrá asesorar de una mejor manera a los practicantes de la bioconservación.

Los efectos del cambio climático en la biodiversidad no se restringen únicamente a los efectos en la distribución a macro escala. El presente estudio representa uno de los primeros intentos por entender los efectos del cambio climático en la distribución de mariposas neotropicales que se han reportado recientemente en el sur de Texas, región que se encuentra a cientos de kilómetros de distancia de sus distribuciones nativas. Se recomienda que en trabajos futuros se incluyan análisis de los efectos del clima en las especies huésped, así como análisis de las tasas del uso de suelo y vegetación. Adicionalmente, se recomienda realizar estudios a nivel regional y local con el fin de evaluar el impacto del cambio climático en las poblaciones.

Agradecimientos

TPFA, MTO, ALM, JLB agradecen a la Facultad de Ciencias y a los proyectos de DGAPA, PAPIIT IN203509, PAPIIME 201507, CONACyT 83237 y beca de Maestría CONACyT. TPFA, JD y JM agradecen al FRC obtenido a través de The University of Texas-Pan American, así como al Programa Oficial de Máster Universitario en Biodiversidad en Áreas Tropicales y su Conservación, en convenio entre el Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España, la Universidad Menéndez Pelayo de España y la Universidad Tecnológica Indoamérica de Ecuador.

Literatura Citada

- Anónimo. 1999.** Áreas naturales protegidas en México. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Mapa. México, D.F.
- Araújo, M. B. & A. Guisan. 2006.** Five (or so) challenges for species distribution modelling. *Journal of Biogeography* 33: 1677–1688.
- Araújo, M. B. & M. Luoto. 2007.** The importance of biotic interactions for modelling species distributions under climate change. *Global Ecology and Biogeography* 16: 743–753.
- Araújo, M. B., R. G. Pearson, W. Thuiller & M. Erhard. 2005.** Validation of species-climate impact models under climate change. *Global Change Biology* 11: 1504–1513.
- Arnell, N.W., M. J. L. Livermore, S. Kovats, P. Levy, R. Nicholls, M. L. Parry & S. Gaffin. 2004.** Climate and socio-economic scenarios for climate change impacts assessments: Characterising the SRES storylines. *Global Environmental Change* 14(1): 3–20.
- Arriaga, L., J. M. Espinoza, C. Aguilar, E. Martínez, L. Gómez & E. Loa (Coords.). 2000.** *Regiones Terrestres Prioritarias de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Austin, M. P. 2002.** Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modeling. *Ecological Modelling* 157: 101–118.
- Asher, J., M. Warren, R. Fox, P. Harding, G. Jeffcoate & S. Jeffcate. 2001.** *The Millennium Atlas of butterflies in Britain & Ireland*. Oxford University Press, Oxford.
- Banda Valdez, A. 2004.** *Elaboración del proyecto técnico: Restauración de la flora y fauna nativa en terrenos agrícolas con cambio de uso de suelo, para el establecimiento de un corredor biológico costero en Laguna Madre*. Pronatura Noreste, A. C. Informe Final SNIB-CONABIO Proyecto No. CJO27. México, D. F.
- Bordelon, C. & E. Knudson. 2006.** Three New USA Butterfly Records (Pieridae, Nymphalidae) from the Lower Rio Grande Valley of Texas. *News of the Lepidopterists' Society*, 48(1): 3-6.
- Crozier, L. G. 2004.** Field transplants reveal summer constraints on a butterfly range Expansion. *Oecologia*. 141: 148–157.
- Dauphin, J. D. Dauphin, E. Knudson & C. Bordelon. 2005.** Three New Butterflies New to the United States from South Texas. *News of the Lepidopterists' Society*. 47(2): 43-46.
- Davies, J. 2000.** Get Grid Value Extension 2. Public Domain in ArcView Gis. 14.04 Kb.
- Elith, J., C. Graham, R. P. Anderson, M. Dudik, S. Ferrier, A. Guisan, R. J. Hijmans, F. Huettmann, J. R. Leathwick, A. Lehmann, J. Li, L. Lohmann, B. A. Loiselle, G. Manin, C. Moritz, M. Nakamura, Y. Nakazawa, M. Overton, A. T. Peterson, S. J. Phillips, K. S. Richardson, R. E. Scachetti-Prereira, J. Soberon, S. Williams, M. S. Wisz & N. E. Zimmermann. 2006.** Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29: 129–151.
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E. & Yates, C.J. (2010)** A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17: 43–57.
- ESRI. 1999.** ArcView GIS 3.2. ESRI, Redlands, California.
- Feria, A. T. P., B. Loiselle, J. Muñoz, D. Espinosa, J. M. Dale & R. G. Mateo. In prev.** Predicting species distributions: the influence of environmental variables, taxa and range size on model accuracy. *Ecography*.
- Fielding, H. A. & J. F. Bell. 1997.** A review of methods for the assessment of predictions errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation* 24: 38–49.
- Forister M. L., A. C. McCall, N. J. Sanders, J. A. Fordyce, J. H. Thorne, J. O'Brien, D. P. Waetjen and A. M. Shapiro. 2010.** Compounded effects of climate change and habitat alteration shift patterns of butterfly diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1–5 pp.
- Guisan, A. N. & E. Zimmermann. 2000.** Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135: 147–186.
- Hernández, P. A., C. H. Graham, L. L. Master & D. L. Albert. 2006.** The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography*, 29, 773–785.
- Hijmans, R. J., S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones & A. Jarvis. 2005.** Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25, 1965–1978.
- Hill, J. K., Thomas, C.D., & Huntley, B. 1999.** Climate & habitat availability determine 20th century changes in a butterfly's range margin. *Proceeding of the Royal Society of London* 266, 1197–1206.
- Hinojosa-Díaz, I., T. P. Feria-Arroyo & M. S. Engel. 2009.** Potential distribution of orchid bees outside their native range: The cases of *Eulaema polychrome* (Mocsáry) and *Euglossa viridissima* Friese in the USA (Hymenoptera: Apidae). *Diversity and Distributions* 15: 421–428.
- IPCC. 2000.** Intergovernmental Panel on Climate Change. In: IPCC Summary for Policymakers. Emissions scenarios. A special report for IPCC Working group III. Published for Intergovernmental Panel on Climate Change. 21 pp.
- IPCC. 2001.** Intergovernmental Panel on Climate Change. In: H. T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden & D. Xiaosu (Eds.) *Climate Change 2001: The Scientific*

Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Kadmon, R., O. Farber & A. Danin. 2003. A systematic analysis of factors affecting the performance of climatic envelope models. *Ecological Applications* 13, 853-867.

Kearney, M. 2006. Habitat, environment & niche: what are we modelling? *OIKOS* 115, 186-191.

Llorente, J.B. 1984. Sinopsis sistemática y biogeográfica de los Dismorphiinae de México, con especial referencia del género *Enantia* Huebner (Lepidoptera: Pieridae). *Folia Entomológica Mexicana* 58: 1-207.

