



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

Efecto del cambio y variabilidad climática en las poblaciones de oyamel en el
Sistema Volcánico Transversal

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
Gabriel Alexis Araiza Olivares

DIRECTORA DE TESIS
Dra. Guadalupe Rebeca Granados Ramírez
Instituto de Geografía, UNAM

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, noviembre de 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A mi familia, a quienes están y ya no están, porque con su apoyo y estímulo a lo largo de todo este tiempo me ha permitido alcanzar este nuevo logro.

A Diana por su apoyo, paciencia y cariño durante todos estos años y acompañarme en los distintos recorridos de campo durante esta investigación.

A mis amigos y compañeros del posgrado en geografía, cada uno de ellos me ayudó a abrir mi panorama y adquirir nuevos conocimientos.

A la Dra. Rebeca Granados por aceptar dirigir y revisar esta investigación, así como por sus atenciones y enseñanzas a lo largo de la maestría y de tiempo atrás.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por ser mi segunda casa. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para realizar mis estudios de posgrado.

A mí síndico, Dr. Juan Carlos Gómez Rojas por sus enseñanzas, consejos y observaciones; Dr. José Manuel Crespo Guerrero por las gratas experiencias vividas durante los trabajos de campo y por ayudarme a abrir mi perspectiva; a la Dra. Elda Luyando por aceptar formar parte del cuerpo revisor de este trabajo y sus atinadas observaciones; al Mtro. José Manuel Espinoza por estimular una visión más integral de la disciplina geográfica.

Í N D I C E

Introducción.....	1
Marco de Referencia.....	3
Capítulo 1. El Oyamel.....	10
1.1. Características, distribución, requerimientos ambientales e importancia ecológica, económica y cultural	10
1.2. Síndrome de declinación forestal.....	20
1.3. La mariposa monarca (<i>Danaus plexippus</i>)	23
Capítulo 2. Metodología y técnicas	31
2.1. Construcción del Modelo Base	31
2.2. Construcción de Escenarios de Cambio Climático	42
Capítulo 3. Variabilidad y Cambio Climático.....	49
3.1. Oscilación del Sur.....	49
3.2. Oscilación Nor Atlántica.....	52
3.3. Análisis puntual de variabilidad climática.....	54
3.4. Cambio climático global y sus efectos en México.....	61
Capítulo 4. Resultados	67
Capítulo 5. Discusión.....	92
Capítulo 6. Conclusiones.....	94
Bibliografía	97

Introducción

La Tierra es un planeta dinámico en todas las partes que lo conforman, el clima no es la excepción, el cambio climático global no es en absoluto un fenómeno nuevo.

Los últimos dos millones de años se han caracterizado por la ocurrencia de periodos glaciares e interglaciares, lo que ha modificado significativamente tanto la flora como la fauna (Lozano, 2011).

La rapidez con la que actualmente ocurre el cambio climático global hace suponer que su origen no es natural, el IPCC tiene un 90 % de certidumbre en que la principal causa son las actividades humanas, principalmente la quema de combustibles fósiles, tales como el petróleo y el carbón -los cuales liberan gran cantidad de CO₂- entre otros gases, son los responsables del llamado calentamiento global (Becerra y Mance, 2009).

Esto representa un gran reto para los distintos ecosistemas del planeta que ven alteradas las condiciones ambientales de forma vertiginosa, limitando su capacidad de adaptación a las nuevas características del medio.

México no es la excepción, las características de su territorio como es el relieve, la continentalidad, la longitud, etc., le confiere una gran diversidad de climas, y ello contribuye a que sea megadiverso. Actualmente, se considera que ocupa la quinta posición mundial en diversidad de especies de plantas vasculares (más de 20 mil) (Llorente y Ocegueda, 2008).

El bosque de oyamel posee un nicho ecológico limitado, su desarrollo requiere condiciones de precipitación y temperatura concretos lo que convierte a este ecosistema en un sujeto vulnerable ante las variaciones del medio derivadas del cambio climático.

De ahí parte la importancia de conocer, de acuerdo con las proyecciones hechas en el largo plazo para México, los efectos que las nuevas condiciones ambientales podrían tener sobre la distribución de las poblaciones de oyamel en la región del central del Sistema Volcánico Transversal.

El oyamel (*Abies religiosa*) es una especie arbórea de gran importancia ecológica, cuya distribución es muy reducida y dispersa en el Sistema Volcánico Transversal al tener un nicho cuyas condiciones de temperatura y humedad son particulares.

Por tanto, se parte de la hipótesis en la que el cambio y variabilidad climática influirán negativamente en las condiciones de distribución, conservación y sobrevivencia de la especie.

Es por ello por lo que esta investigación se ha planteado como meta alcanzar los siguientes objetivos:

General:

Describir los probables efectos que el cambio y la variabilidad climática tendrían sobre las actuales poblaciones de *Abies religiosa* en la zona central del Sistema Volcánico Transversal mediante la aplicación de modelos de cambio climático y aportar información que ayude a formular acciones que coadyuven a la preservación de la especie y con ello al ecosistema que lo integra.

Particulares:

1. Describir de manera general al oyamel, así como al medio en el cual se establece.
2. Analizar los posibles efectos de la variabilidad climática sobre el área de estudio.
3. Generar una línea base con datos climatológicos entre los años 1950-2010.
4. Crear una malla de 30"x 30" con los distintos modelos de cambio climático a un horizonte a futuro lejano (2075-2099).
5. Construir una cartografía en la que se muestre el escenario actual y futuro.
6. Construir cartografía que señale sitios con el potencial de albergar al oyamel.

La estructura capitular propuesta es: Introducción; marco de referencia; el oyamel; metodología y técnicas; variabilidad y cambio climático; resultados; discusión; conclusiones.

Para alcanzar los objetivos, los métodos y técnicas se basaron en trabajo de gabinete, por un lado, consistente en revisión de textos e investigaciones de vanguardia sobre el oyamel, así como, sobre el tratamiento de los datos de las estaciones climatológicas disponibles y la generación de los modelos. Por otro lado, se complementó en la medida de lo posible, la información obtenida a través de la investigación documental a través de trabajo en campo, donde se pudieron obtener diversos datos como los rangos altitudinales, aspectos fenológicos, estado general del bosque y su gestión.

Marco de Referencia

Los bosques forman ecosistemas fundamentales para la biodiversidad del planeta, adicionalmente proporcionan una enorme cantidad de beneficios para los seres humanos y son llamados servicios ambientales.

Los servicios ambientales suministrados por los bosques según Pagiola, Landell-Mills *et al.* (2002) en Franquis e Infante (2003) pueden agruparse en tres categorías:

1. Protección de cuencas hidrográficas. Los bosques son reguladores de los flujos hidrológicos y disminución de sedimentación.
2. Conservación de la biodiversidad. Los bosques albergan parte importante de la biodiversidad mundial. Su pérdida constituye a su vez un daño a esta biodiversidad.
3. Secuestro de carbono. Los bosques son concentradores de carbono atmosférico.

Adicionalmente se pueden mencionar entre otras cosas, el que proveen de leña, madera, alimentos, plantas de uso medicinal, estabilización del clima y recreación (Franquis e Infante, 2003).

Es por esta gran cantidad de beneficios que aportan que cada día se ponga mayor atención en sus procesos y protección por parte, tanto de los gobiernos, organizaciones no gubernamentales, así como de la sociedad a nivel mundial.

Los bosques han sido fuente de materias primas para la construcción, el transporte y las comunicaciones, así como fuente de alimentos y combustibles (FAO, 2012).

En el S. XVIII durante el llamado “despotismo ilustrado” que toma fuerza idea de conservar los bosques por la importancia para “procurar la higiene pública, regular el clima y beneficiar los cultivos” (Almazán, 2011:9 en Hernández y Hernández, 2015).

En la Nueva España se tenía la concepción de que los bosques no eran espacios intocables sino “recursos que había que aprovechar al mismo tiempo que se cuidaba su reproducción por medio de cortes adecuados y sistemas de reproducción de arbolados” y que los únicos capacitados para ello eran los ingenieros y no los indígenas y campesinos (Almazán 2011:10 en Hernández y Hernández, 2015).

Sin embargo, el resultado fue opuesto a lo que se buscaba; en el caso de Norteamérica entre 1607 y 1832 se dio una rápida y severa degradación, en la Nueva España para 1803, se había perdido una cuarta parte de los bosques existentes (Castañeda, 2006), ello derivó en la búsqueda de nuevos modelos para conservar los recursos naturales, lo que derivó en la creación de los parques nacionales.

El primero en ser declarado fue Yellowstone, en los Estados Unidos en el año 1872, y que constituye un hito para la conservación de espacios naturales y cuyo objetivo principal era la preservación de sus paisajes para el público, así como proteger la vida silvestre y regular la caza (Diegues, 1996; Costa, 2002 en Bahia *et al.*, 2013; Yellowston net, 2002a; Yellowston net, 2002b en Sánchez *et al.*, 2003).

En México, poco tiempo después, en 1876, se decide proteger el bosque del Desierto de los Leones, declarándose como Reserva Nacional Forestal con la intención de proteger las fuentes de agua existentes y que servían para el abastecimiento de la Ciudad de México y para 1917 se declara como Parque Nacional (CONANP, 2001).

Uno de los personajes más eminentes en cuanto a la protección de los bosques fue Miguel Ángel de Quevedo (1862-1946); abogó por la creación de leyes que permitieran la regulación sobre la explotación de los bosques por parte de las comunidades rurales; reclamó una vigilancia más estricta y solicitó a la industria

maderera la modernización de sus equipos; sin embargo, se continuó con la política de exclusión a la economía forestal campesina en favor de la élite ilustrada (Boyer 2007; Vitz, 2012).

Para 1926, la Ley Forestal marcó el carácter comunal de los bosques, la explotación de los recursos debía ser realizada exclusivamente por parte de los ejidatarios; pero, la carencia de apoyo técnico y recursos hizo que estas actividades fracasaran y fuesen realizadas por las empresas paraestatales. Entre la década de 1940 y 1980, se otorgaron concesiones de explotación cuyas superficies eran en promedio de 400 mil ha. Y con vigencia de entre 25 y 60 años (FAO, S/A; Bray, 2011; Merino, 2004).

No fue hasta los años 80 en que la fallida estrategia de concesiones llevó a las comunidades a reclamar el derecho de explotación de los bosques. El resultado fue la conclusión y suspensión de las concesiones dotando de mecanismos jurídicos en favor del manejo y explotación de los bosques a las comunidades bajo el amparo de la Ley Forestal de 1986 (Merino, 2004).

Sin embargo, la creación de reservas de la biosfera trajo consigo diversas problemáticas respecto a la tenencia de la tierra. Ejemplo de ello es el caso de los bosques de oyamel en la hoy Reserva de la biosfera de la Mariposa Monarca, donde en 1986, la falta de consulta por parte del gobierno federal con las comunidades indígenas y ejidatarios se interpretó como una violación a sus derechos de propiedad, lo que derivó en una severa degradación de los bosques (López, 2013).

A fines de la década de los 80 y principios de los 90, el tema de la protección, no solo de los bosques, sino también del medio ambiente y la biodiversidad en general, tomó un papel más relevante en la agenda política internacional.

Las Cumbres de la Tierra marcan el cambio del paradigma de la conservación de la naturaleza. La primera de ellas se llevó a cabo en Estocolmo en 1972, donde se comienza a reconocer los derechos medioambientales de la sociedad y da lugar a la creación del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) (Fernández, 2003).

En 1983 se creó la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente en el seno de la Asamblea General de las Naciones Unidas. Para 1987 esta Comisión dio a conocer su primer informe “Nuestro futuro común” más conocido como Informe Brundtlan. El mensaje principal fue claro: No puede haber un crecimiento económico sin un medio ambiente sostenible y que la protección al medio ambiente se reconozca como el cimiento sobre el que se erige tanto el desarrollo económico, así como el social de largo plazo (Pardo, S/A).

En el marco de la Cumbre de la Tierra celebrada en Río de Janeiro en 1992, surgió la *Declaración autorizada, sin fuerza jurídica obligatoria, de principios para un consenso mundial respecto de la ordenación, la conservación y el desarrollo sostenible de los bosques de todo tipo*, más conocida como *Declaración de Principios de los bosques* la cual se conforma por 15 principios.

Estos principios hacen énfasis entre otras cosas en la soberanía de los estados para el uso racional de sus recursos naturales, así como el establecimiento de su propia política ambiental tomando en consideración la no afectación al medio; el esfuerzo internacional en la protección del medio ambiente es vital y deberá ser equitativo; la planificación deberá ser parte fundamental en el desarrollo sostenible a fin de atender las necesidades de la sociedad, fortaleciendo las instituciones encargadas y los mecanismos ya existentes, se debe considerar y respetar a los pueblos indígenas y sus comunidades en donde sean incluidas y puedan desarrollarse a partir de los productos del bosque, tales como pueden ser las plantaciones forestales; todos los países del mundo, en especial los desarrollados, deberían adoptar medidas en pro de la reforestación, estas deben ser racionales y con una adecuada planificación territorial a fin de no perturbar el equilibrio ecológico; los esfuerzos por parte de los países en desarrollo debieran ser apoyados económicamente por los países desarrollados, y estos a su vez abordar los problemas que impiden la conservación y a la vez brindar opciones de desarrollo accesible a las comunidades locales, teniendo en cuenta las presiones y demandas ajenas al sector forestal; la accesibilidad a las fuentes de financiamiento que sirvan para la realización de ordenación y conservación sostenible de los bosques y se

incluyan tareas de forestación, reforestación y lucha contra la deforestación; los países en desarrollo incrementen su capacidad de ordenación, conservación y desarrollo de sus recursos forestales mediante el uso de tecnologías ecológicamente racionales en condiciones favorables acordes al plan 21; apoyo a las investigaciones científicas, los inventarios y las evaluaciones que consideren las variables involucradas así como el intercambio de información relativas a la ordenación de los bosques; el comercio de los productos forestales debe ser en un ambiente de no discriminación, procurando la eliminación de tarifas arancelarias e incorporando las políticas de conservación y de sostenibilidad a las políticas tanto económicas como de mercado con el fin de evitar la degradación de los bosques; la prohibición de prácticas unilaterales que resulten incompatibles en materia de comercio internacional de maderas con la ordenación sostenible de los bosques; deberán controlarse los contaminantes en el aire que puedan mermar el bienestar de los bosques en los distintos niveles, local, nacional, regional y mundial.

Paralelamente, en 1988, México publica en el Diario Oficial de la Federación, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA). Esta Ley establece los lineamientos para: *definir los principios de la política ambiental y los instrumentos para su aplicación...; la preservación, restauración y mejoramiento del ambiente...; la protección de la biodiversidad...; el aprovechamiento sustentable la preservación y, en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas...; Garantizar la participación corresponsable de las personas, en forma individual o colectiva, en la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.*(LGEEPA, 1988).

En México, la política en materia forestal actualmente queda establecida por la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable vigente desde 2003 (DOF, 2017). Su objetivo es la regulación, la conservación, la protección, la restauración, la producción, la ordenación, el cultivo y el manejo de ecosistemas forestales con el fin de propiciar un desarrollo sustentable. Sus objetivos generales son:

1. Contribuir al desarrollo social, ecológico y ambiental mediante el manejo sustentable de los recursos forestales.
2. Impulsar la silvicultura y aprovechamiento de los recursos que permitan elevar el nivel de vida de los mexicanos con énfasis en los propietarios y los pobladores forestales.
3. Desarrollar bienes y servicios ambientales, así como proteger, mantener y aumentar la biodiversidad que brindan los recursos forestales.
4. Fortalecer las instituciones públicas en todos sus niveles para un desarrollo forestal sustentable.
5. Asegurar los derechos de uso y disfrute de los recursos forestales a las comunidades indígenas.

El uso de las nuevas tecnologías ha permitido un importante avance en cuanto a la conservación de los bosques. El uso de los sistemas de información geográfica, las fotografías aéreas, las imágenes de satélite etc. han significado una revolución en el estudio y monitoreo el territorio.

Según Buzai y Baxendale (2006) esta situación ha brindado un nuevo impulso a la disciplina geográfica que aporta sus conocimientos a la planificación espacial. Así mismo, los autores refieren dos etapas en la planificación espacial: la primera de ellas es la del *diagnóstico* y es en este punto donde interviene la Geografía; la segunda es la *propuesta*.

La etapa del diagnóstico hace uso de procedimientos técnico-científicos propios del análisis espacial que ayudan a interpretar la estructura actual del objeto en cuestión y sus tendencias futuras. La etapa de la propuesta, la cual busca alternativas para modificar la estructura y las tendencias del sistema con el objeto de encontrar soluciones resultado del reequilibrio territorial, el desarrollo regional, la compatibilidad de usos de suelo y la mejora en la calidad del ambiente (Salado, 2010 en Buzai y Baxendale, 2011).

De la mano de la evolución tecnológica y metodológica está la conceptual. Uno de los términos incorporados a las ciencias orientadas a los problemas ambientales es

el de *Nicho* el cual se refiere a la tendencia de las especies a permanecer sin cambio a lo largo del tiempo (Pearman *et al.*, 2008).

Relacionado con lo anterior, se tiene el concepto de área de distribución que debe considerarse como la fracción del espacio geográfico que queda definida por las interacciones con las especies en cuestión; así mismo, el espacio geográfico no se reduce meramente al soporte físico, sino que se constituye como el elemento de un sistema cuyas partes se ajustan y modifican mutuamente (Zonino y Zullini, 2003).

Los cambios en variables como la humedad o la temperatura o en las interacciones bióticas, aunque estos sean pequeños, pueden provocar modificaciones importantes, por ejemplo, en la tasa de reproducción, en condiciones favorables la población tiende a incrementarse y caso contrario, reducirse, por ello, es importante la aplicación de modelos de distribución de especies (Zonino y Zullini, 2003; Davis *et al.*, 1998 en Pearman, 2003; Pearman *et al.*, 2008).

La geografía aporta sus conocimientos en la planificación y ordenamiento del territorio cuyo sustento se encuentra en distintas legislaciones, acuerdos, tratados, tanto a nivel mundial como nacional. El desarrollo de nuevas tecnologías ha permeado en las ciencias, lo que ha permitido una interrelación mucho más estrecha que en épocas precedentes con lo cual la disciplina geográfica ha enriquecido su lenguaje, metodologías potenciando sus alcances, en búsqueda de alternativas que ayuden a la resolución de problemas que afectan a la sociedad.

Capítulo 1. El Oyamel

Este capítulo está dividido en dos partes: La primera realiza una caracterización del oyamel y del ecosistema, su constitución, los umbrales ombrotérmicos en los que se desarrolla, la distribución e importancia de carácter ecológico, social y económico. Además, se trata el tema del síndrome de declinación forestal, cuyos efectos amenazan negativamente a los bosques de oyamel.

La segunda parte está dedicada a la mariposa monarca (*Danaus plexippus*) la cual se considera una especie emblemática y cuya travesía de miles de kilómetros a través de Norteamérica trasciende alrededor del mundo y está estrechamente vinculada al bosque de oyamel.

La información documental recabada se complementa con observaciones durante los recorridos de reconocimiento en campo realizados por distintas localidades con bosque de oyamel, ubicados dentro de áreas naturales protegidas federales. Se constataron aspectos tales como el rango de altitud de distribución, el estado general del bosque, así como el manejo que se tiene de los recursos.

1.1. Características, distribución, requerimientos ambientales e importancia ecológica, económica y cultural

El oyamel fue descrito por los naturalistas alemanes Carl Sigismund Kunth (1788-1850), Diederich Franz Leonhard von Schlechtendal Adelbert von Chamisso (1781-1838) y publicado en *Linnaea* 5:77, 1830 (The Plant List, 2012).

Recibe distintos nombres según la región del país en la que se encuentre; Oyamel en náhuatl en el centro de México; *acshoyatl* en Veracruz; *bansú* en lengua otomí; *ocopetla* en Hidalgo; *thúcum* en tarasco en los estados de Michoacán y Jalisco (Tivo e Iglesias, 2006; Sistema de Información para la Reforestación, S/A).

El oyamel es una conífera de hojas perennes y pertenece a la familia *Pinaceae*; es una especie endémica de México. Es un árbol monoico, es decir, las flores masculinas y femeninas se encuentran en un mismo tallo, comprende entre los 20 y los 40 metros de altura, aunque excepcionalmente hasta 60 metros; su diámetro puede llegar hasta 1.8 metros; sus ramas son extendidas o ligeramente

ascendentes dándole a la copa una forma cónica; las hojas presentan un ápice agudo de entre 20 y 30 milímetros; sus conos son solitarios de tonalidades violáceas, resinosos y cilíndricos, mientras que las semillas de tonos castaños son aladas y miden entre 9 y 10 milímetros (Sistema de Información para la Reforestación, S/A; Sánchez *et al.*, 2005; Rzdewoski, 2006, Martínez, 1953 en Benavides *et al.*, 2011) (figura 1.1.1).

La madera es de textura mediana de vetado suave, incoloro e insípido: la madera de la albura es amarilla con tintes castaños a diferencia del duramen que es de tonalidades rojizas (Ortega, 1962 en Castillo, 2011).

El árbol alcanza su madurez sexual entre los 21 y 25 años y la producción de semillas es bianual, el florecimiento se presenta durante el mes de diciembre, la fructificación ocurre entre los meses de noviembre y enero; la dispersión de las semillas se constata entre los meses de marzo y abril al igual que la polinización (Castillo, 2011; Dirección del PN Izta-Popo, 2014).

La fase de crecimiento comienza con la aparición de las yemas vegetativas, se logró registrar este desarrollo mediante observación directa en campo a inicios de la estación lluviosa del año en los meses de mayo y junio (figura 1.1.2).



Figura 1.1.1. Hojas y tallos de oyamel. Fuente: Trabajo de campo, noviembre 7, 2015, Araiza-Olivares.



Figura 1.1.2. Yemas vegetativas de oyamel. Fuente: Trabajo de campo, mayo 26, 2016, Araiza-Olivares

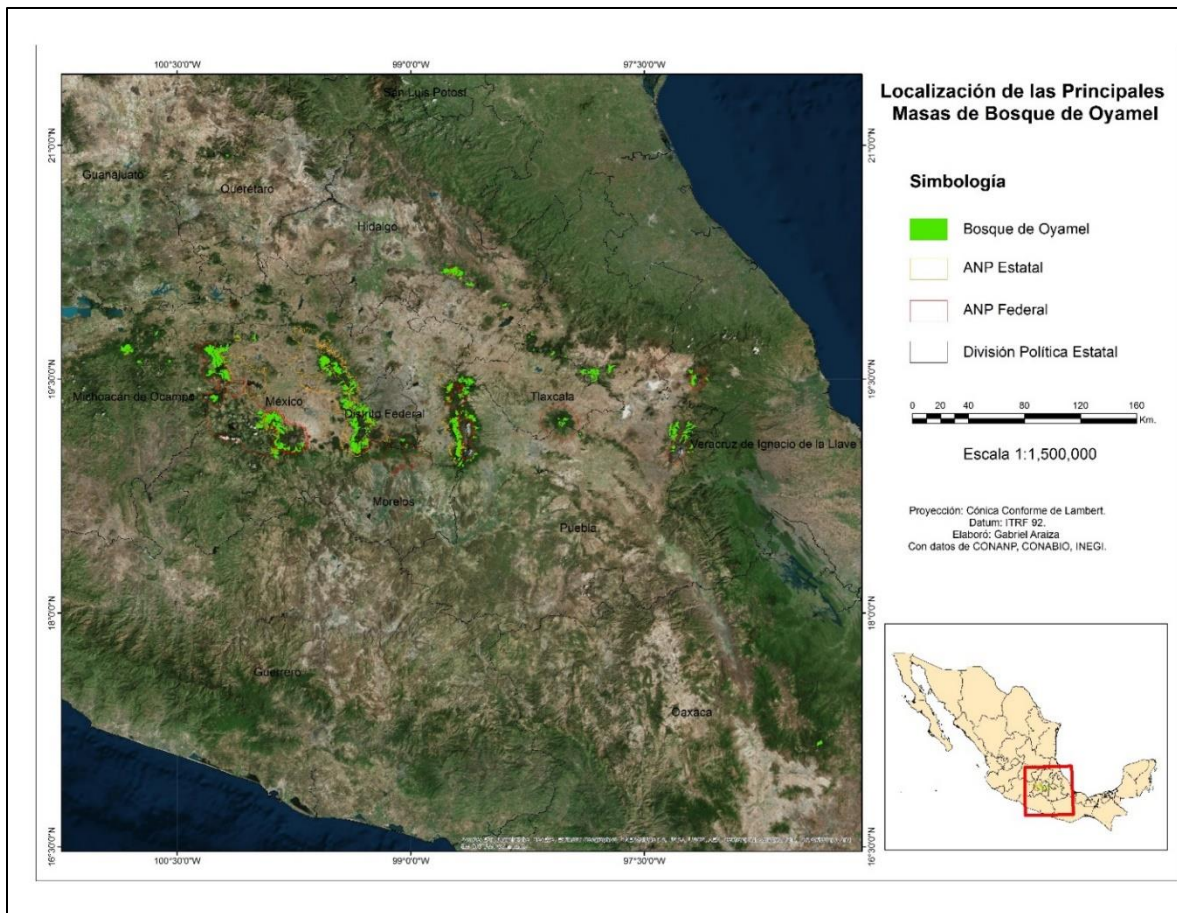
El bosque de oyamel se distribuye en sitios con condiciones muy específicas de temperatura y humedad, por lo que su extensión es significativamente limitada. Se les considera como bosques de relictos de la taiga que avanzaron de norte a sur durante periodos glaciales (Rzedowski y McVaugh, 1966 en Guerrero *et al.*, 2014).

La extensión total ocupada del bosque de oyamel se estima que es de entre 0.15 % al 0.16 % del territorio nacional (Leopold, 1950:509 y Flores *et al.*, 1971 en Rzedowski, 2006). En la serie V de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI (2015) el bosque de oyamel ocupa una superficie de 124323.2 hectáreas (mapa 1.1.1).

Se distribuye en manchones aislados que pueden ser puros o mezclados con *Pinus montezumae*, *Pinus hartwegii*, *Pinus ayacahuite*, *Pinus douglasiana*, *Pseudotsuga spp.*, *Cupressus lindleyi*, *Quercus spp.*, *Alnus spp.*, *Salix spp.*, *Arctostahyllos spp.*, y *Arbustus spp.* (Gómez-González, 2003 en Benavides *et al.*, 2011).

Las principales masas forestales de *Abies religiosa* se ubican en las montañas aledañas a la Cuenca de México, además se presentan en otros sitios del Sistema

Volcánico Transversal (SVT) en sitios como el Nevado de Toluca, Pico de Orizaba y Cofre de Perote.



Mapa 1.1.1. Distribución de las principales masas forestales de oyamel. Fuente: Araiza-Olivares con datos de CONANP, CONABIO e INEGI.

Los suelos en los que se ubica son de origen volcánico tales como andosol húmico, cambisol húmico, andosol ócrico, feozem háplico, andosol vítrico, entre otros; los suelos son usualmente profundos, pero también pueden presentarse en suelos someros, con abundante materia orgánica en las capas superficiales; el PH va de ligeramente ácido a neutro (entre 5 y 7) y textura limo-arcillosa, arcillo-arenosa y arenosa (Manzanilla, 1974; CONANP, 2006; Rzedowski, 2006 en Sistema de Información para la Reforestación, S/A).

El oyamel usualmente se localiza en zonas de laderas protegidas, tanto de la radiación solar como de los vientos y humedad alta, la precipitación apreciable se distribuye en al menos 100 días a lo largo del año (Rzedowski, 2006).

La altitud a la que se encuentran es variable según la fuente. Challenger (1998) señala que se pueden encontrar entre 2400 y 3600 msnm; Rzedowski (2006) fija la presencia de bosques de *Abies* en las sierras costeras de Jalisco hasta los 1500 msnm. Por su parte el Sistema de Información para la Reforestación (SIRE) (S/A) cita a Manzanilla (1974) quien establece un rango altitudinal que va de los 2800 a los 3500 msnm, Ramos *et al.* (2009) registra su presencia de los 2800 a los 3500 msnm.

Mendoza (2003) concentró las observaciones de los rangos altitudinales de distintos autores en diversos puntos donde se tiene la presencia de bosque de oyamel, lo anterior se muestra en la tabla 1.1.1.

Tabla 1.1.1. Rangos altitudinales de bosque de oyamel

Lugar	Altitud (msnm)	Autor
Norte de la Sierra Tarasca	2900-3000	Labat, 1996.
RB Mariposa Monarca	3100-3600	Pinto, 2000.
Temascaltepec	2800-3430	Alonso, 1993.
Sierra de Monte Bajo	3000	Orozco, 1995.
Sierra de Monte Alto	2800-3350	Madrigal, 1967; Osorio, 1984.
Ajusco	2940-3600	Madrigal, 1967; Nieto, 1987.
PN Lagunas de Zempoala	3200-3600	Silva, 1998.
Volcanes Tláloc y Pelado	2500-3660	Velásquez, 1993.
Popocatepetl	3150	Madrigal, 1967.
Iztaccíhuatl	2800-3600	May, 1971.
Cerro Tláloc	3100-3500	Sánchez, 2003.
PN La Malinche	2850-3350	Castillejos, 1992; Fernández, 1987.
PN Cofre de Perote	3000-3500	Narave, 1985.
PN Pico de Orizaba	2600-3200	Martínez y Pérez, 1988.
Sierra Tlaxco Tequesquitla	2800-3810	Castillejos, 1992; Madrigal, 1967.
Cerro Telapón	3420	Madrigal, 1967.
PN Zoquiapan	3200-3350	Zavala, 1984; Vega, 1982.
Calpulalpan	2600-3100	Madrigal, 1967; Castillejos 1999.
PN El Chico	2300-3000	Madrigal, 1967; Solano, 1998.

Fuente: Mendoza, 2003.

Durante los recorridos de reconocimiento, realizados entre diciembre de 2015 y febrero de 2017, por distintos puntos con bosques de oyamel se encontró que en el PN Desierto de los Leones (zona conocida como Valle de las Monjas colindante con el pueblo de San Mateo Tlaltenango), el límite inferior del bosque a los 2630 msnm hasta por encima de los 3000; en este mismo parque, en la zona cercana al pueblo de Santa Rosa Xochiac se halló a partir de los 2762 msnm; en el Parque Nacional Izta-Popo, desde los 2945 hasta los 3620 msnm; en el APFF Nevado de Toluca a partir de los 3272 hasta los 3546 msnm; en el santuario de la mariposa monarca de Piedra Herrada desde los 2700 hasta 3200 msnm.

Para los umbrales ombrotérmicos se consideraron como referencia principal a los establecidos por Díaz *et al.* (2011) (tabla 1.1.2) estas se retomaron para la clasificación hecha en el presente trabajo de investigación y cuyos resultados se encuentran incluidos dentro del capítulo 4.

Tabla 1.1.2. Umbrales Ombrotérmicos del oyamel.

Especie	Variable	Categoría			
		Adecuada	Moderadamente adecuada	Poco adecuada	No adecuada
<i>Abies religiosa</i>	Precipitación acumulada anual (mm)	1000-1800	800-1000 >1800	700-800	<700
	Temperatura Media Anual (°C)	8-14	7-8 14-16	6-7 16-20	<6 >20
	Temperatura del mes más frío (°C)	6-10	4-6 10-12	3-4 12-16	<3 >16
	Temperatura del mes más cálido (°C)	10-14	8-10 14-18	7-8 18-22	<7 >22
	Periodo seco (meses)	0-3	4	5-6	>7

Fuente: Díaz *et al.* (2011).

El bosque de oyamel posee una gran importancia ecológica pues sirve como hábitat en el que se desarrolla un buen número de organismos, por ello, puede considerarse que se trata de una especie sombrilla.

Las especies sombrilla son aquellas que, por sus características biológicas, su conservación, resultan en la protección de otras especies simpátricas de su mismo gremio, especies de niveles tróficos inferiores e incluso en los hábitats en donde se desarrollan (Berger, 1997; Roberger y Angelstam, 2004; Favreau *et al.*, 2006; Caro y O'Doherty, 1999 en Isasi, 2011; CONANP, 2009).

Son pocos los estudios enfocados a la riqueza biológica de los bosques de oyamel, principalmente se han orientado a la vegetación; en cuanto a la fauna, dichas investigaciones se han orientado a especies concretas, como la mariposa monarca.

Un análisis florístico de bosque de *Abies* en Juanacatlán, Mascota, Jalisco, encontró un total de 290 especies de plantas vasculares (Guerrero-Hernández *et al.*, 2014)., sin embargo, toma en consideración las especies del bosque mesófilo de montaña adyacente, por lo que no hay certeza de cuántas de estas especies corresponden únicamente al bosque de oyamel

Sanchez-González *et al.* (2005) proporciona un panorama más amplio al estudiar 12 localidades con presencia de bosque de oyamel dentro del Sistema Volcánico Transversal. El resultado arroja cifras totales de 510 especies de plantas agrupadas en 222 géneros y 76 familias. Sólo una pequeña parte, cerca del 8% de las especies, son comunes en las áreas analizadas.

Los bosques son ecosistemas que brindan importantes servicios ambientales, un ejemplo de lo anterior es que representan grandes sumideros de carbono. El CO₂ es parte fundamental del desarrollo de los árboles, constituye la estructura necesaria que permite la formación de ramas, follaje, raíces y fuste. Durante la etapa de crecimiento, el follaje, la altura y el grosor del tronco aumentan y se le conoce como carbono almacenado mientras constituye alguna parte del árbol hasta que este es enviado al suelo o atmósfera (Ordoñez. 1999 en PAOT, 2010).

El contenido de CO₂ almacenado en el bosque de oyamel del suelo de conservación de la Ciudad de México destaca como el mayor almacén de carbono de la vegetación estudiada. El resultado arrojó un promedio de 93.4129 ton/ha. con un

mínimo y máximo de 83.9729 y 102.8530 respectivamente de toneladas de carbono por hectárea (PAOT, 2010).

En el bosque de oyamel ubicado dentro del PN El Chico en Hidalgo, se estudió los niveles de carbono almacenado en los árboles, dividiendo las áreas de masa forestal en tres categorías, bosque conservado, bosque medianamente alterado y bosque alterado. Los resultados obtenidos encontraron que los bosques conservados fueron los que mostraron menor cantidad de carbono contenido (62.6 ton/ha.) en contraste con los bosques alterados que obtuvieron la cifra más alta con 166.6 ton/ha., por su parte, el medianamente alterado alcanzó una cifra de 138.6 ton/ha. (Razo-Zarate *et al.*, 2015).