Llorente, J.B., L. Oñate, A. M. Luis & I. Vargas. 1997. Papilionidae y Pieridae de México: Distribución geográfica e ilustración. UNAM. México, D.F., 225 p.

Luis, M.A., J. Llorente & I. Vargas. 2005. Una megabase de datos de mariposas de México y la regionalización biogeográfica. Pp 269=294. En: Llorente, J. y J.J. Morrone (Eds.). *Regionalización biogeográfica en Iberoamérica y tópicos afines: Primeras Jornadas Biogeográficas RIBES*. Las Pressas Ciencias, Fac. Ciencias, UNAM. México, D.F.

Mitikka, V., R. K. Heikkinen, M. Luoto, M. B. Araújo, K. Saarinen, J. Poyry & S. Fronzek. 2008. Predicting range expansion of the map butterfly in Northern Europe using bioclimatic models. *Biodiversity & Conservation*. 17:623-641.

Parmesan, C. & G. Yohe. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421: 37- 42.

Pearson, R. & T. Dawson. 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimatic envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography* 12:361-371.

Phillips, S. J. 2006. *Maxent software for species habitat modeling*. Version 3.2.19. New Jersey: Princeton University. Available from: <<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>>

Phillips, S. J. 2008. Transferability, sample selection bias and background data in presence-only modelling: a response to Peterson et al. (2007). *Ecography* 31, 2008, pp 272-278.

Phillips, S.J., M. Dudík, R. E. Schapire. 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling. Pp. 655-662. In: Greiner R. & D. Schuurmans (ed.) *Proceedings of the 21st International Conference on Machine Learning*. ACM Press, New York

Phillips, S.J., R. P. Anderson & R. P. Schapire, 2006. Maximum entropy modelling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190, 231-259.

Pimm S.L. & P. Raven. 2000. Biodiversity: Extinction by numbers. *Nature* 403:843-845.

Pulliam, H. R. 2000. On the relationships between niche and distribution. *Ecology letters*. 3: 349-361.

Ramírez-Albores, J. E., F. Martínez V., J. Clemente Vásquez S. 2007. Listado avifaunístico de un matorral tamaulipeco del noreste de México. *Huitzil Revista de Ornitología Mexicana*. Vol 8, Núm 1. Consejo Internacional para la Preservación de las Aves, Xalapa, Veacruz, México. Pp. 1-10.

Root, T., J. T. Price, K. R. Hall, S. Schneider, C. Rosenzweig & J. A. Pounds. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals & plants. *Nature* 421:57-60

Root, T., J. T. Price, K. R. Hall, S. Schneider, C. Rosenzweig & J. A. Pounds. 2005. *The Impact of Climatic Change on Wild Animals & Plants: A Meta-Analysis USDA*. Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-191.

Salinas-Gutiérrez, J. L., C. Méndez, M. Barrios, C. Pozo & J. Llorente. 2009. Hacia una síntesis de los Papilionoidea (Insecta: Lepidoptera) de Guatemala y una reseña histórica. *Caldasia*. 31(2): 407-440.

Sanderson E. W., M. Jaiteh, M. A. Levy, K. H. Redford, A. V. Wabbebo & G. Woolmer. 2002. The Human Footprint and the Last of the Wild. *BioScience*, 52(10):891.

Sinervo, B., F. Méndez de la Cruz, D. B. Miles, B. Heulin, E. Bastiaans, M. Villagrán-Santa Cruz, R. Lara-Resendiz, N. Martínez-Méndez, M. L. Calderón-Espinosa, R. N. Meza-Lázaro, H. Gadsden, L. J. Avila, M. Morando, I. J. De La Riva, P. Victoriano Sepulveda, C. F. Duarte Rocha, N. Ibargüengoytia, C. Aguilar Puntriano, M. Massot, V. Lepetz, T. A. Oksanen, D. G. Chapple, A. M. Bauer, W. R. Branch, J. Clobert & J. W. Sites, Jr. 2010. Erosion of Lizard Diversity by Climate Change and Altered Thermal Niches. *Science*. 328 (5980):894-899.

Soberón, J. & A. T. Peterson. 2005. Interpretation of Models of Fundamental Ecological Niches and Species' Distributional Areas. *Biodiversity Informatics* 2: 1-10.

Soulé, M. E., & M. A. Sanjayan. 1998. Conservation targets: do they help? *Science* 279:2060-2061.

Thomas, C. D., E. J. Bodsworth, R. J. Wilson, A. D. Simmons, Z. G. Davies, M. Musche, L. Conradt. 2001. Ecological & evolutionary processes at expanding range margins. *Nature* 411:577-581.

Thomas J. A., M. G. Telfer, D. B. Roy, C. D. Preston, J. J. D. Greenwood, J. Asher, R. Fox, R. T. Clarke & J. H. Lawton. 2004. Comparative losses of British butterflies, birds, & plants & the global extinction crisis. *Science*. 303:1879-1881.

Udvardy, M. D. F. 1969. Dynamic Zoogeography with Special Reference to Land Animals. Van. Nostrand Reinhold, New York, 445 pp. *Systematic Zoology*. 30(4), 1981, pp.

* ILLUSTRACIONES



Ilustración 1. Distribución espacial de las estaciones meteorológicas usadas para interpolar las superficies de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación.