Esta situación es atribuible a que los bosques bien conservados están sobre madurados y carentes de claros, la regeneración de la masa forestal resulta casi nula (figura 1.1.3); los bosques alterados que presentan una cantidad significativamente mayor de claros, derivados principalmente por la ocurrencia de incendios, lo que permite una entrada de luz solar al soto bosque, lo que ha favorecido su renovación natural, y una alta captura de carbono por la actividad fotosintética de los individuos jóvenes (figura 1.1.4) (Razo-Zarate *et al.*, 2015).



Figura 1.1.3. Sotobosque en el PN Desierto de los Leones. Fuente: Trabajo de campo, junio 3, 2016, Araiza-Olivares.



Figura. 1.1.4. Árboles jóvenes de oyamel en el APFF Nevado de Toluca. Fuente: Trabajo de campo, enero 28, 2017, Araiza-Olivares.

El bosque de oyamel tiene gran potencial económico. Se le ha utilizado para extraer productos maderables y no maderables; entre algunos de sus usos se encuentran el aprovechamiento de la celulosa para la fabricación de papel, resinas con las que se fabrican pinturas, limpiadores y jabones; su madera al ser suave no resulta adecuada para la construcción, pero es apreciada en ebanistería, leña y ornamental (Tivo e Iglesias, 2006).

La producción varía cada año tanto en valor como en volumen, sin presentar alguna tendencia identificable. Los anuarios estadísticos de producción forestal de SEMARNAT indican solo algunos productos maderables desglosados por género, mientras que los no maderables no tienen esta distinción, por lo que resulta difícil cuantificar el valor de estos productos para el caso específico del oyamel.

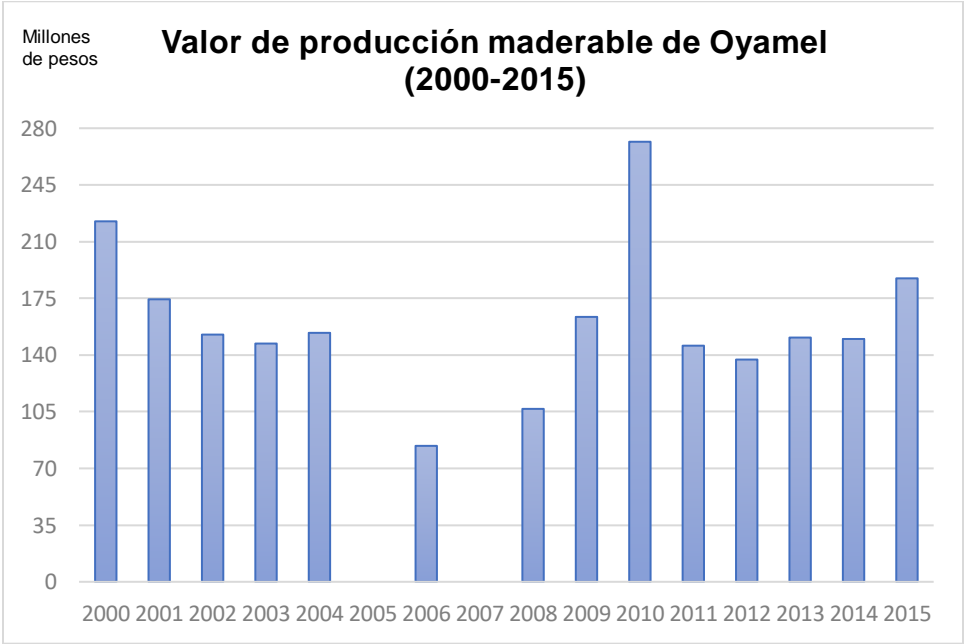
Los principales productos que se extraen del oyamel son escuadría, celulósicos, leña, postes, pilotes y morillos y en menor medida para la obtención de carbón.

Entre el año 2000 y 2015 el valor promedio de la producción fue de 160.5 millones de pesos y un volumen de más de 192 mil m³; los estados con mayor valor y

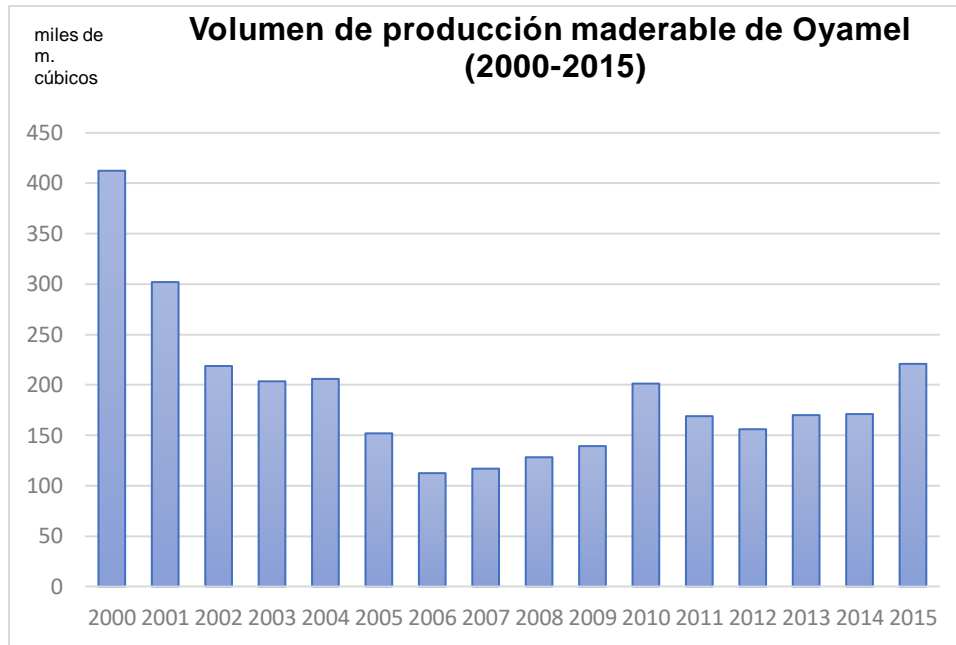
volumen de producción fueron el Estado de México, Puebla y Michoacán, que en su conjunto brindan cerca de la tercera parte de la obtención a nivel nacional.

Durante el mismo periodo, el valor de producción maderable de oyamel, el año 2010 presentó la cifra más alta con un valor superior a los 271 millones de pesos y un volumen de 201 270 m³. En contraste el año 2006, el valor de producción fue de 83.9 millones de pesos con un volumen de 112 418 m³. El año 2015 el valor de producción alcanzó 187.3 millones de pesos con un volumen de 220 824 m³. El volumen más alto se registró en el año 2000 con un total de 412 420 m³ (gráficas 1.1.1 y 1.1.2).

Es necesario señalar la falta de datos de valor de producción para los años 2005 y 2007 puesto que en estos años no se publicó el Anuario Estadístico Forestal correspondiente.



Gráfica 1.1.1. Valor de producción maderable de Oyamel (2000-2015). Fuente: Araiza-Olivares con datos de SEMARNAT.



Gráfica 1.1.2. Volumen de producción maderable de Oyamel (2000-2015). Fuente: Araiza-Olivares con datos de SEMARNAT.

1.2. Síndrome de declinación forestal

Uno de los fenómenos que han tomado notoriedad a nivel mundial y que afecta severamente a los bosques es la *declinación forestal*.

Durante la década de los ochenta del S. XX botánicos europeos advirtieron sobre una enfermedad que afecta a los árboles la cual produce clorosis, pigmentación café rojiza en el haz de las hojas de mayor edad, senescencia prematura, menor diámetro en el tronco y progresivo debilitamiento de los mismos hasta provocarles la muerte (Granados y López, 2001; Alvarado, De Bauer y Galindo, 1993; Hernández-Tejeda y De Bauer, 1984; Watmough y Hutchinson, 1999 en Castillo-Flores *et al.*, 2013).

El oyamel es una de las especies más afectadas por este fenómeno en los bosques del sur de la cuenca de México desde mediados de los años setenta (Alvarado-Rosales y Hernández-Tejeda, 2002; Alvarado *et al.*, 1992; Paz, 1989; Ciesla y Macías, 1987 en González-Medina *et al.*, 2010).

La declinación es definida como estrés ambiental; considera que el decaimiento es un complejo, con muchos de los tensionantes actuando de manera secuencial o colectivamente (Manion, 1981 y Kozlowski, 1979 en Granados-Sánchez y López-Ríos, 2001).

La contaminación del aire de la Ciudad de México se sospecha que causa la declinación del bosque ocurrida durante las últimas décadas. Los vientos se encargan de dispersarla a zonas aledañas a la ciudad, no obstante, hay carencia de datos sobre la cantidad de partículas depositadas y la distancia en la que se depositan (Castro *et al.*, 2007).

A partir de la década de 1970 el arbolado del PN Desierto de los Leones registró un menor crecimiento de sus anillos y para 1982 se detectó una fuerte declinación semejante a la del bosque del Ajusco y los Dinamos de Contreras (Alvarado, 1989 en Granados-Sánchez y López Ríos, 2001).

Se ha sospechado que el ozono troposférico (O_3) constituye uno de los principales contaminantes responsables de la pobre vitalidad y causante de la muerte masiva de oyamel; el O_3 ocasiona un aumento en los niveles de peróxido de hidrógeno y de fotooxidación. A pesar de ello, las evidencias parecen indicar que es circunstancial ya que explica el fenómeno en algunas zonas, pero no en todas (González-Medina *et al.*, 2010; Colbeck y MacKenzie, 1994; Innes, 1987 en Granados-Sánchez y López-Ríos, 2001; Granados-Sánchez y López-Ríos, 2001).

Otra de las posibles causas es la alta concentración de elementos potencialmente tóxicos en el suelo del bosque del PN Desierto de los Leones como el cadmio (Cd), plomo (Pb), níquel (Ni) y zinc (Zn). Los sitios donde se encontraron mayor cantidad de estos elementos coincidieron con los lugares donde se ha observado la mayor mortalidad de los árboles (Castro *et al.*, 2007).

Una serie de factores que pueden estar influyendo en la mortandad de árboles de los bosques de oyamel circundantes a la Ciudad de México adicionales a las ya mencionadas son la lluvia y la neblina ácida, los óxidos de azufre y el nitrógeno, el

exceso de nitrógeno, la deficiencia de nutrientes y los agentes patógenos (Granados-Sánchez y López-Ríos, 2001).

También deben considerarse los ataques de plagas y las enfermedades, los daños por vandalismo, el mal uso de los recursos, la creciente presión de visitantes aunado a la contaminación atmosférica proveniente de las urbes ha tenido efectos sinérgicos sobre los bosques de oyamel, extendiéndose en cadena hasta culminar en la presencia de cementerios o espacios de mortandad cuyas superficies van de 20 hasta 274 ha (figura 1.2.1) (Vázquez, 1995; Granados-Sánchez y López-Ríos, 2001).



Figura 1.2.1. Cementerio de árboles dentro del PN Desierto de los Leones. Fuente: Trabajo de campo, junio 3, 2016, Araiza-Olivares.

1.3. La mariposa monarca (*Danaus plexippus*)

El presente epígrafe busca resaltar la importancia del bosque y el nicho que ocupa dentro del ecosistema mediante un ejemplo concreto; la interacción existente entre el oyamel, como especie sombrilla, y la mariposa monarca, como especie emblemática, que si bien, son muchas las especies estrechamente relacionadas, el fenómeno de la migración e hibernación de la mariposa monarca destaca de entre ellas.

Conocer las características principales de la mariposa monarca y su asociación con el oyamel, puede resultar en una importante oportunidad para la protección de este último.

El reconocimiento y protección del fenómeno por instancias internacionales y nacionales, da cuenta de su importancia. Sin embargo, la alteración del ecosistema debido en parte al cambio climático puede poner en grave riesgo a esta especie.

La mariposa monarca (*Danaus plexippus*) ha tenido presencia simbólica; por ejemplo, en la cultura tarasca, se le asociaba con las almas de los difuntos que regresaban a visitar sus hogares; para los otomíes y mazahuas su llegada anunciaba la época para la cosecha de sus cultivos y en contraparte a su partida, marcaba la fecha para el inicio de las labores de siembra, costumbres que aún se mantienen vigentes en algunas regiones (CONANP, 2001).

La mariposa monarca pertenece al orden de los lepidópteros y se distribuye desde el norte de Canadá, Estados Unidos, México hasta Perú. La población tipo se encuentra en Pensilvania, Estados Unidos y fue descrita en 1758 por Karl Linneo (CONANP, 2001).

El ciclo de vida de la mariposa monarca se compone de a varias etapas y el tiempo de duración de cada una varía de acuerdo a la temperatura ambiente, cuanto más fría mayor será el lapso; 1) el huevo: cada hembra coloca entre 300 y 400 de ellos en plantas hospederas del género *Asclepias*, la eclosión sucede entre los 3 y 4 días; 2) la de larva u oruga: en esta fase se alimenta de las hojas de la planta hospedera

y a través de ella obtiene sustancias tóxicas que le sirven de defensa contra sus depredadores, en esta etapa muda cinco veces de piel denominados estados larvarios con una duración total de dos a tres semanas, una vez alcanzada la madurez, busca un sitio elevado y oculto para la transformación en crisálida; 3) la crisálida o pupa: se extiende entre nueve y quince días durante los cuales desarrolla alas, la mandíbula es sustituida por una estructura denominada espiritrompa, durante el último día como crisálida se logran observar los colores y estructuras características de la mariposa; 4) la adulta: es la de mariposa como tal, tiene una vida de entre cuatro y cinco semanas para las generaciones de primavera y verano, mientras que para las generaciones de invierno la esperanza de vida se incrementa hasta seis o siete meses, por esta razón también se le conoce como generación *matusalén* (figura 1.3.1) (CONANP, 2001; Comisión para la Cooperación Ambiental, 2008; WWF y Telcel, S/A).

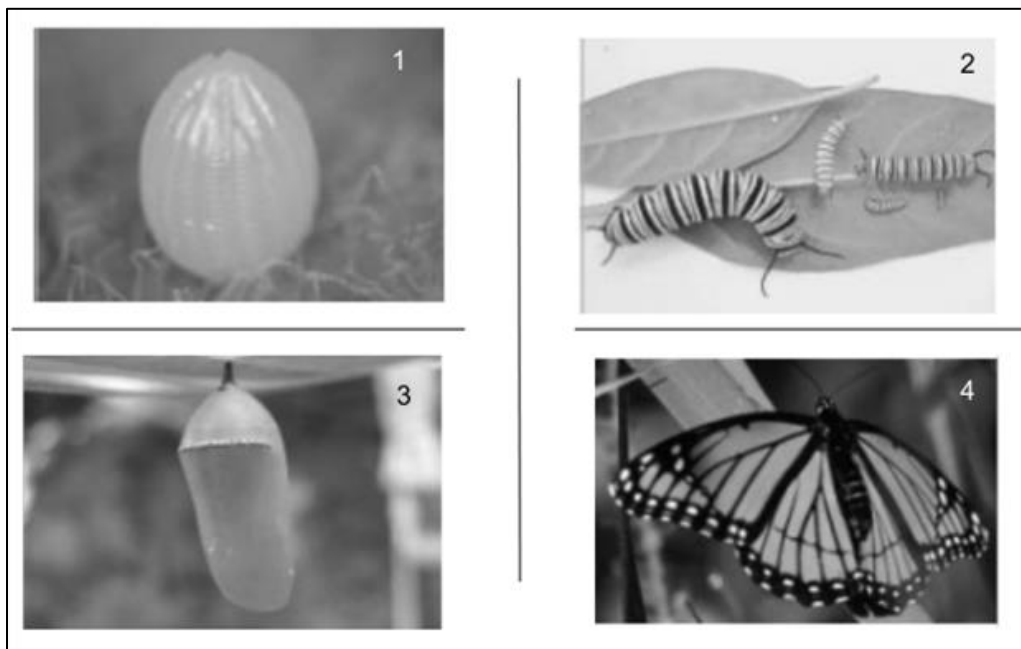


Figura 1.3.1. Etapas de desarrollo de la mariposa monarca: 1) Huevo; 2) Larva; 3) Crisálida; 4) Adulter. Fuente: Comisión para la Cooperación Ambiental, 2008.

Se han identificado dos tipos de poblaciones, la oriental y la occidental, la primera migra al centro de México, mientras que la segunda inhierna en la costa de California (Comisión para la Cooperación Ambiental, 2009). La generación de invierno o

matusalén de la población oriental es la que realiza la travesía hasta los bosques de oyamel mexicanos.

El primer registro oficial referente a la migración de las mariposas monarca se remonta a 1857 cuando D'Urban dio cuenta de nubes oscuras en el valle del Misisipi (Brower, 1995 en Comisión para la Cooperación Ambiental, 2008).

En 1937 el entomólogo canadiense Fred Urquhart tuvo la idea de realizar el marcaje de las mariposas a fin de estudiar su migración, así con los años se fueron adhiriendo al proyecto grupos de voluntarios para rastrear a las mariposas monarca, llegando a la conclusión de que éstas se asentaban en algún lugar de México (CONANP, 2001).

El 2 de enero de 1975, Kenneth Brugger y Catalina Aguado descubrieron a millones de ejemplares congregados en un bosque de oyamel en el Cerro Pelón, Estado de México, evidentemente los habitantes de la región ya conocían el evento durante generaciones (CONANP, 2001; Comisión para la Cooperación Ambiental, 2008).

La mariposa monarca aprovecha las corrientes de aire y recorren aproximadamente 73 kilómetros al día, pero se han registrado trayectos de hasta 350 km. Cruzan Texas hasta encontrarse con la Sierra Madre Oriental donde cambian de rumbo hacia el suroeste hasta el Sistema Volcánico Transversal momento en el que forman colonias (figura 1.3.2) (Alonso y Arellano, 1989).

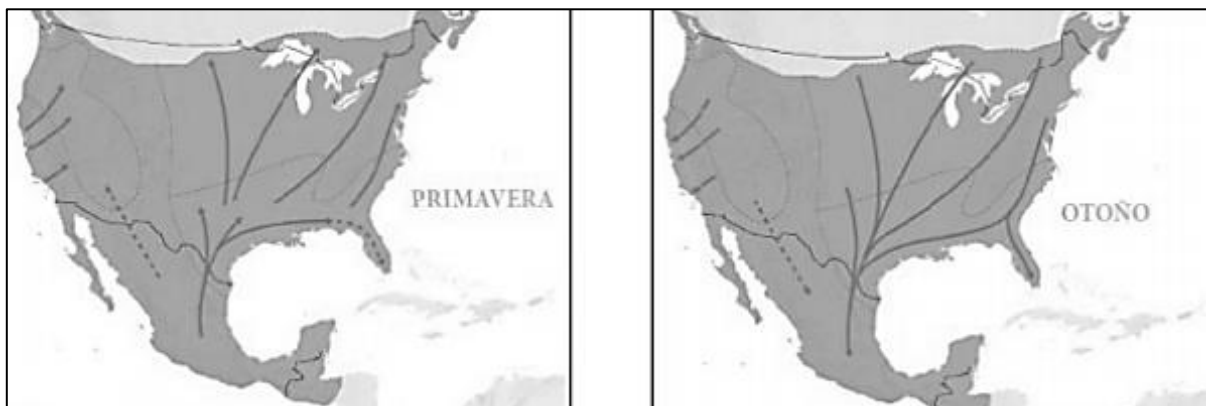


Figura. 1.3.2. Rutas migratorias de la Mariposa Monarca. Fuente: Comisión para la Cooperación Ambiental, 2008.

La Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (RBMM) ubicada entre el Estado de México y Michoacán alberga los sitios de hibernación o santuarios más grandes y conocidos del mundo, y aporta servicios ambientales, importante atracción turística lo que genera grandes beneficios económicos (Brenner, 2009; Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, 2010, Barkin, 2003 en Cortez-Madrigal *et al.*, 2014).

Existen documentadas 22 colonias, de ellas, 11 se consideran permanentes, 6 se encuentran dentro de la RBMM, otras se emplazan en Valle de Bravo, Nevado de Toluca, Sierra de Mil Cumbres y Los Azufres; en tiempos recientes se descubrió otra más en los bosques de oyamel de Atlautla en el Parque Nacional Izta-Popo y cuyo estudio se encuentra en fases iniciales (figura 1.3.3 y 1.3.4) (CONANP, 2010; Aranda, 2005; Espinosa, 2012).



Figura. 1.3.3. Santuarios de hibernación en la Región Monarca. Fuente: Rendón *et al.*, 2014.



Figura. 1.3.4. Santuario de Piedra Herrada, Estado de México. Fuente: Trabajo de campo, febrero 25, 2017, Araiza-Olivares.

Durante la temporada de hibernación (noviembre-marzo) las mariposas se protegen de las bajas temperaturas y los depredadores en la vegetación, cubren casi por completo ramas y troncos (figura 1.2.5). Extienden sus alas para calentarse en cuanto los rayos solares inciden sobre ellas. Entre los meses de febrero y marzo las colonias se mueven hacia cañadas o arroyos, aparentemente en busca de humedad (CONANP, 2010).

Durante las últimas semanas del invierno y las primeras de la primavera se aparean hasta que finalmente emprenden el viaje de regreso a Estados Unidos donde depositan los huevecillos en las *Asclepias* (WWF y Telcel, S/A).



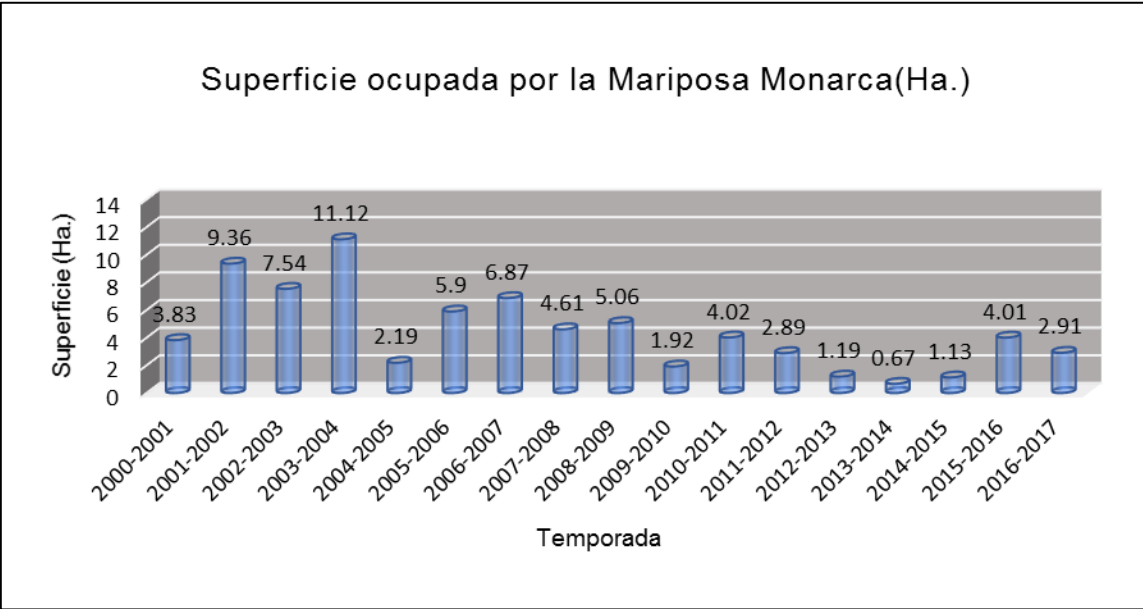
Figura 1.3.5. Colonia de hibernación en el Santuario de Piedra Herrada, Edo. Méx. Fuente: Trabajo de campo, febrero 25, 2017, Araiza-Olivares.

Tanto las instituciones públicas como ONG han aplicado conjuntamente instrumentos con el fin de proteger la mariposa monarca. Así, el fenómeno migratorio fue incluido en la lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO como bien natural.

La mariposa monarca está enlistada en la NOM-059-SEMARNAT-2010 como especie sujeta a protección especial; año con año se monitorea la superficie ocupada por las colonias de mariposas (gráfica 1.3.1); seguimiento de la cobertura forestal; incentivos económicos entre los que figuran el pago por servicios ambientales; trabajos de conservación de bosques e impulso de proyectos

productivos (SEMARNAT, 2010; WWF y Telcel, S/A; DOF, 30 de diciembre 2010; CONAFOR y Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza A.C., 2013).

Pese a los esfuerzos, los resultados son de éxito cuestionable, debido a que las medidas implementadas han generado resistencia por parte de la población local y la degradación ambiental ha continuado (Melo, 2002, Ramírez *et al.*, 2003, Brenner, 2004 en Brenner, 2009).



Gráfica 1.3.1. Superficie ocupada por la mariposa monarca (2000-2017). Fuente: Araiza-Olivares con datos de WWF.

El deterioro del bosque fue constatado en trabajo de campo, dentro del santuario de Piedra Herrada al encontrarse evidencias de tala de árboles reciente, presión creciente por parte de visitantes que supera la capacidad de carga del ecosistema y que genera contaminación de suelo y acústica (figura 1.3.6).



Figura 1.3.6. Deterioro ambiental en el Santuario Piedra Herrada, Edo. Méx. Fuente: Trabajo de campo, febrero 25, 2017, Araiza-Olivares.

Capítulo 2. Metodología y técnicas

La adquisición de información y de datos se basó principalmente en trabajo de gabinete y puede resumirse en: 1) delimitación del área de estudio; 2) caracterización e interacciones de la especie 3) selección, conformación de la base de datos; 4) validación; 5) procesamiento de los datos para el análisis puntual y espacial (figura 2.1) y en menor medida el trabajo de campo para complementar la información bibliográfica incluida en el capítulo 1.

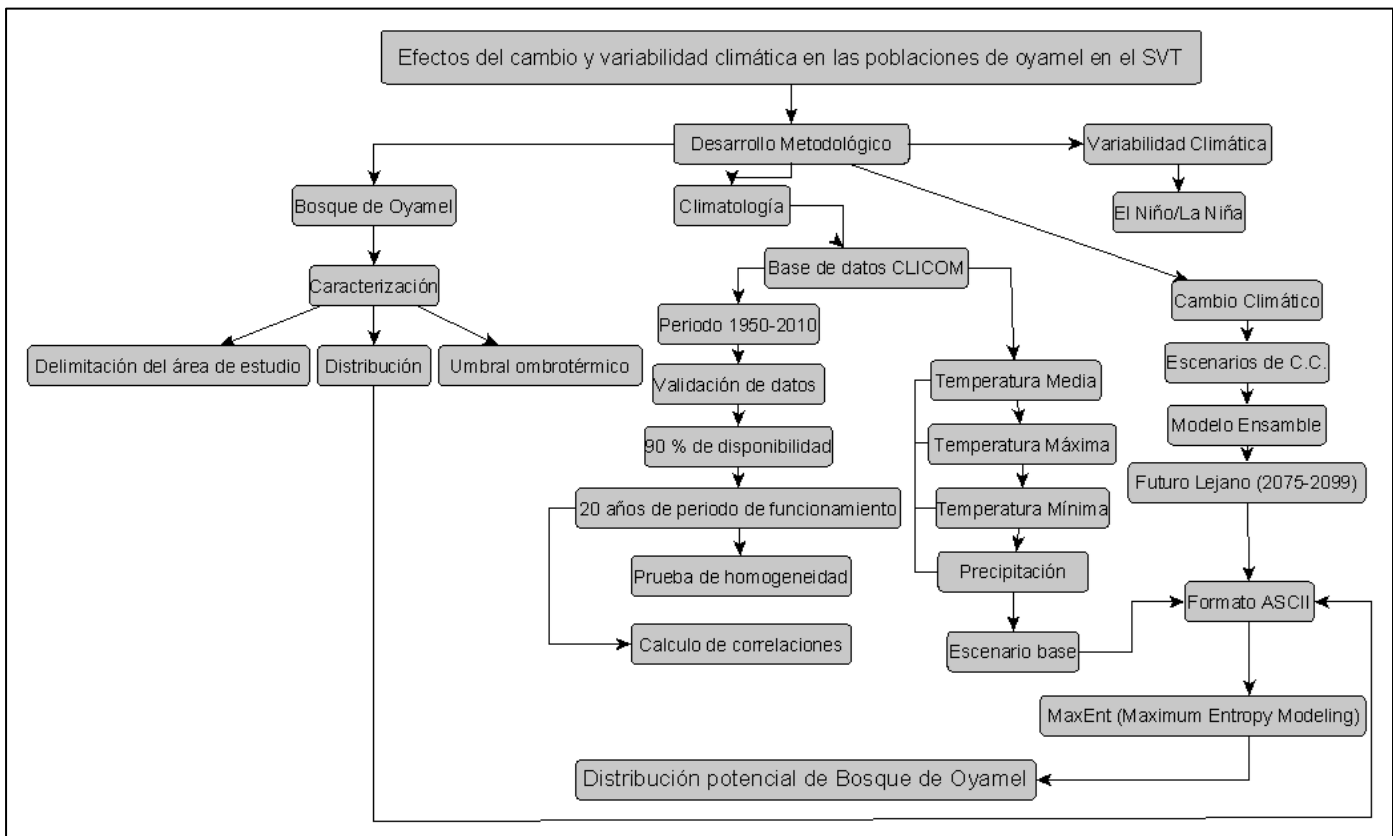


Figura 2.1. Diagrama Metodológico. Fuente: Araiza-Olivares.

2.1. Construcción del Modelo Base

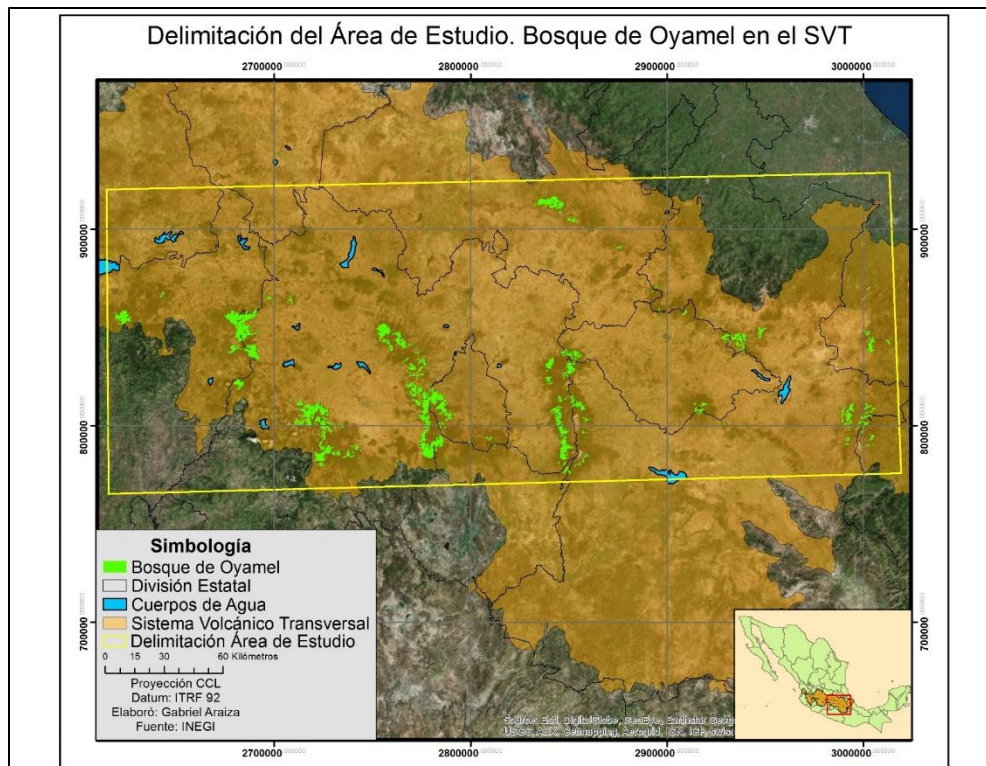
El presente epígrafe presenta los pasos seguidos para la construcción del escenario base a partir del cual se realizaron las proyecciones de cambio climático. Este modelo base presenta una temporalidad de 60 años de datos climatológicos, desde 1950 hasta 2010.

Área de Estudio.

Para la determinación del área de trabajo, se tomó en cuenta la clasificación incluida en la Carta de Uso de Suelo Serie V escala 1:250 000 elaborada por INEGI.

Se analizó la distribución de los usos de suelo corresponde a bosque de oyamel; en México se reconocen entre seis y diez especies diferentes de *Abies* (Martínez *et al.*, 2016). La atención se enfocó en la región fisiográfica del Sistema Volcánico Transversal que de acuerdo con la CONAFOR (S/A) en esta región predomina la especie *Abies religiosa*.

La delimitación de la zona de estudio se trazó considerando la densidad de bosque de oyamel. Se determinó establecer como referencias al Norte: Parque Nacional El Chico; al Sur, lindero austral del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl; al Este el Lago de Cuitzeo; y al Oeste el Parque Nacional Pico de Orizaba. Abarca principalmente los estados de Michoacán, Hidalgo, Estado de México, Ciudad de México, Morelos, Tlaxcala, Puebla y Veracruz (mapa 2.1.1).



Mapa 2.1.1 Delimitación del Área de Estudio. Fuente: Araiza-Olivares con datos de INEGI.

Selección de Estaciones Climatológicas

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) es el organismo encargado de medir, recopilar y proveer de información de carácter meteorológico tanto a escala nacional como local. Entre sus objetivos se encuentra el de concentrar, revisar, depurar y ordenar la información que finalmente puede ser consultada públicamente (SMN, S/A).

La selección de las variables se basó en los términos expresados por los modelos elaborados en actualización de escenarios de cambio climático para estudios de impacto, vulnerabilidad y adaptación elaborados por el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (CCA) en conjunto con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), los cuales serán abordados con mayor amplitud más adelante.

La base de datos consultada fue CLICOM mensual, complementado con los datos de las normales climatológicas, ambos casos elaborados por el SMN. Se seleccionó los datos mensuales correspondientes a los elementos temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura media y precipitación para la totalidad de estaciones ubicadas dentro del área de estudio.

Depuración de la Base de Datos

La validez de los datos no depende tanto de las técnicas empleadas sino de las series de observación que responden a tres factores (Bello, 2014):

1. Tamaño de muestra.
2. Homogeneidad de los datos.
3. Coincidencia temporal de los datos con el fin de contrastarlos.

El primer paso para depurar la base de datos consistió en ubicar las estaciones con las siguientes condiciones conforme a la disponibilidad de datos, que:

- Hubiesen funcionado entre los años 1950-2010.
- Contar con al menos 20 años de datos.

Las estaciones resultantes se conformaron en una nueva base de datos para aplicar un filtro estadístico, en este caso se utilizaron los datos de precipitación mensual de cada estación.

Debido a que la calidad del modelo depende directamente de los datos, es indispensable contar con métodos estadísticos aplicables a las bases de datos climatológicos que comprueben la confiabilidad de los mismos.