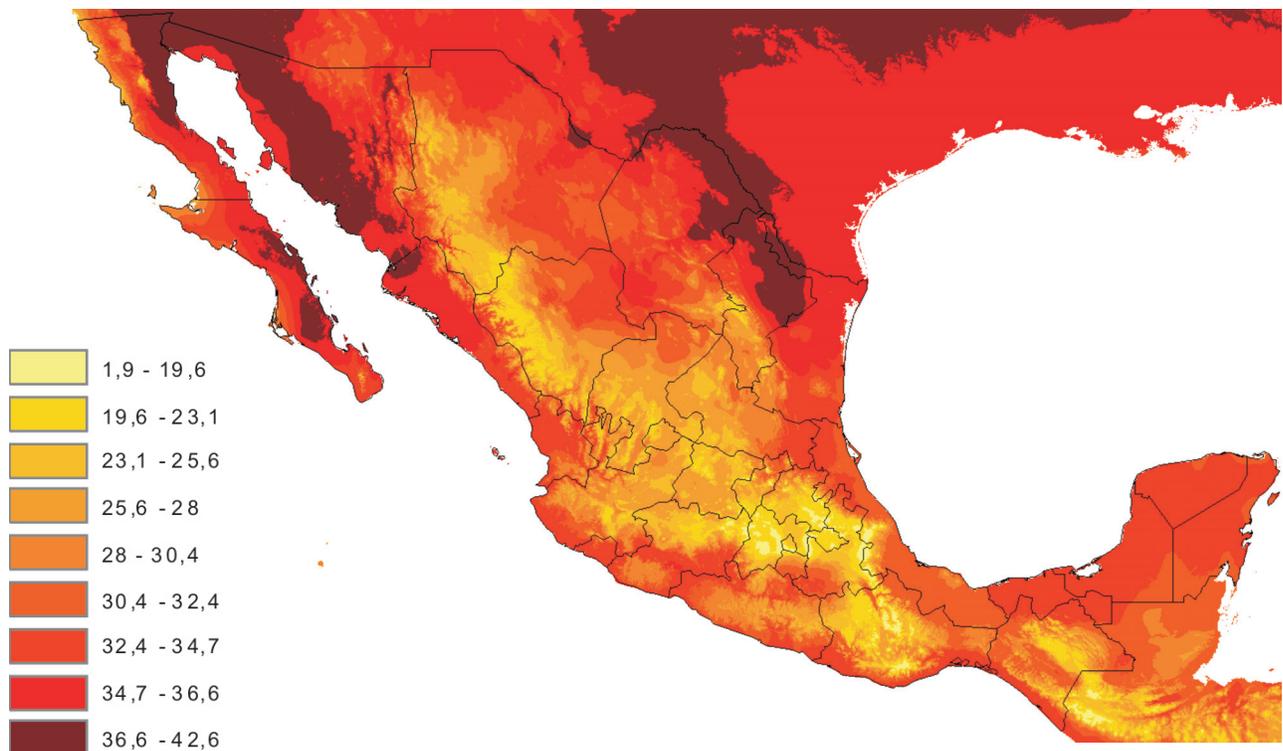


Ilustración 2. Temperatura máxima promedio del mes de julio, valores en grados Celsius

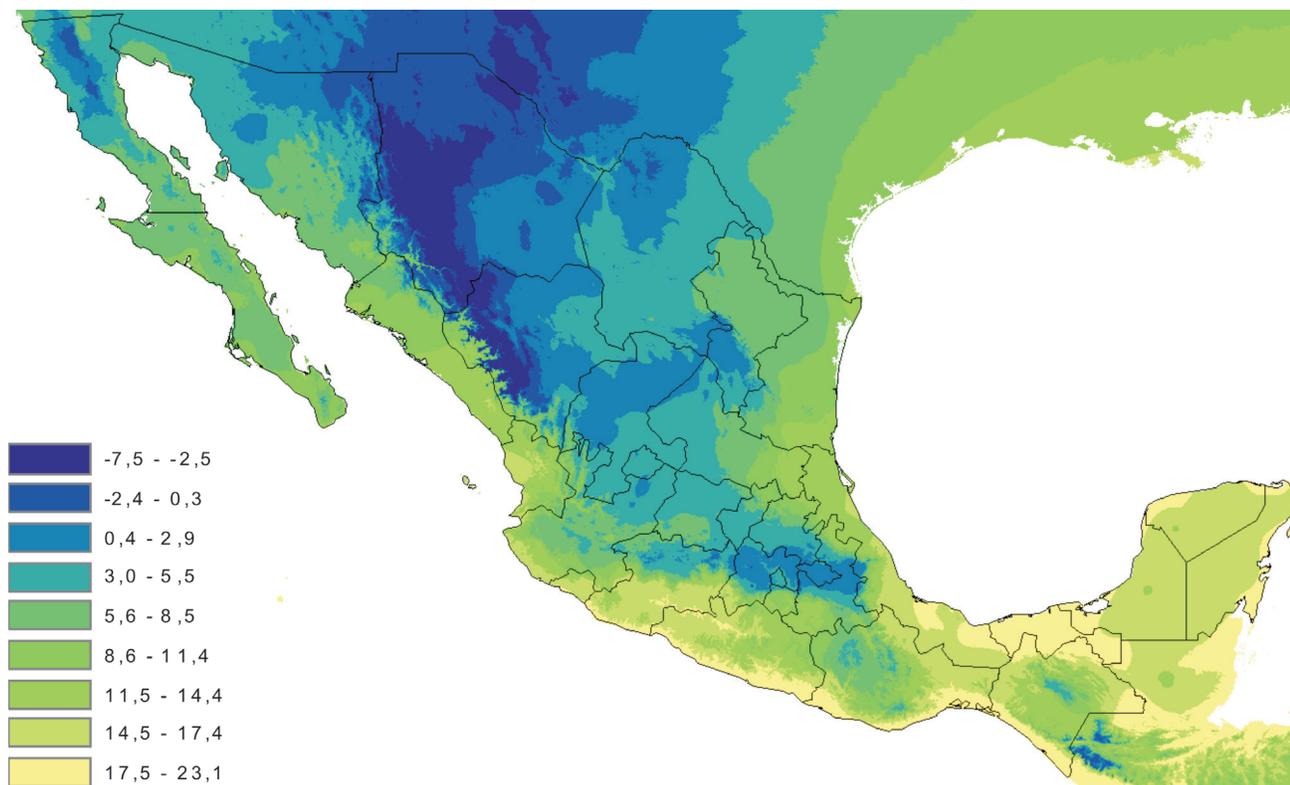


Ilustración 3. Temperatura mínima promedio del mes de enero, valores en grados Celsius.

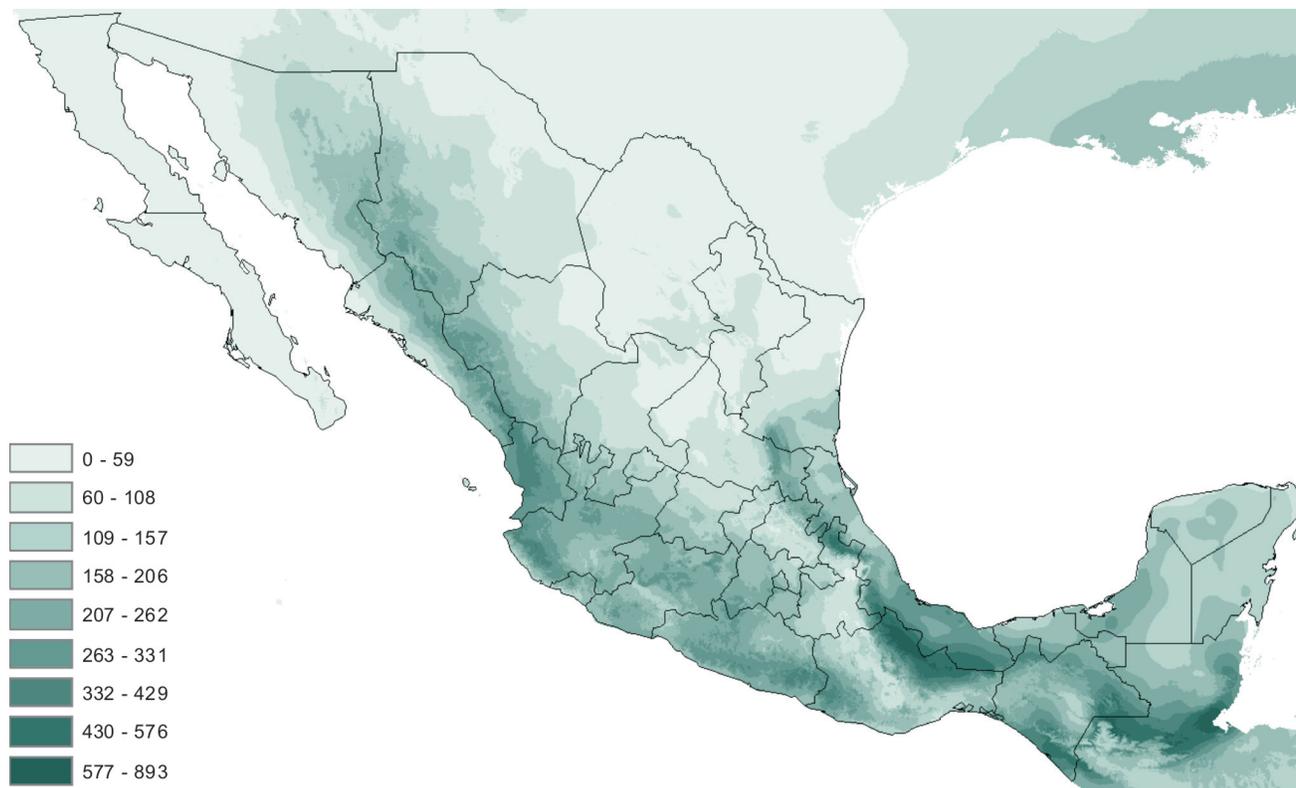


Ilustración 4. Precipitación promedio mensual del mes de julio, valores en mm.

Ilustración 5. Escenarios regionales de cambios en la temperatura para el sureste de México basados en el modelo japonés (MRI) para el escenario a) A1B para 2030 b) A1B para 2050 c) A1B para 2080 d) A2 para 2030 e) A2 para 2050 y f) A2 para 2080 (Magaña y Méndez).

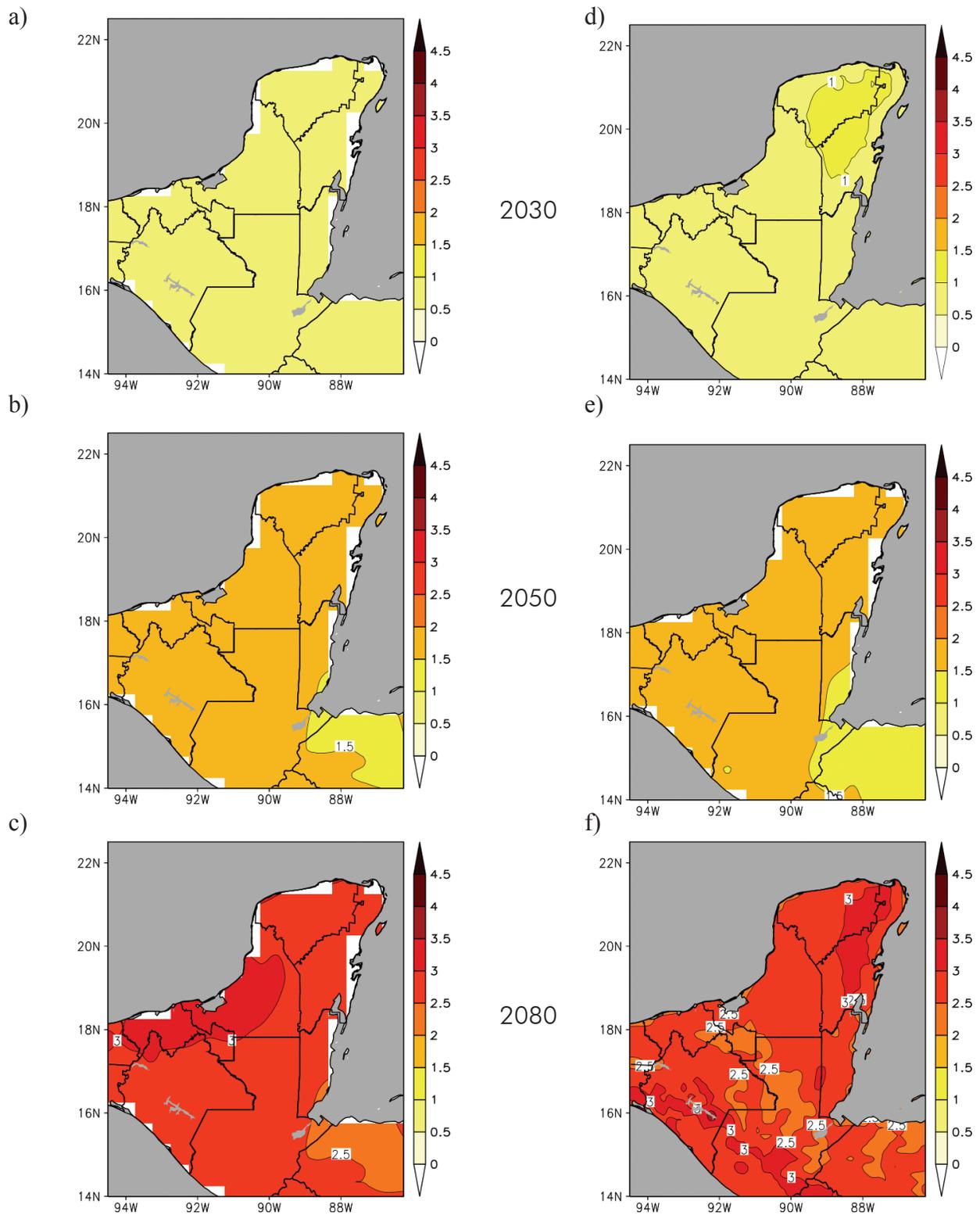
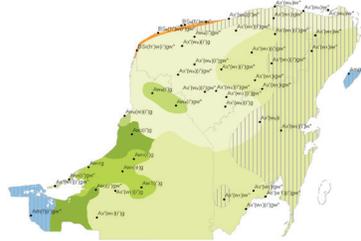


Ilustración 6. Análisis climático de la Península de Yucatán donde se compara un escenario base (el presente) con respecto a dos familias de escenarios A) escenarios que asumen que las condiciones al futuro no contemplan mitigación en los gases de invernadero y B) Escenarios que si contemplan que se mitigara el efecto de los gases de invernadero.