Las pruebas de homogeneidad son métodos útiles para verificar el nivel de confiabilidad de los datos. Se disponen de diferentes tipos (Cruz *et al.*, 2012):

- Prueba de recorrido o de rachas.
- Regresión.
- Prueba de Helmert.
- Índices de persistencia.
- Análisis de curva de doble masa.
- Test de Abbe.
- T-Student.

Para el caso de los datos de precipitación, se optó por realizar la prueba de recorrido y para los datos correspondientes a la temperatura media el de regresión, debido a la sencillez que ofrece su aplicación.

La prueba de recorrido consiste en diferentes etapas las cuales se pueden sintetizar en dos (Cruz, 2013):

1. Obtención de la mediana y media de la serie.
2. Cálculo de los desvíos o cambios de signo. A partir de la graficación de los datos anuales de la precipitación y el valor medio, se puede identificar el número de desvíos y de acuerdo con el resultado, determinarse si los datos son homogéneos (o heterogéneos) de acuerdo con lo establecido según el criterio de Doorembos (tabla 2.1.1 y gráfica 2.1.1).

Tabla 2.1.1. Criterio de Doorembos.

No. observaciones	Intervalo	No. observaciones	Intervalo
12	5-8	32	13-20
14	5-10	34	14-21
16	6-11	36	15-22
18	7-12	38	16-23
20	8-13	40	16-25
22	9-14	50	22-30
24	9-16	60	26-36
26	10-17	70	31-41
28	11-18	80	35-47
30	12-19	90	40-52
		100	45-57

Fuente: Fernández (1996) en Cruz (2013).



Gráfica. 2.1.1. Prueba de Homogeneidad. Estación 9038, Presa Mixcoac, Cd. De México. Fuente: Araiza-Olivares.

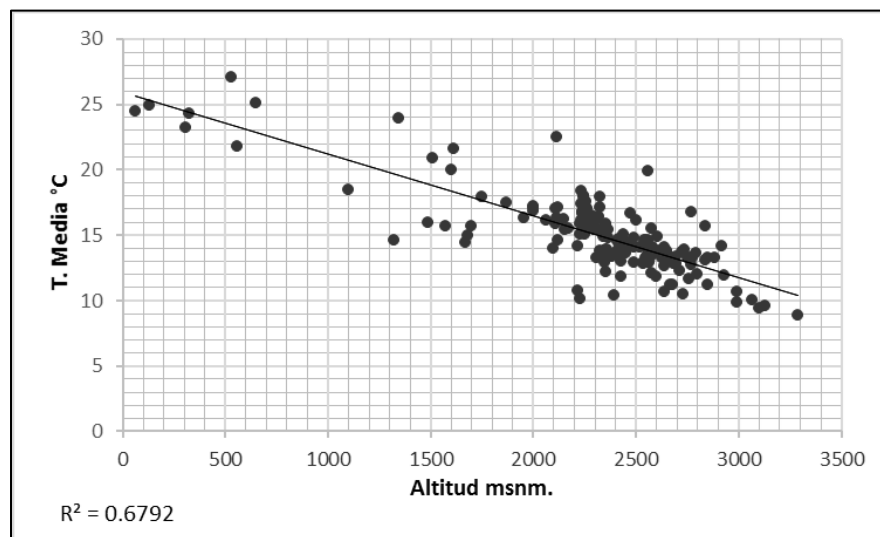
Los datos de las estaciones que se ubicaron conforme al número de observaciones y el rango de desvíos establecido en el Criterio de Doorembos se consideran como homogéneos, es decir, el grado de confiabilidad que poseen es aceptable. Por el contrario, si el número de desvíos queda fuera del rango en relación al número de

observaciones, los datos de la estación en cuestión deben ser eliminados dada su baja confiabilidad.

En cuanto a la temperatura media refiere, se aplicó el método de regresión lineal simple (gráfica 2.1.2). Donde R^2 representa el coeficiente de determinación, obteniendo el valor de R se obtiene el valor del coeficiente de correlación.

El coeficiente de correlación mide la fuerza de la relación lineal entre los valores cuantitativos apareados x e y de una muestra (Triola, 2009), es decir, la relación que guarda una variable dependiente con una variable independiente, en este caso temperatura media y altitud respectivamente.

El valor R o coeficiente de correlación obtenido para las estaciones es de 0.8241, es decir, la temperatura media y la altitud presenta un nivel de correlación positiva considerable (Hernández, 2003 en Castejón, 2011).



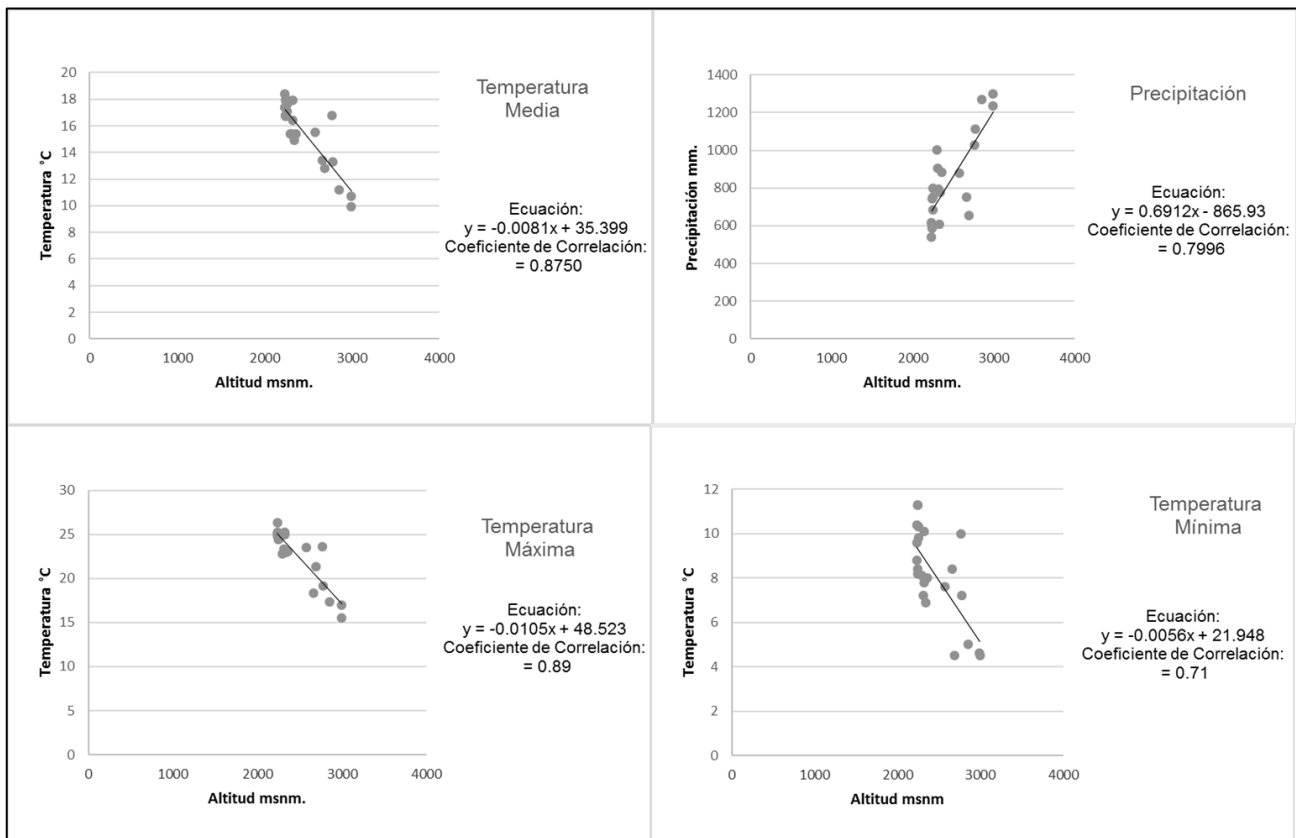
Gráfica 2.1.2. Regresión T. Media vs. Altitud de las estaciones seleccionadas. Fuente: Araiza-Olivares.

La falta de información en sitios lejanos, como las cimas montañosas, hizo necesario ubicar puntos cercanos a las cimas de cuatro de las montañas más altas del país (Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Tláloc y La Malinche) (tabla 2.1.2).

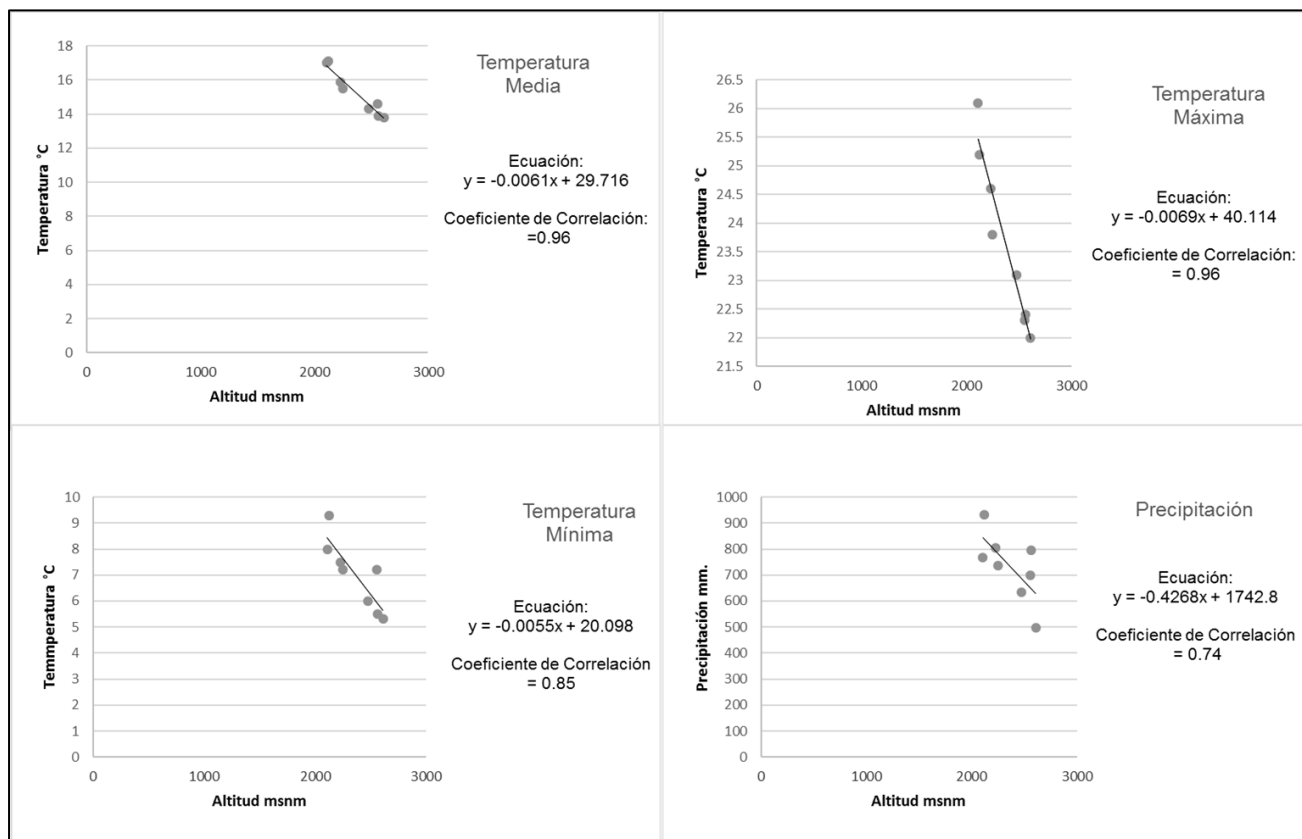
Para el cálculo de las variables (t. media, t. máxima, t. mínima, precipitación) se utilizó el método simple o empírico, que consiste en obtener la ecuación de regresión simple para el cálculo de un gradiente (Ortiz, 1987 y Torres, 2013).

Para la obtención de los datos se consideraron las estaciones más cercanas a los puntos colocados. Para el caso del Volcán Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Tláloc se utilizaron 23 estaciones mientras que para La Malinche se contó únicamente con 8 estaciones.

Cabe señalar que, en principio, se trabajó con un número de estaciones mayor, sin embargo, aquellas cuyos datos se ubicaban en los extremos de las gráficas fueron descartadas a fin de mejorar el coeficiente de correlación (gráfica 2.1.3 y 2.1.4).



Gráfica 2.1 3. Regresión lineal simple. Estaciones V. Tláloc, Iztaccíhuatl y Popocatepetl.
Fuente: Araiza-Olivares.



Gráfica. 2.2.4. Regresión lineal simple. Estación La Malinche. Fuente: Araiza-Olivares.

Los resultados de las estaciones calculadas, Tláloc, Iztaccíhuatl, Popocatépetl y La Malinche se muestran en la tabla 2.1.2.

Tabla 2.1.2. Estaciones calculadas mediante regresión simple.

Estación	Latitud	Longitud	Altitud	T. Media	T. Mínima	T. Máxima	Precipitación
Tláloc	19.416	-98.716	4070	2.4	-0.8	5.7	1947.2
Iztaccíhuatl	19.178	-98.641	5105	-5.9	-6.6	-5	2662.6
Popocatépetl	19.023	-98.626	5336	-7.8	-7.9	-7.5	2822.3
La Malinche	19.239	-98.033	4055	4.9	-2.2	12.1	12.1

Fuente: Araiza-Olivares.

Adicionalmente, se calculó y agregó a la base de datos las unidades fototérmicas promedio anual de las estaciones. Se trata de un índice complejo útil para estimar el tiempo de maduración del fruto tras la floración y puede aplicarse tanto por periodo vegetativo o ciclo vegetativo completo y cuyo resultado es el producto de

las unidades calor y la duración astronómica del día o duración media del fotoperiodo (Paes *et al.*, 2010; Gómez, 2007).

La fórmula aplicada es:

$$UF = \frac{\sum T * \overline{FP}}{100}$$

Donde:

UF = Unidades fototérmicas.

$\sum T$ = Sumatoria de la temperatura media.

\overline{FP} = Duración media del fotoperiodo.

La aplicación de la fórmula se ejemplifica a través de la tabla 2.1.3:

Tabla 2.1.3. Datos de Estación para cálculo de unidades fototérmicas.

Estación	Nombre	Municipio	Lat.	Long.	Altitud	T. Media
9016	CUAJIMALPA	CUAJIMALPA DE MORELOS	19.35	-99.3	2777	13.3

Fuente: Araiza-Olivares

De acuerdo con los datos de Ortiz (1987) la duración astronómica media del día anual (\overline{FP}) entre los 18° y 20° de latitud norte es de 12.1 horas.

Para obtener la sumatoria de la temperatura media diaria ($\sum T$) basta con obtener el producto de la temperatura media anual y los días del año:

$$\sum T = (13.3)(365) = 4854.5$$

Una vez obtenidos los datos necesarios se despeja la fórmula:

$$UF = \frac{4854.5 * 12.1}{100} = 587.39$$

Las variables climatológicas con las que se integró la base de datos, a partir de la cual se generó la línea base, con temporalidad 1950-2010 se muestra en la tabla 2.1.4

. *Tabla 2.1.4 Variables Climatológicas de línea base.*

Variable Climatológica
Temperatura Media Anual
Temperatura Media Máxima Anual
Temperatura Media Mínima Anual
Precipitación Media Anual
Unidades Fototérmicas Media Anual

Fuente: Araiza-Olivares.

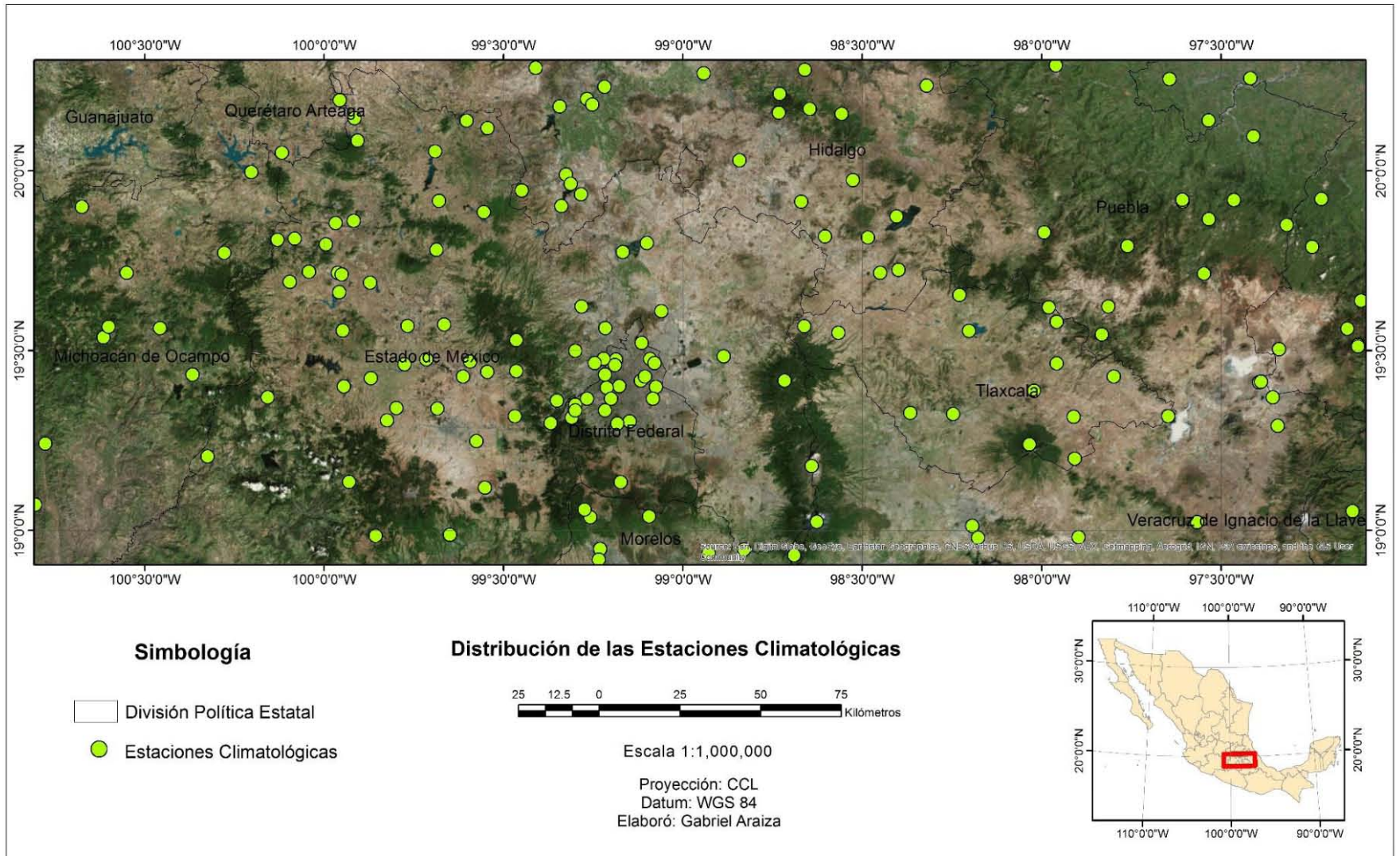
El número total de estaciones climatológicas que conformaron la base de datos dentro del área de estudio fue de 168 (tabla 2.1.5 y mapa 2.1.2).