ESCENARIO BASE 1961 - 1990



ESCENARIOS DE LA FAMILIA A



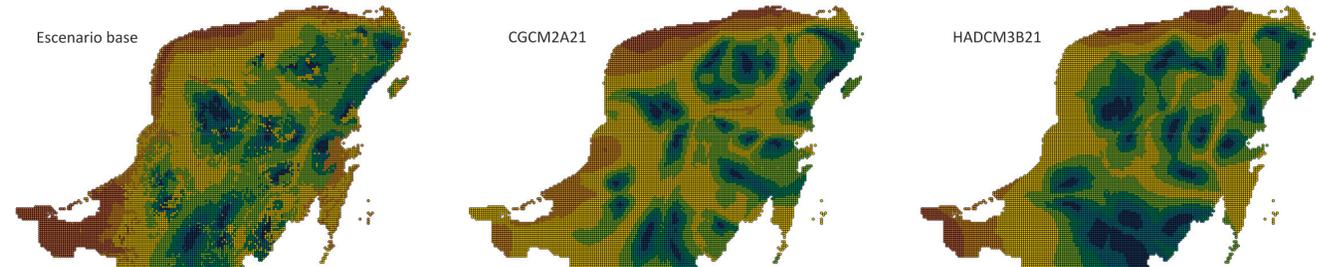
ESCENARIOS DE LA FAMILIA B



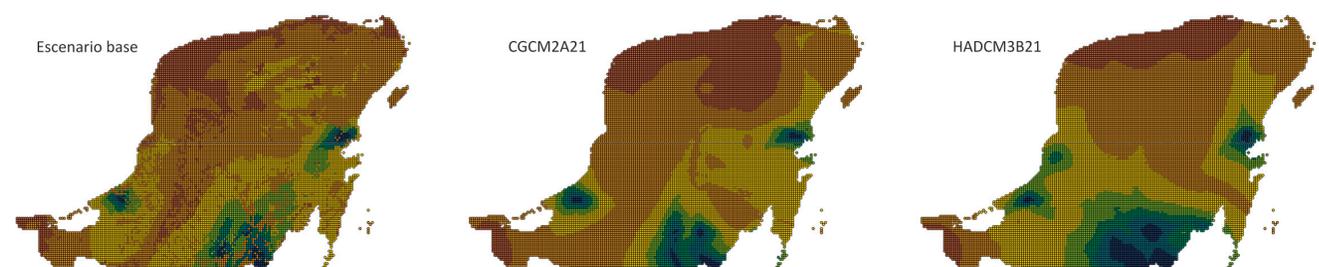
Tipos de clima ■ BSs ■ BSr ■ Aw0 ■ Aw1 ■ Aw2 ■ Amiv* ■ Amw* ■ Am(f) Porcentaje de lluvia invernal <5 5-10.2 10.2-18

Ilustración 7. Distribución potencial de cuatro especies de palmas, bajo dos escenarios contrastantes, posibles al 2020 en la península de Yucatán.

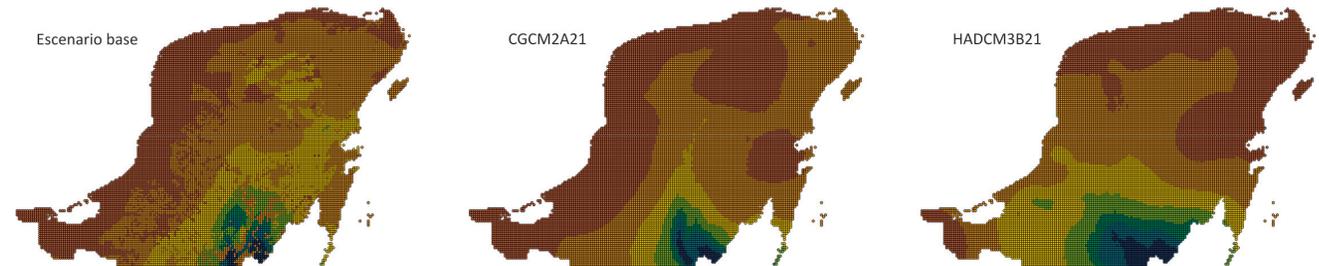
Chamaedorea seifrizii



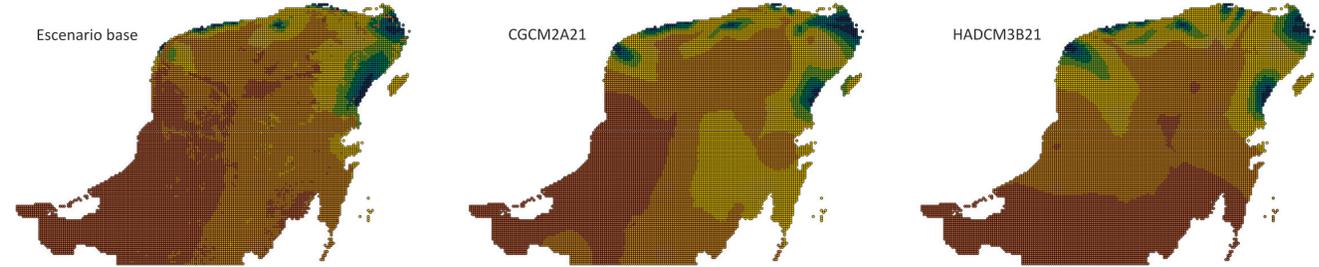
Chamaedorea oblongata



Gaussia maya



Coccothrinax readii



Valores de similitud: ● 0.5 - 0.8 ● 0.80001 - 0.9 ● 0.90001 - 0.95000 ● 0.950001 - 0.97000 ● 0.970001 - 0.98000 ● 0.980001 - 0.99000 ● 0.990001 - 1.00000