Tabla 2.1.5. Estaciones climatológicas.

Estado.	Número de Estaciones.
Distrito Federal	20
Estado de México	56
Morelos	8
Tlaxcala	15
Puebla	21
Hidalgo	25
Veracruz	12
Michoacán	11

Fuente: Araiza-Olivares.

Mapa 2.1.2 Distribución de Estaciones Climatológicas. Fuente: Araiza-Olivares.



2.2. Construcción de Escenarios de Cambio Climático

La actualización de los escenarios de cambio climático para México, elaborado en conjunto por el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la UNAM y el Instituto Nacional de Cambio Climático (INECC) se han colocado en la plataforma en línea del Atlas Climático Digital de México (figura 2.2.1).



Figura. 2.2.1. Interfaz del Atlas Climático para México. Fuente: UNIAMTOS/INECC. <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas>

En este trabajo se analizó el modelo ensamble *REA* (*Reliability Ensemble Averaging*) el cual es generado a partir de 15 distintos modelos de circulación general con arreglos matriciales para mejorar la resolución espacial a 30" x 30" (926x926 metros) (Conde, 2015; Fernández *et al.*, 2015); además, se hizo el ejercicio comparativo con los modelos *GFDL* y *HADGEM2*.

Las proyecciones ofrecidas para el modelo *REA* son el horizonte a futuro cercano (2015-2039) y a futuro lejano (2075-2099) en ambos casos con dos forzamientos radiativos, a 4.5 y 8.5. Para la investigación se hizo uso del horizonte lejano con ambos forzamientos.

Los datos descargados de la plataforma digital se proveen de manera mensual para cuatro variables climatológicas:

1. Temperatura Máxima.

2. Temperatura Mínima.
3. Temperatura Promedio.
4. Porcentaje de cambio de precipitación.

El formato en el que se obtienen los datos es ráster de tipo GeoTIFF con resolución. Para trabajarlos en conjunto con los datos obtenidos para la línea base, fue necesario procesar estas imágenes para adquirir la información de manera anual.

Para el procesamiento de las imágenes se utilizó modulo “Calculadora Ráster” dentro del software QGIS versión 2.14.2. Una vez ahí, se hizo el promedio anual de los datos de cada variable (figura 2.2.2).

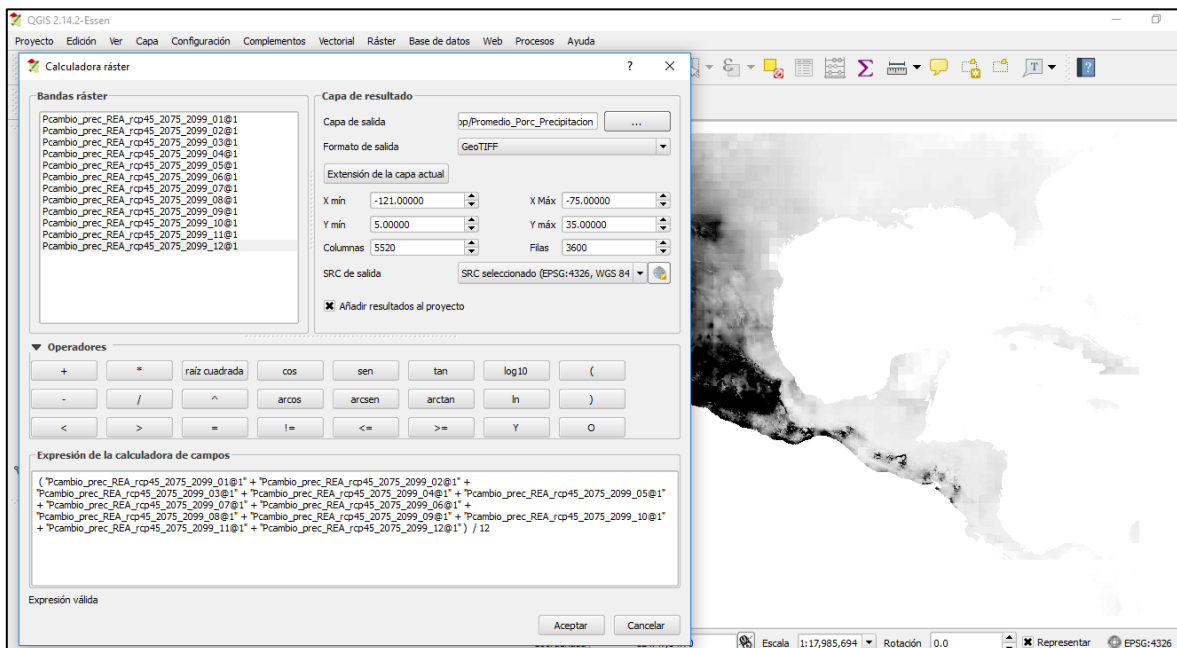


Figura. 2.2.2. Ejemplo de procesamiento de las imágenes ráster. Fuente: Elaboración propia con QGIS.

Así se redujeron los 96 archivos ráster iniciales con las distintas variables climatológicas, a únicamente ocho, conservando la resolución espacial original para ambos forzamientos radiativos.

El siguiente paso consistió en extraer los valores de cada pixel correspondiente a la ubicación de cada una de las 168 estaciones con la ayuda del SIG ArcMap 10.3. El resultado final es la adición de los valores del pixel de cada variable en la tabla de

atributos del archivo vectorial con las estaciones climatológicas con lo cual se tienen los datos para la siguiente etapa.

Posteriormente se interpolaron las variables a partir de los datos contenidos en el archivo vectorial de puntos de estaciones climatológicas para obtener un archivo de carácter continuo a través de la aplicación de un método de interpolación.

La interpolación es la estimación de valores desconocidos a partir de registros obtenidos mediante mediciones in situ, actualmente uno de los más utilizados es Kriging, el cual se basa en la autocorrelación espacial para la predicción y generación de superficies continuas, así mismo es de carácter global, exacto y estocástico (Murillo et. Al, 2012; Niño, 2011) (figura 2.2.3).

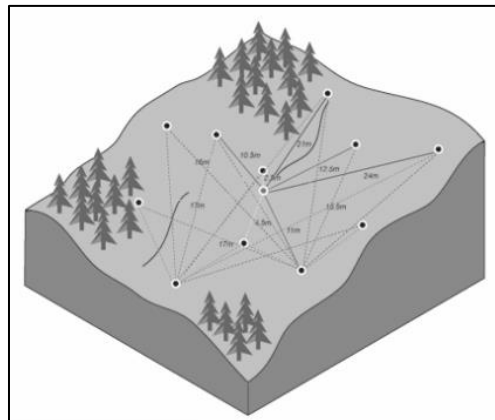


Figura 2.2.3. Interpolación mediante Kriging. Fuente: Esri (S/A).

. El método utilizado fue Kriging simple con una superficie de tipo predictiva y una distribución base de t-student. La selección del método se fundamentó en la desviación estándar que mostraron los productos de salida (tabla 2.2.1).

La desviación estándar, también llamada desviación típica, es una medida de dispersión y es útil para cuantificar los límites de confianza. (Calderón, 2012; Cervantes, 2008).

Tabla 2.2.1. Valores de desviación estándar obtenidas de interpolación.

Interpolación Mediante Kriging	
Variable	Desviación Estándar
Temperatura Media	3.9
Temperatura Máxima	4.1
Temperatura Mínima	3.4
Precipitación	504.2
Unidades fototérmicas	176.4
Temperatura Mínima forzamiento 8.5	2.9
Temperatura Máxima forzamiento 8.5	3.2
Temperatura Media forzamiento 8.5	2.8
Precipitación forzamiento 8.5	423.9
Unidades fototérmicas forzamiento 8.5	143.7
Temperatura Mínima forzamiento 4.5	2.8
Temperatura Máxima forzamiento 4.5	3.3
Temperatura Media forzamiento 4.5	2.8
Precipitación forzamiento 4.5	481.4
Unidades fototérmicas 4.5	130.1

Fuente: Araiza-Olivares.

El modelado de las proyecciones se realizó con el software libre MaxEnt 3.3.3 (*Maximum Entropy Species Distribution Modeling*), desarrollado S. Philips, M. Dudik y R. Sharipe en 2006 y contó con el apoyo por parte de AT&T, Princeton University, el Centro para la Biodiversidad y Conservación y el Museo de Historia Natural de América (Gómez, 2015).

MaxEnt utiliza solo los datos de presencia de la especie y su funcionamiento se basa en el principio de máxima entropía, busca establecer las relaciones entre la localización de las especies y las características biofísicas y ambientales y estimar la probabilidad de distribución. (Kumar y Stohlgren, 2009; Martínez, 2010).

Las variables climatológicas por introducir en el análisis se complementan con la localización de los manchones clasificados como de bosque de *Abies* en el archivo vectorial de la serie V de uso de suelo y vegetación de INEGI previamente señalada, así como un modelo digital de elevación (MDE) con el fin de incorporar el efecto de la topografía.

La capa de polígonos se transformó a una malla de puntos para volver el formato compatible con MaxEnt, se utilizó la extensión *Hawth's Tools* para ArcMap 10.3, dentro del menú *Sampling Tools* se salida, a una equidistancia de 500 metros entre sí. (figura 2.2.4).

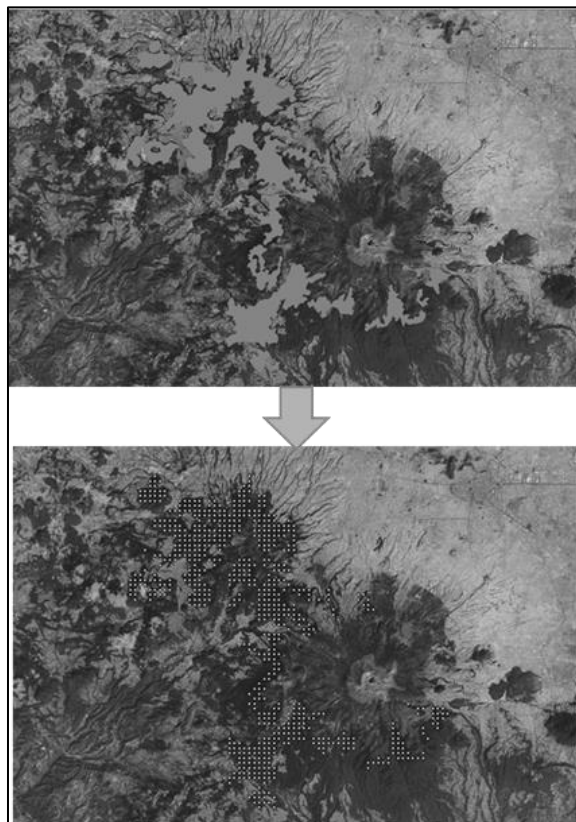


Figura 2.2.3. Conversión de polígonos a puntos. Fuente: Araiza-Olivares.

Dentro de la tabla de atributos, se agregaron los campos de latitud y longitud y se calcularon las coordenadas para cada uno de los puntos. Una vez terminado el proceso, dicha tabla se exportó a formato .csv.

MaxEnt admite como insumo para realizar el análisis de los datos de las variables, el formato ASCII, sin embargo, los archivos de salida obtenidos con las interpolaciones por defecto se encuentran en *Formato de Cuadrícula de Esri* (Esri, S/A).

Para transformarlo al formato requerido, se utilizó ArcMap 10.3, desde *ArcTool Box* al menú de *Conversion Tools*, después el sub menú *From Raster*, ahí seleccionó la herramienta *Raster to ASCII*.

Para que el software sea capaz de identificar los diferentes archivos con los que trabajar, es indispensable que los encabezados de los archivos ASCII deben coincidir unos con otros (Phillips, 2006), es decir, si por ejemplo se tiene el archivo *precipitacion.asc*, las proyecciones deben tener el mismo nombre, pero éstos deben ubicarse en carpetas separadas.

MaxEnt tiene una interfaz relativamente sencilla. Del lado izquierdo de la ventana se emplaza el campo *Samples* que es donde se carga únicamente el archivo *.csv* con la localización de la especie; en la parte derecha está el campo *Environmental Layers* es donde se cargan las capas correspondientes al escenario base. Uno de los aspectos positivos es el hecho de que el software reconoce automáticamente los archivos ASCII, por lo que no hay necesidad de realizar una selección uno por uno; en el campo *Projection layer directory/file* se coloca la ruta hacia la carpeta que contiene las proyecciones en formato ASCII, en este caso los escenarios con forzamiento radiativo 4.5 y 8.5; en *Output directory* la ruta de salida al archivo resultante; el resto de los campos se optó por dejar la configuración predeterminada (figura 2.2.5).

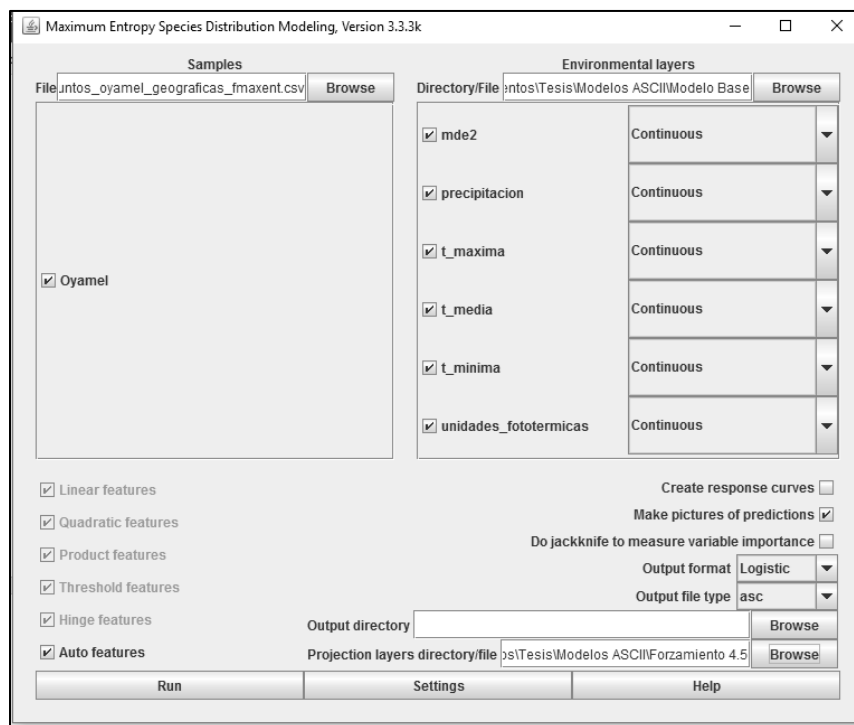


Figura 2.2.4. Interfaz y configuración utilizada en MaxEnt. Fuente: Interfaz de MaxEnt.

Para realizar el procesamiento basta con presionar el botón *Run*. Esto genera una distribución de probabilidad de los píxeles en la cuadrícula comenzando desde la distribución uniforme mejorando el ajuste de los datos (Phillips, 2006).

El resultado de salida que se obtiene consiste en, por un lado, la distribución potencial de la especie con los datos de la línea base y por el otro, la distribución potencial con la proyección del modelo de cambio climático, cuyos valores de los píxeles son entre 0 y 1, siendo 0 el potencial de distribución más bajo y 1 el más alto.

Se retomó y adaptó el trabajo elaborado por Díaz *et al.* (2011) *Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in México* para categorizar los valores de los píxeles obtenidos, esta investigación propone cuatro categorías: adecuado, moderadamente adecuado, poco adecuado, no adecuado a las que se añadió una quinta clase -muy adecuado- para quedar de la siguiente manera: 1) Muy adecuado (>0.6); 2) Adecuado (0.4-0.6); 3) Moderadamente adecuado. (0.2-0.4); 4) Poco adecuado (0.05-0.2); 5) No adecuado (<0.05).

Capítulo 3. Variabilidad y Cambio Climático.