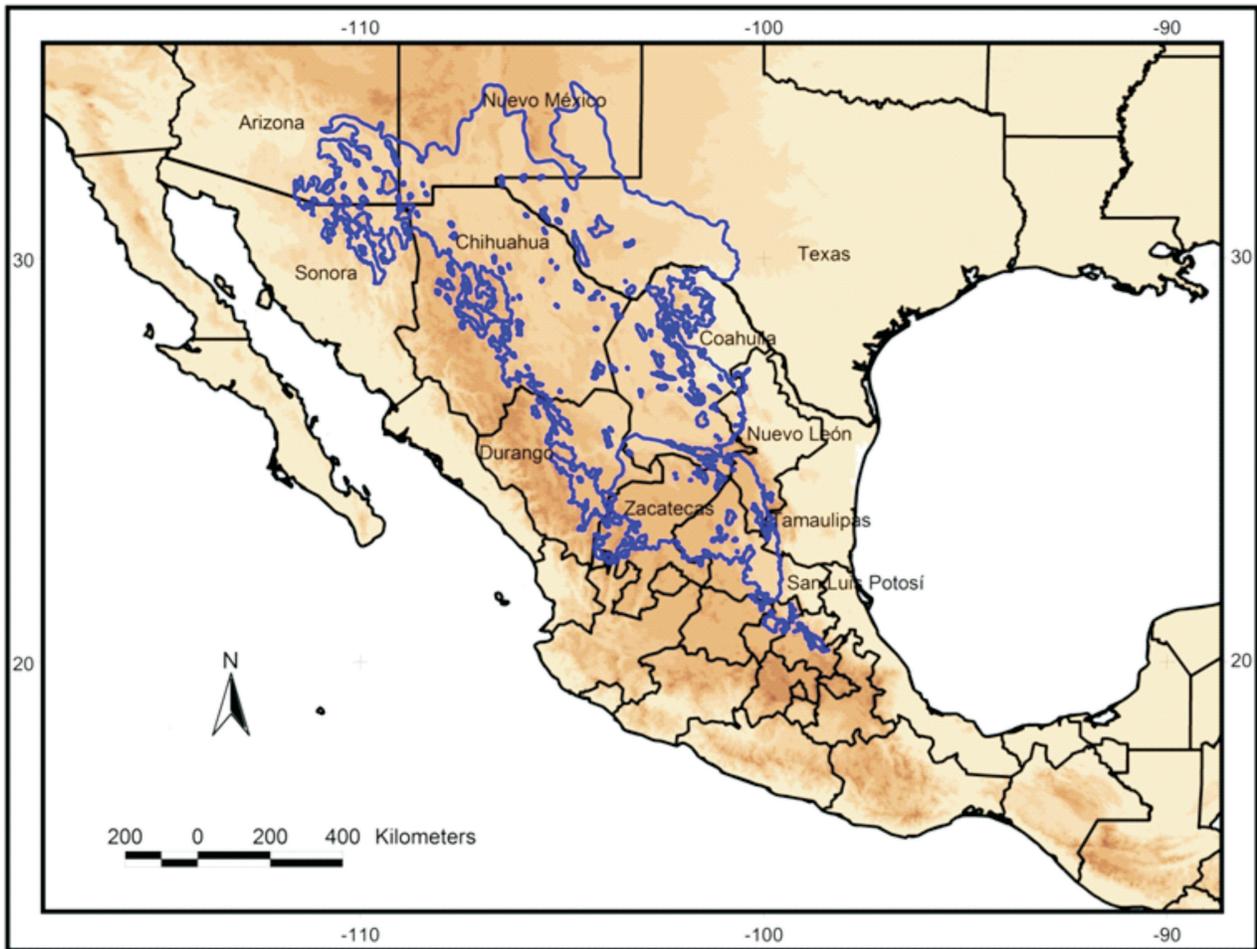


Ilustración 8.- Límites geográficos del Desierto Chihuahuense obtenidos a partir de las ecorregiones terrestres propuestas por Olson et al., (2001)

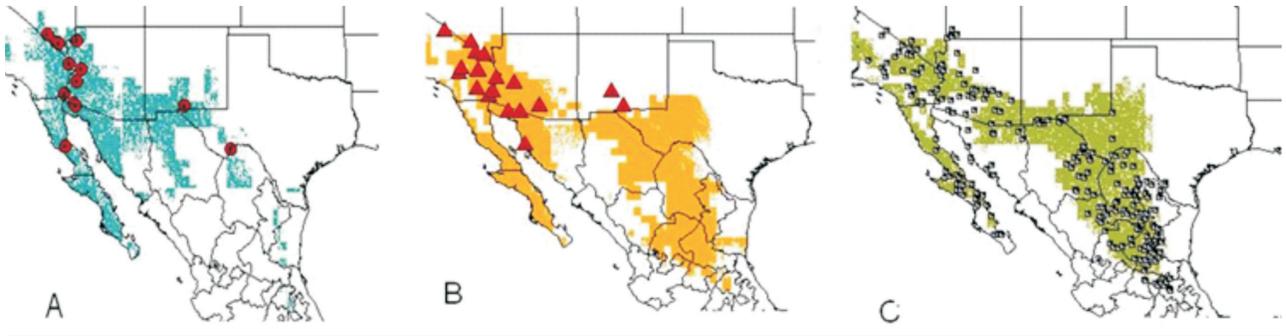


Ilustración 9.- Modelos de distribución potencial de *Larrea tridentata* para A) el Último Máximo Glacial (UMG, 21 mil años AP) generado a partir de localidades fósiles (círculos rojos) y coberturas ambientales del UMG. B) modelo para el Holoceno Medio (6 mil años) generado con localidades (triángulos) y coberturas ambientales de dicho periodo y C) modelo de distribución potencial para el presente obtenido a partir de localidades (cuadros) y coberturas ambientales actuales,

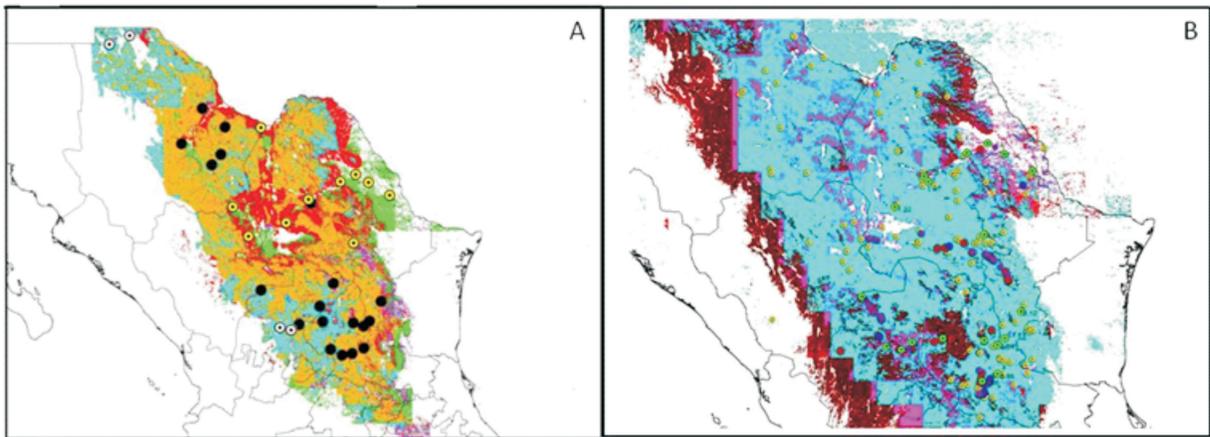


Ilustración 10.- Distribución potencial de *Larrea tridentata* en diferentes periodos de tiempo A) de 1901-1990, en color rosa la distribución potencial predicha para los años 1901-1930, en verde de 1931-1960, en rojo de 1961-1990, en color azul para el año 2010 y en naranja los sitios en donde se han mantenido las condiciones ambientales de 1901 a 2010. Se presentan las localidades de muestreo por categorías de condición del nicho, los círculos negros representan los sitios donde se han mantenido las condiciones de nicho, los amarillos donde se han perdido y los blancos donde han cambiado a favor del nicho de la especie. B) Modelo de distribución potencial para el presente. (En color rojo), para el año 2020 (color rosa) y 2050 (color azul)

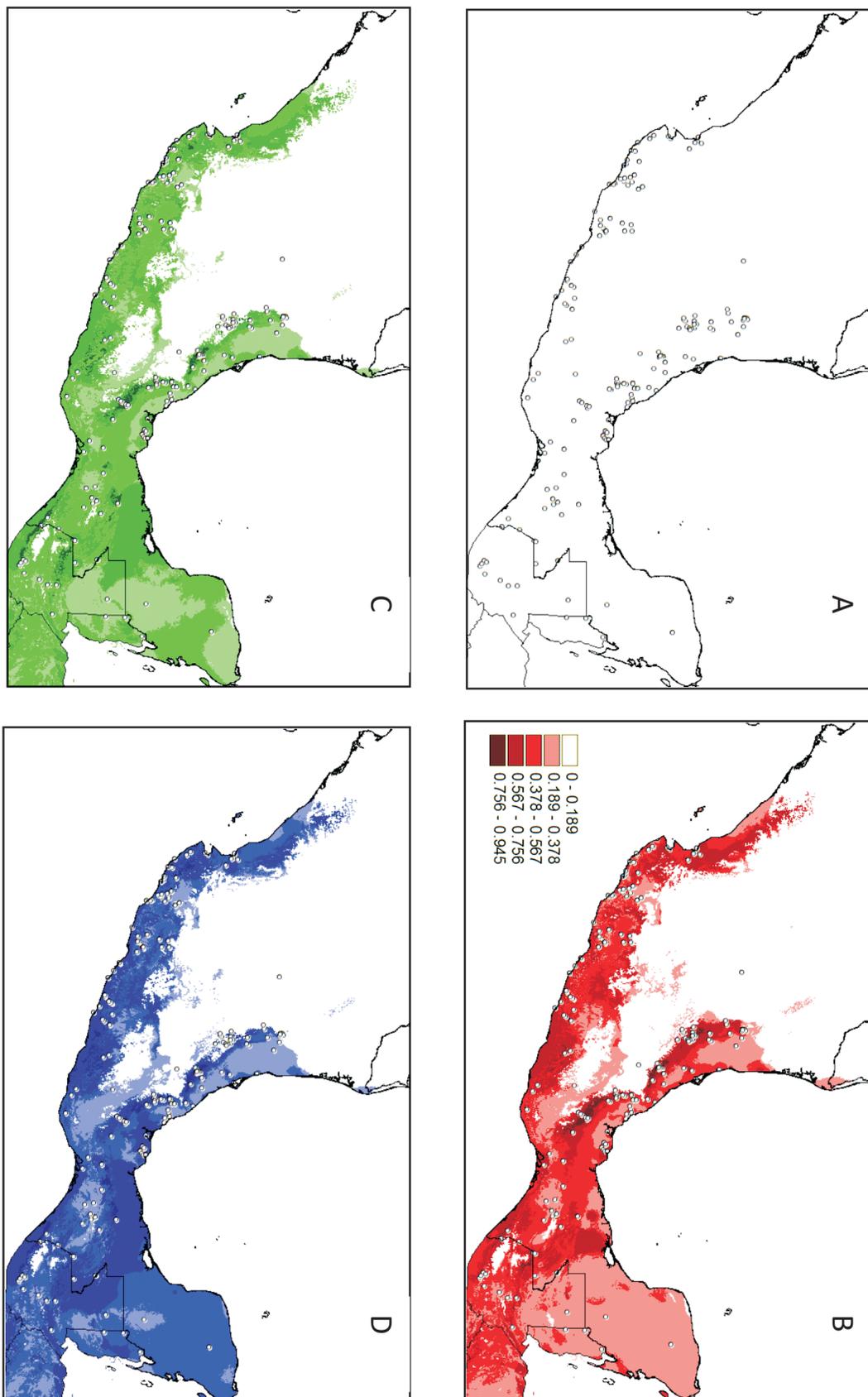


Ilustración 11 A, B y C. Distribución geográfica de *Perballia viardi viardi*: conocida (A); potencial actual (B); futura para el 2020 (C) y 2050 (D). Los círculos blancos corresponden a los datos históricos de distribución geográfica. La escala de colores indica la similitud entre los hábitats conocidos y potenciales, en donde la coloración más clara indica similitud más baja mientras la más oscura indica similitud del hábitat más alta.

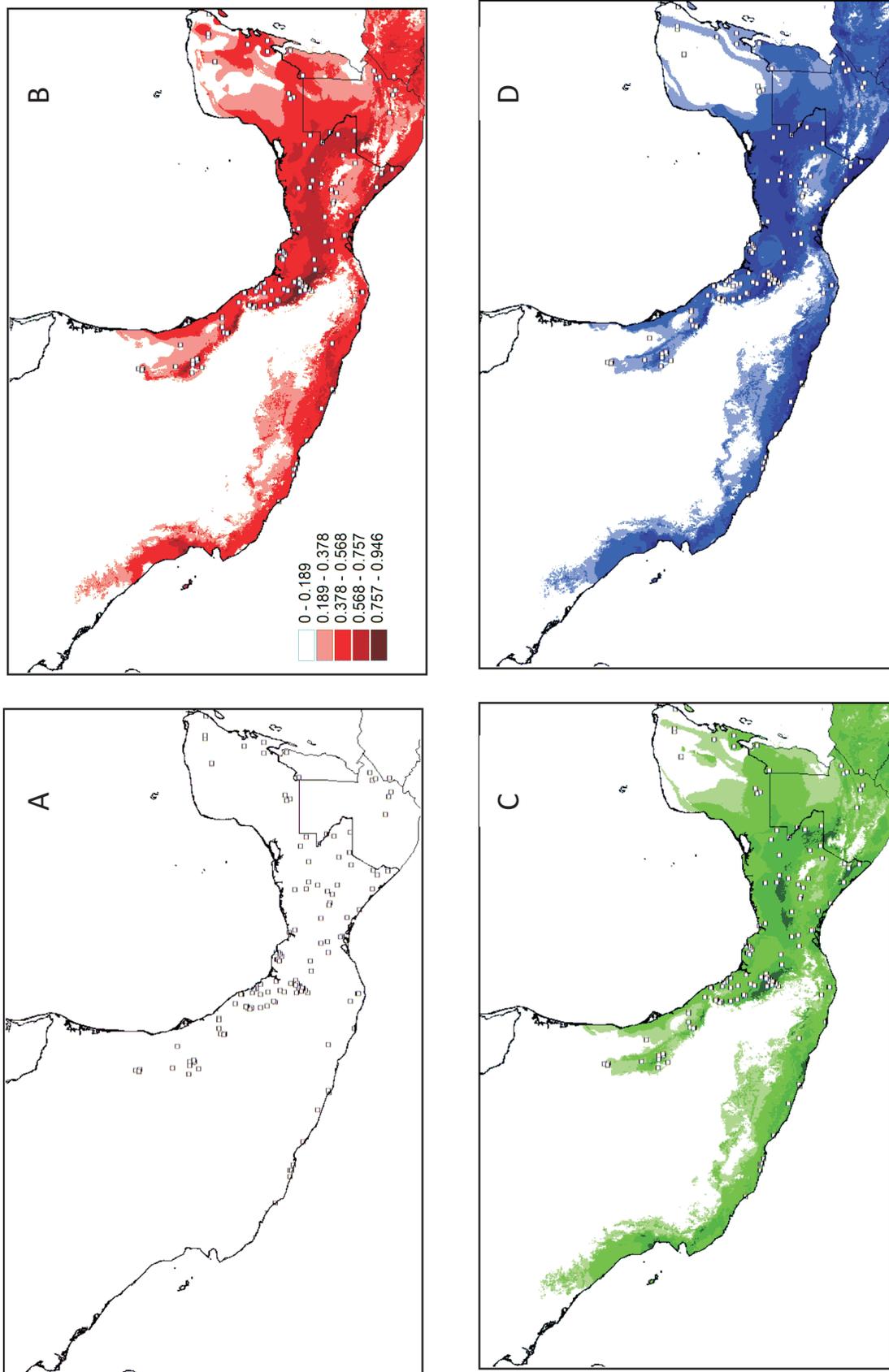


Ilustración 12.- Distribución geográfica de *Itaballia demophile* centralis: conocida (A); potencial actual (B); futura para el 2020 (C) y 2050 (D). Los cuadros blancos corresponden a los datos históricos de distribución geográfica. La escala de colores indica la similitud entre los hábitats conocidos y potenciales en donde la coloración más clara indica similitud más baja mientras la más oscura indica similitud del hábitat más alta.