La primera parte de este apartado aborda los fenómenos de variabilidad climática de escala planetaria que inciden en el territorio nacional como lo son El Niño u Oscilación del Sur y la Oscilación Nor Atlántica y modifican el estado de los ecosistemas, en concreto al bosque de oyamel. Se pretende brindar una breve descripción de la mecánica de dichos fenómenos, desde su periodicidad hasta los efectos observados a lo largo del tiempo en el país.

Posteriormente, se hace el análisis puntual de tres estaciones climatológicas seleccionadas con datos abundantes y fiables, así como una ubicación geográfica apropiada para evaluar los posibles efectos de la Oscilación del Sur en la temperatura y la precipitación, en zonas cuya cobertura forestal corresponde a bosques de oyamel.

Finalmente, se ofrece un panorama general sobre en qué consiste el cambio climático global, sus orígenes y consecuencias a nivel mundial. También se aborda organismos internacionales y nacionales dedicados a investigar del mencionado tema.

3.1. Oscilación del Sur

El ciclo interanual de la Oscilación del Sur o *ENSO* por sus siglas en inglés, se considera un fenómeno de escala planetaria y es la causa de la mayor señal de variabilidad climática en la franja tropical del Océano Pacífico (Montealegre, 2007; Hernández *et al.*, 2007).

La atención puesta sobre la Oscilación del Sur tiene su origen en las costas de Perú. Fueron los pescadores locales quienes se percataron de variaciones en la temperatura del mar; cuando esta se encontraba por encima de lo normal, la pesca era mala (Magaña *et al.*, 1998).

El fenómeno por lo general alcanza su máxima intensidad en fechas cercanas a la Navidad, razón por la que se le conoce como El Niño (en referencia a la celebración cristiana) (FAO, 2015).

El *ENSO* es una oscilación del sistema océano-atmósfera en la cual, el gradiente de presión atmosférica superficial entre la región oriental y occidental del Pacífico del sur presenta una fluctuación anormal (Jiménez, 2014; Hernández, Carrasco y Alfaro, 2007). Presenta tres fases; la cálida (El Niño), la fría (La Niña) y la neutral (SMN, S/A).

La ocurrencia del fenómeno no es periódica y un evento de El Niño no necesariamente es antecedido por La Niña; diversas investigaciones han establecido un ciclo irregular de entre dos y siete años. En los últimos años se ha constatado una mayor frecuencia, que oscila entre tres y cuatro años (Hanley *et al.*, 2003 en SMN S/A; Magaña, 2004 y Silva, 2008 en Granados *et al.*, 2012).

Su duración se extiende por varios meses y ocasiona la disminución de nutrientes en las aguas oceánicas, reduciendo la población de peces y por tanto repercute negativamente en la actividad pesquera (Hernández *et al.*, 2007).

La condición normal o neutra de los vientos dominantes en superficie en el océano Pacífico son del este (alisios); su influencia ocasiona que las aguas más cálidas muestren una tendencia a acumularse en la región del sureste asiático por lo que existe mayor inestabilidad atmosférica y con ello la formación de nubosidad. Mientras que, en el lado occidental, la temperatura es más baja, lo que favorece la presencia de nutrientes oceánicos e inhibe la formación de nubes, reduciéndose las precipitaciones (Magaña *et al.*, 1997).

Esta condición responde a la presencia de dos centros de alta presión. En el Pacífico Sur, se ubica entre los 30°S y 90°S, y en el Pacífico norte, se localiza aproximadamente en los 35°N y 140° O. Ambos centros de alta presión presentan movimientos a lo largo del año, el del norte se encuentra desplazado más hacia el sur durante la mitad fría del año, entre tanto la alta presión del sur se desplaza hacia el norte en el periodo invernal del hemisferio sur (figura 3.1.1) (Espinoza, 1996).

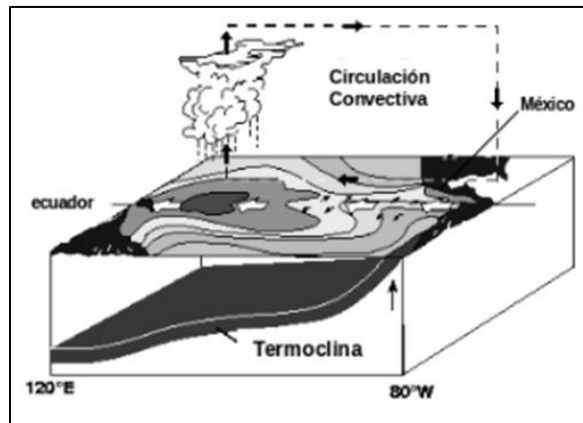


Figura 3.1.1. Condición normal o neutra. Fuente: SMN (Editado de NOAA/pmel).

Durante la fase positiva o cálida de la Oscilación del Sur, es decir, El Niño, los vientos alisios se debilitan, por lo que las aguas más cálidas del Pacífico occidental se esparcen en la zona ecuatorial, originando una elevación en la temperatura superficial del mar de entre uno y dos grados. En países como Perú y Ecuador, las lluvias muestran un incremento significativo, caso opuesto en el sureste asiático (Magaña *et al.*, 1997).

La Niña o también conocido como El anti Niño, es la fase negativa o fría del *ENSO*; se distingue por presentar anomalías negativas en la temperatura superficial del mar; la termoclina aparece menos profunda de lo usual en el Pacífico ecuatorial al oeste de la línea de cambio de fecha. La presión superficial es menor debido a la alta temperatura del agua por lo que las capas atmosféricas adyacentes son cálidas y húmedas y cuyo movimiento ascendente forma líneas de divergencia para posteriormente desplazarse horizontalmente. En la parte oriental, las aguas son frías, la presión superficial es alta gracias a la convergencia de los vientos provenientes del Pacífico occidental (Jiménez, 2008 y Tutasi, Palma, *et al.*, 2011 en Zambrano, 2014; Jiménez, 2014).

Los efectos que el *ENSO* manifiesta sobre el territorio mexicano, varían según la región y la época del año. También dependen en gran medida de la intensidad que se presente el fenómeno (figura 3.1.2).

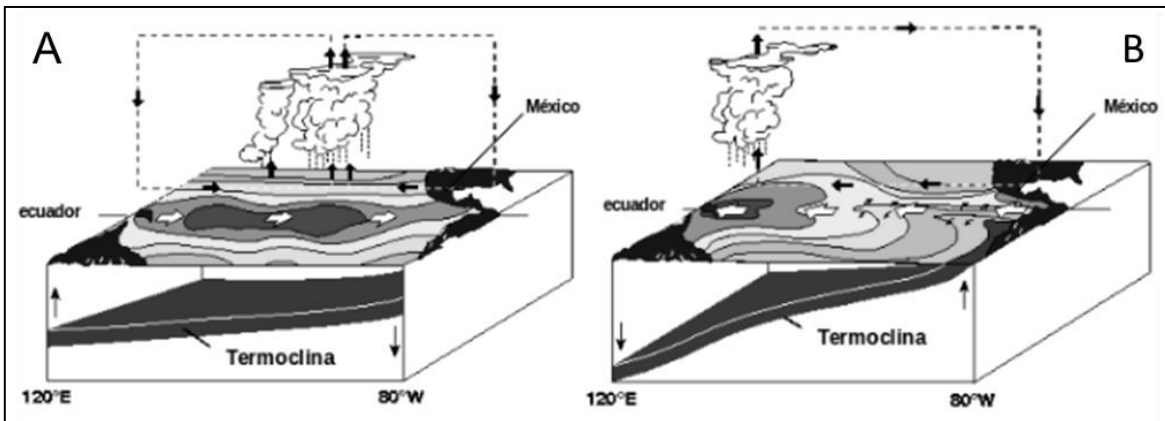


Figura 3.4.2. Esquema de la circulación océano-atmósfera. A. El Niño. B. La Niña. Fuente: SMN (Editado de NOAA/pmel).

Durante El Niño, la mayor parte del país presenta una disminución en la precipitación, principalmente en el verano, pudiendo originar sequías intensas; en el invierno, las lluvias tienden a incrementarse (Granados *et al.*, 2012; SMN, S/A).

La fase negativa o La Niña, en términos generales se caracteriza por presentar condiciones opuestas a El Niño. Ello se refleja en un aumento significativo de las lluvias en la mayor parte del país, especialmente en el litoral del océano Pacífico (Magaña *et al.*, 1998).

En verano con fenómeno de La Niña, las lluvias ofrecen valores cercanos al promedio, aunque pueden llegar a ser anómalamente superiores. En el invierno, las condiciones no son exactamente opuestas, por lo que queda de manifiesto el carácter no-lineal en el clima (Magaña *et al.*, 2004).

3.2. Oscilación Nor Atlántica

La Oscilación Nor Atlántica (*NOA* por sus siglas en inglés) es otro de los fenómenos que afectan la variabilidad climática del país. A pesar de presentar condiciones similares y una inminente vinculación con El Niño, este no ha sido tan ampliamente estudiado (Sánchez *et al.*, 2006).

Al igual que el *ENSO*, la *NOA* presenta tanto fase positiva y fase negativa y se ha determinado una periodicidad de 70 años (Hernández *et al.*, 2007) (figura 3.2.1).

Ambas fases están asociadas a la intensidad y localización de la corriente en chorro y líneas de tormentas y modulaciones a gran escala de patrones de transporte de calor y humedad, lo que a su vez da lugar a cambios en los parámetros de temperatura y precipitación (NOAA, S/A).

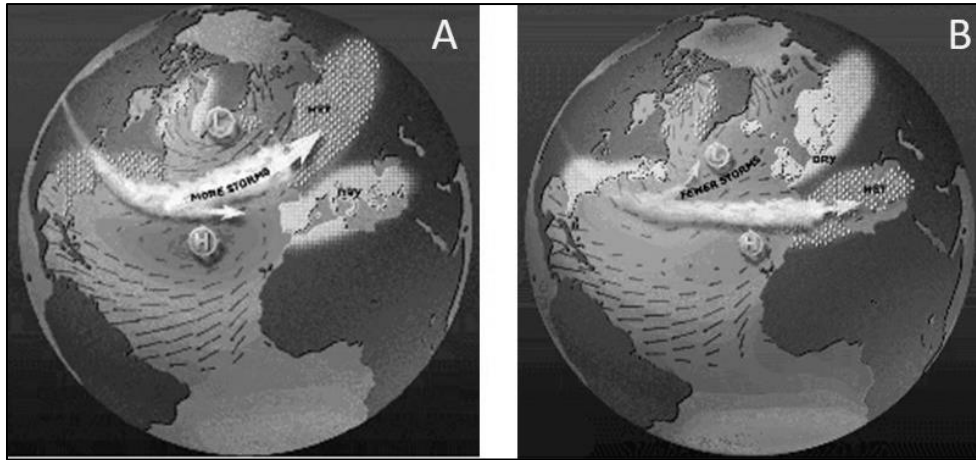


Figura 3.2.1. Circulación general de la NOA. A. Fase positiva. B. Fase negativa. Fuente: Universidad de Alcalá de Henares (S/A).

La primera descripción científica oficial del fenómeno fue realizada por el meteorólogo inglés Sir Gilbert Thomas Walter en el año 1923 (Sánchez, Signoret *et al.*, 2006).

La influencia de la NOA abarca desde el centro de Norteamérica (incluyendo México), Europa y el norte de Asia y manifiesta sus efectos principalmente durante el invierno. Normalmente la circulación atmosférica muestra un alto contraste barométrico entre el norte y el sur; en la zona norte se encuentra la baja presión de Islandia, mientras que al sur se localiza la alta presión subtropical de Bermuda-Azores. Esta situación ocasiona que las tormentas invernales se muevan de oeste a este a través del Atlántico Norte, aportando aire cálido y húmedo a Europa (Hernández *et al.*, 2007).

Cuando se encuentra en fase positiva, los vientos del oeste soplan con mayor fuerza; su influencia ocasiona que las condiciones se presenten más cálidas de lo normal sobre Eurasia, mientras que en el este del ártico canadiense son más frías y secas de lo usual lo que contrasta con el Noreste de América que presenta una

situación de mayor humedad (Hurrell, 1995b, 1996 en Greatbatch, 2000; Sánchez *et al.*, 2006).

En la fase negativa, las diferencias barométricas entre la baja presión de Islandia y la alta presión de Bermuda-Azores disminuye. Ambas muestran un desplazamiento hacia el sur por lo que los vientos del oeste son más débiles y el aporte de humedad a Europa se reduce, paralelamente en el Noreste de América se tienen inviernos más suaves y secos (Hurrell *et al.*, 2001 y Wanner *et al.*, 2001 en Sánchez *et al.*, 2006).

3.3. Análisis puntual de variabilidad climática

El análisis de la variabilidad climática se sustenta en el contraste de los datos de anomalías de temperatura y precipitación aportados por las estaciones climatológicas seleccionadas y los años bajo condiciones de Niño y Niña, con especial énfasis en las etapas más extremas para identificar los efectos de este fenómeno en un nivel local (tabla 3.3.1).

Tabla 3.3.1. Eventos e intensidades de El Niño y La Niña.

El Niño				La Niña		
Débil	Moderado	Fuerte	Muy Fuerte	Débil	Moderado	Fuerte
1951-1952	1963-1964	1957-1958	1982-1983	1950-1951	1955-1956	1973-1974
1952-1953	1986-1987	1965-1966	1997-1998	1954-1955	1970-1971	1975-1976
1953-1954	1987-1988	1972-1973		1964-1965	1998-1999	1988-1989
1958-1959	1991-1992			1967-1968	1999-2000	
1968-1969	2002-2003			1971-1972	2007-2008	
1969-1970	2009-2010			1974-1975	2009-2010	

1976-1977				1983-1984		
1977-1978				1995-1996		
1979-1980				2000-2001		
1994-1995				2011-2012		
2004-2005						
2006-2007						

Fuente: Golden Gate Weather Services (2017).

Las estaciones para el análisis puntual son tres (15231 “Presa Iturbide”, 3290 msnm.; 9019 “Desierto de los Leones”, 2995 msnm.; 21069 “San Antonio Arroyo Prieto”, 3065 msnm.) y cuyos datos se dividieron en dos mitades considerando los periodos húmedo y seco del año.

Estación 15231. Presa Iturbide (gráficos 3.3.1 y 3.3.2).

El registro de los datos abarca de 1978 a 2009. La condición normal de temperatura para la mitad húmeda es de 10 °C, mientras que para la seca es de 7.8 °C; En la precipitación la normal para la fase húmeda es de 1249.3 mm, para la seca es de 165.8 mm.

La anomalía de temperatura en el evento de El Niño muy fuerte de 1982-1983, en ambas mitades del año se apreciaron cercanas a lo normal, en el periodo seco del año la anomalía resultó negativa en el orden de -2.8 % y durante el periodo húmedo del año incrementó apenas al 1.7 %. La anomalía de precipitación registró en el periodo seco una variación negativa del -13 %, por otro lado, en el periodo húmedo la anomalía presentó un nivel del 2 % mayor conforme a la normal.

En El Niño 1997-1998, la temperatura tuvo durante el periodo seco del año una anomalía negativa del -5.6 %; en contraste en la mitad húmeda del año la

temperatura se incrementa respecto a la normal un 5.6 %. Las condiciones de precipitación se presentaron anomalías positivas. El periodo seco de 10 %, mientras el periodo húmedo presenta una variación del 27.8 %.

La temporada 1988-1989 presentó un evento de La Niña clasificado como fuerte. En la mitad seca del año se observa una anomalía de la temperatura positiva, mientras que en la seca aparece negativa (3 % y -4.1 % respectivamente). El periodo seco observó anomalía positiva de 30.2 %. mientras que en el húmedo la anomalía fue de 1.1 %.

Cabe resaltar el periodo 2009-2010, cuyas anomalías son las más marcadas a pesar de ser clasificado como Niño moderado, lo cual en parte se explica a la interferencia que provocan los faltantes en los datos de la estación.

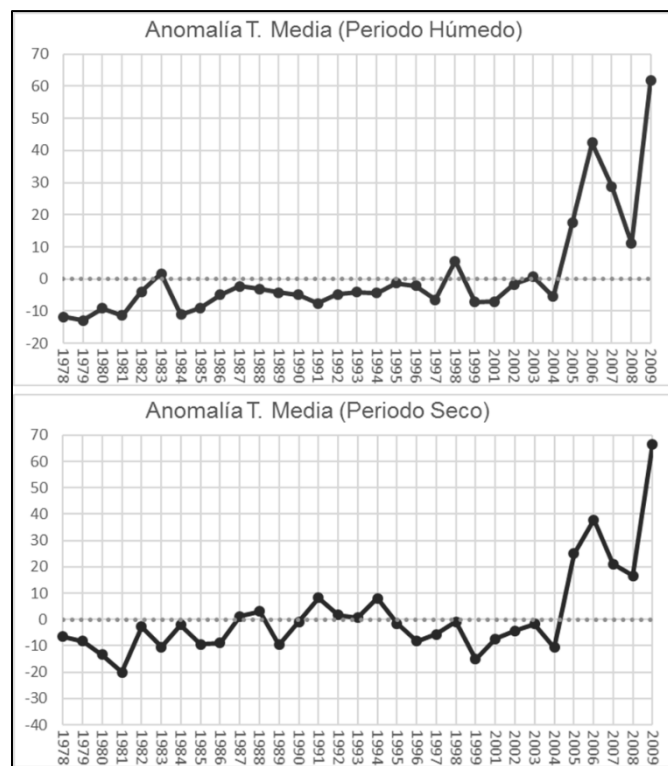


Gráfico 3.3.1. Anomalías de Temperatura. Estación 15231. Presa Iturbide. Fuente: Araiza-Olivares.