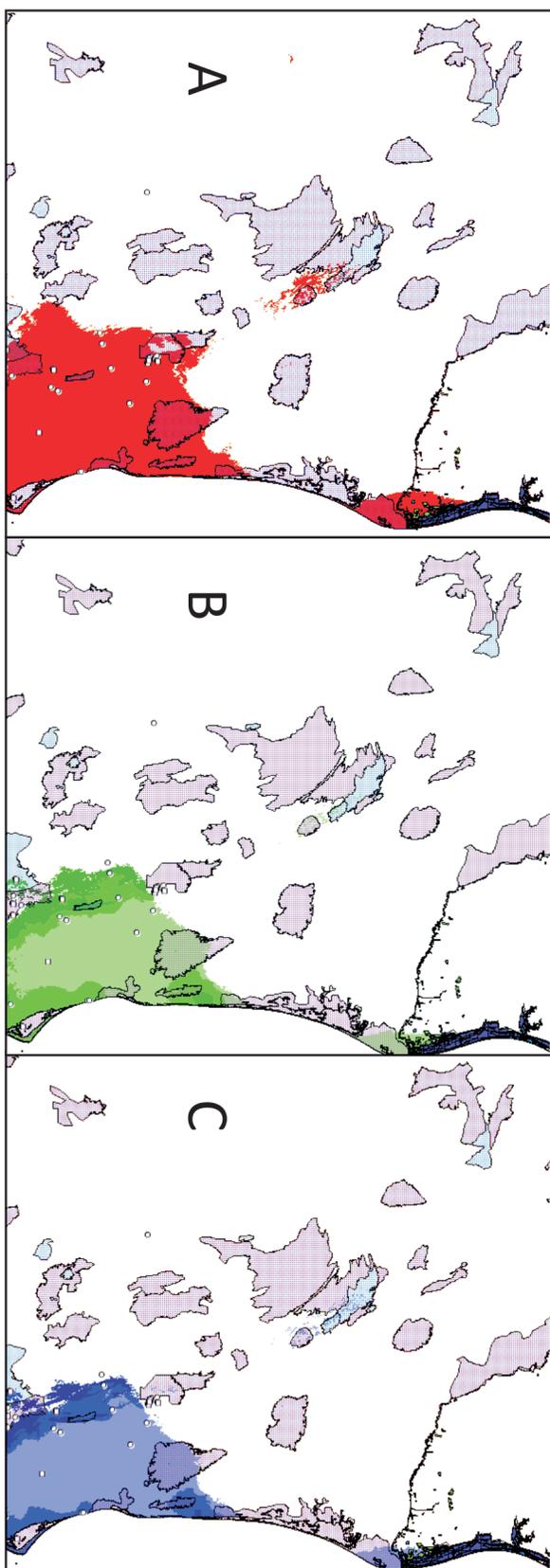


Ilustración 13.- Distribución potencial norteña de *Periballia viardi viardi* y áreas naturales conservadas actuales (A) y para los años 2020 (B) y (2050). Los polígonos azules representan las Áreas Naturales Protegidas. Los polígonos morados representan las Regiones Terrestres Prioritarias.

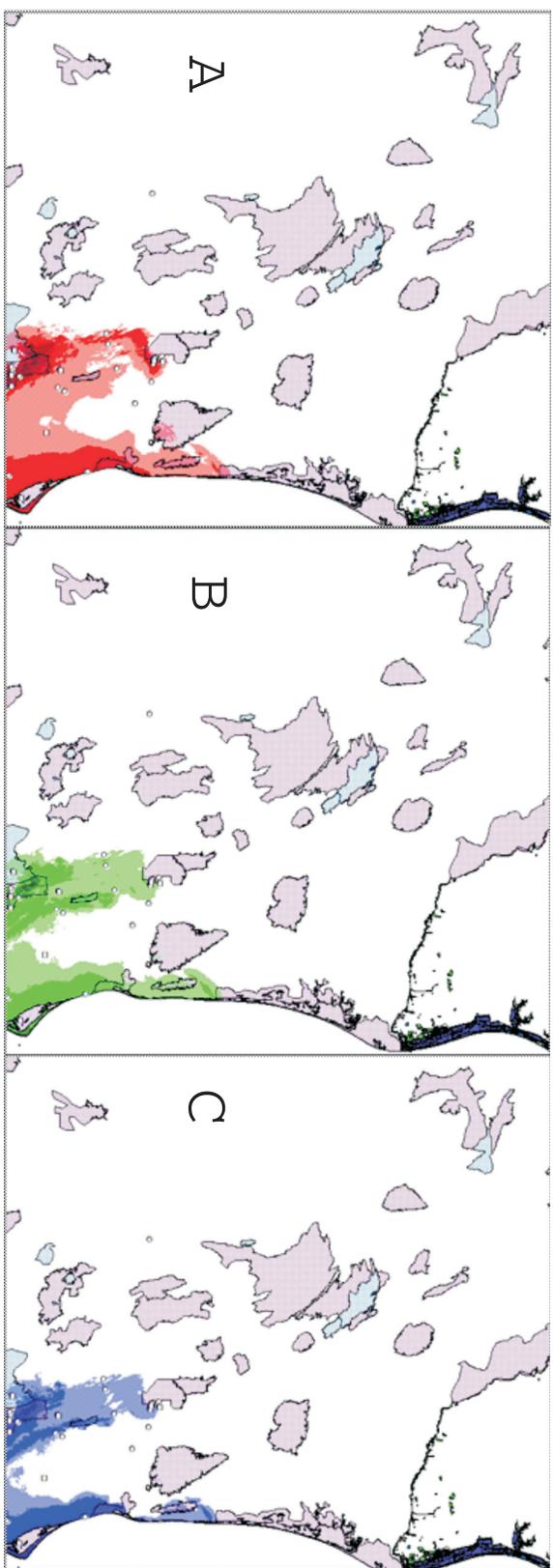


Ilustración 14. Distribución potencial norteña de *Habballia demophile centralis* y áreas naturales conservadas actuales (A) y para los años 2020 (B) y (2050). Los polígonos azules representan las Áreas Naturales Protegidas. Los polígonos morados representan las Regiones Terrestres Prioritarias.

CAMBIO CLIMÁTICO

Aproximaciones para el estudio de
su efecto sobre la biodiversidad

La edición consta de 500 ejemplares