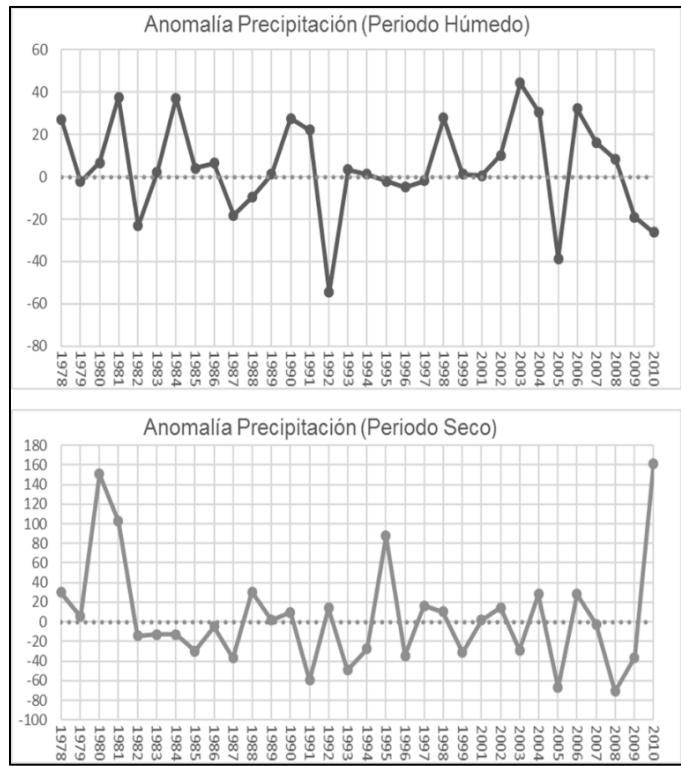


Gráfico 3.3.2. Anomalías de precipitación. Estación 15231. Presa Iturbide. Fuente: Araiza-Olivares.

Estación 9019. Desierto de los Leones (gráficas 3.3.3 y 3.3.4).

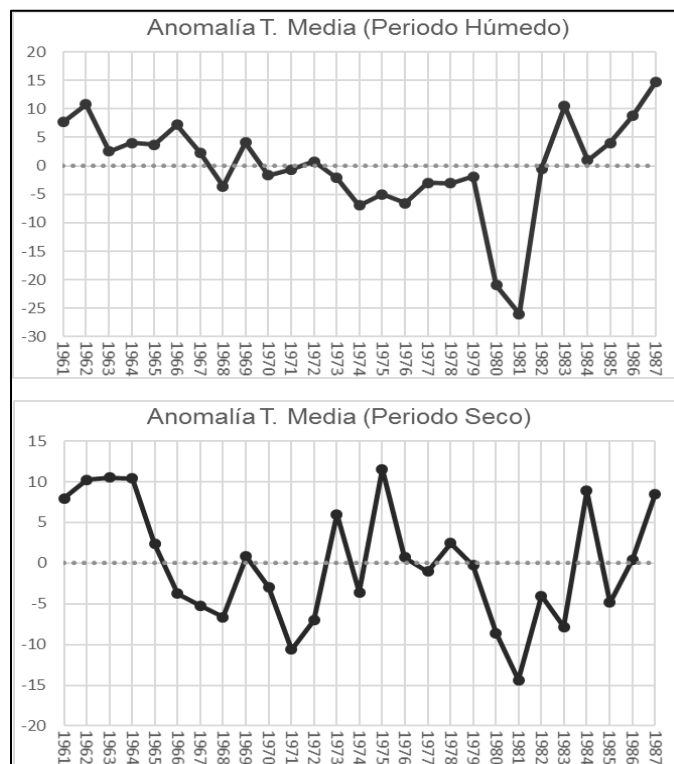
El conjunto de datos comprende de 1961 a 1987. La normal de temperatura para la mitad húmeda es de 11.5 °C, mientras que para la seca es de 9.9 °C; En la precipitación la normal para la fase húmeda es de 1184 mm., para la seca es de 113.8 mm.

La temperatura durante El Niño de 1982-1983 en el periodo seco tuvo una anomalía negativa de -4 % con respecto a la normal, por su parte, el periodo húmedo presentó una anomalía positiva de 10.4 %. La precipitación mostró durante la mitad seca del año una anomalía negativa de -36.2 % mientras que para el periodo húmedo la anomalía fue de -9.8 %.

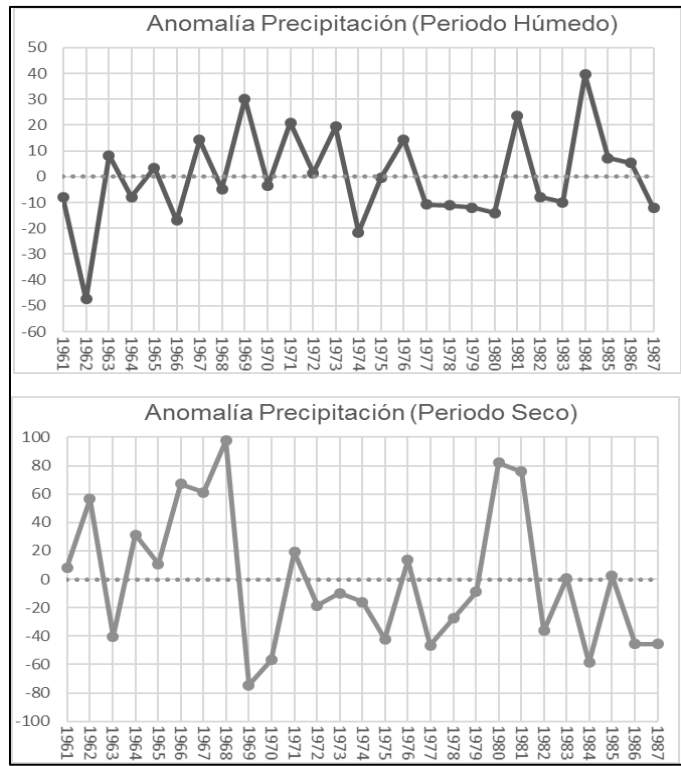
En La Niña de 1973-1974 se advirtió una anomalía positiva en la temperatura del periodo seco de, 5.9 % y -6.9 % durante el periodo húmedo. Los datos de precipitación indican que se presentó durante la etapa seca del año una disminución de -9.8 %, entretanto la etapa húmeda mostró una reducción de 21.5 %.

El evento de La Niña de 1975-1976 tuvo una anomalía positiva de 11.5 % en el periodo seco, mientras tanto, para el periodo húmedo esta resultó negativa con -6.5 %. La precipitación registró una anomalía negativa de -42.1 %, mientras que durante la fase húmeda del año se registró un incremento de 14.4 % respecto a la normal histórica.

El año 1981 destaca del resto ya que es en este año que se observó un descenso significativo en la temperatura de hasta 25 % en la mitad húmeda del año; caso contrario se aprecia en la precipitación debido a que se incrementó de forma notoria durante ambas mitades del año con 23.4 % en la húmeda y 75.7 % en la seca. Este año fue precedido por un evento de Niño débil y antecedió al de 1982, a pesar de ello, el ENSO se ubica dentro de las condiciones neutrales.



Gráfica 3.3.3. Anomalías de Temperatura. Estación 9019. Desierto de los Leones. Fuente: Araiza-Olivares.



Gráfica 3.3.4. Anomalías de Precipitación. Estación 9019. Desierto de los Leones. Fuente: Araiza-Olivares.

Estación 21069. San Antonio Arroyo Prieto (gráficas 3.3.5 y 3.3.6).

La normal de temperatura para la mitad húmeda es de 10.5 °C, mientras que para la seca es de 9.6 °C; En la precipitación la normal para la fase húmeda es de 781.3 mm., para la seca es de 152.8 mm.

El Niño 1982-1983 presentó cifras de temperatura cercanas a la normal con variaciones de -3.4 % en la estación seca y -2 % en la estación húmeda. La precipitación durante la fase seca del año mostró una anomalía positiva de 17.4 % mientras que en la fase húmeda la anomalía fue de -13.4 %.

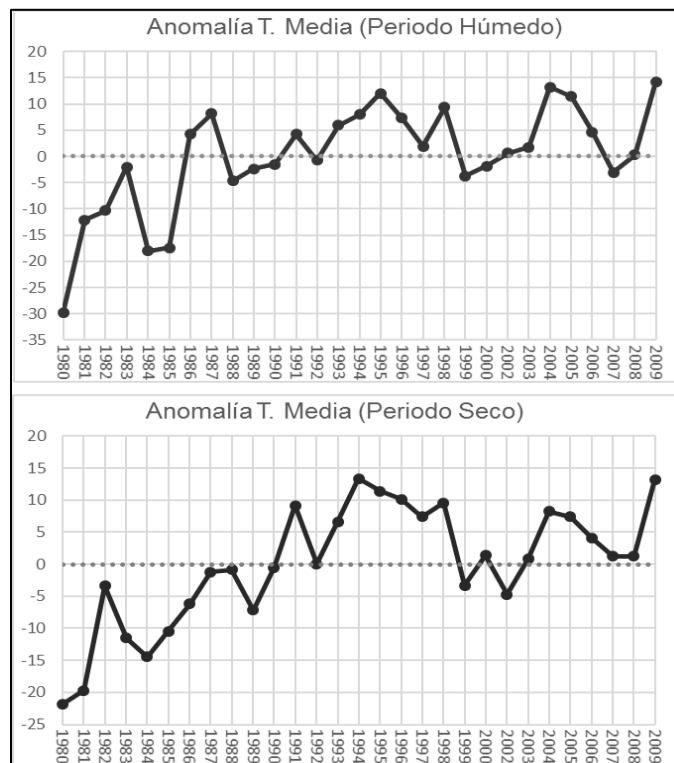
El evento de Niño de la temporada 1997-1998 tuvo una anomalía positiva de 7.3 % en la mitad seca del año, mientras que en la mitad húmeda la anomalía fue positiva del orden de 9.3 %. La precipitación se incrementó 16.6 % en la fase seca y 27.7 % en la fase húmeda respecto a la normal. De tal manera que no necesariamente se presentan condiciones de sequía.

La Niña 1988-1989 presentó condiciones de temperatura cercanas a la normal; la mitad seca del año tuvo una anomalía de -0.8 % y para la mitad húmeda de -2.3 % respecto a la normal. La precipitación registró anomalía de -25.6 % para la estación seca y -13 % para la húmeda.

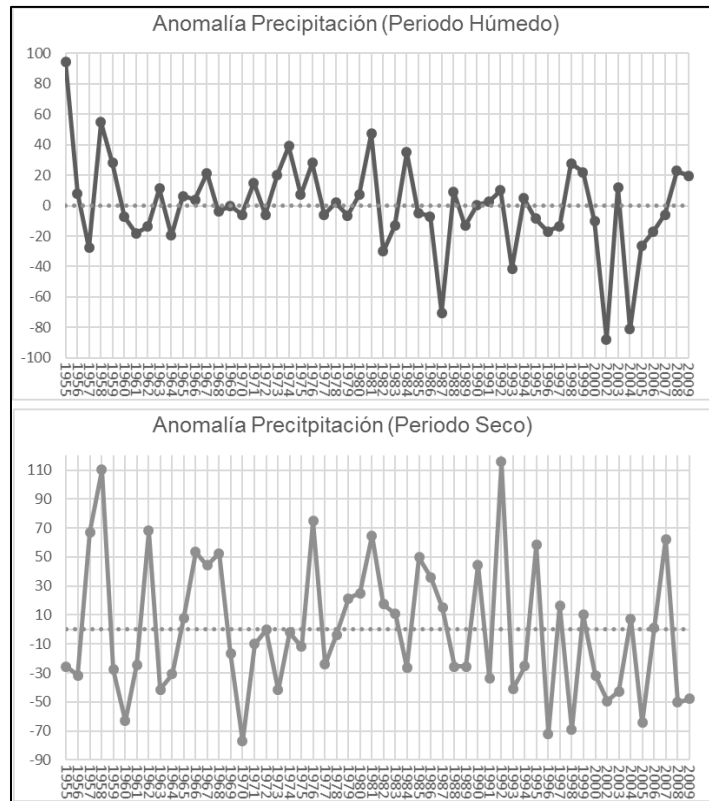
Para La Niña de 1973-1974 la anomalía en la precipitación negativa durante la fase seca de 41.7 % y la húmeda resultó positiva con 39.2 % conforme a las condiciones normales.

El evento de La Niña 1975-1976 la fase seca presentó una disminución en la precipitación de -11.9 % y durante la fase húmeda la anomalía fue positiva con 28.1 % con respecto a la normal.

Nuevamente sobresale el año 1980 donde se apreció una anomalía negativa en la temperatura del 29.7 % y 21.8 % en las fases seca y húmeda del año respectivamente



Gráfica 3.3.5. Anomalías de Precipitación. Est. 21069. Sn Antonio Arroyo. Fuente: Araiza-Olivares.



Gráfica 3.3.6. Anomalías de Precipitación. Est. 21069. Sn. Antonio Arroyo Prieto. Fuente: Araiza-Olivares.

3.4. Cambio climático global y sus efectos en México

La Convención Marco sobre el Cambio Climático lo define como un cambio de clima atribuible directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera y que se suma a la variabilidad natural del mismo durante periodos comparables (Díaz, 2012).

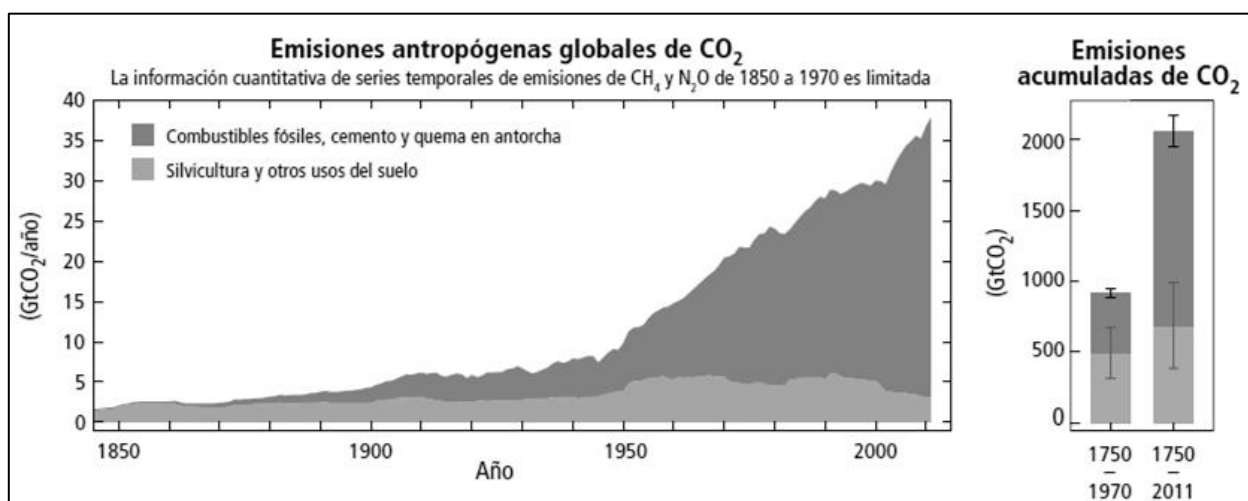
La Tierra absorbe la radiación solar y la redistribuye a través de la circulación atmosférica y oceánica principalmente del ecuador a los polos. Esta energía es a su vez reemitida por la superficie del planeta hacia el espacio de tal manera que se alcance el equilibrio entre la radiación recibida y emitida, sin embargo, la alteración de estos elementos puede derivar en cambios en el clima (Magaña, 2004).

La radiación solar al ser recibida y absorbida en la superficie terrestre (continente y océano) se transforma en energía de onda larga, que a diferencia de la radiación solar (de onda corta) es absorbida de manera eficiente en particular por el CO₂, el

vapor de agua entre otros. La radiación emitida de abajo hacia arriba da como resultado que la atmósfera superficial es cálida y se va enfriando conforme se incrementa la altura (Garduño, 2004; Caballero *et al.*, 2007).

Las emisiones antropógenas de gases de efecto invernadero han aumentado desde la era preindustrial en buena medida debido al crecimiento demográfico y económico. Entre el año 2000 y 2010 las emisiones registraron un máximo histórico; las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) alcanzaron los niveles más altos en 800 mil años, a partir de la revolución industrial (figura 3.4.1) y como consecuencia el secuestro de energía por parte del sistema climático (IPCC, 2014).

A esta alteración del balance energético se le denomina forzamiento radiativo (*RCP* por sus siglas en inglés) se trata de la anomalía de radiación neta (onda corta y onda larga) en donde la de onda corta se mantiene fija y se expresan en W/m² (Fernández *et al.*, 2015; Mendoza *et al.* 2016).



Gráfica 3.4.1. Emisiones de gases de efecto invernadero. Fuente: IPCC, 2014.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático (*IPCC* por sus siglas en inglés) es el organismo internacional, encargado de evaluar investigaciones científicas relacionadas con la comprensión del cambio climático. Fue creado en 1988 bajo el auspicio del Programa de Naciones Unidas para el

Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y de la cual cualquier miembro de la ONU puede formar parte (IPCC, S/A).

El *IPCC* está conformado por tres grupos de trabajo; el grupo I se encarga de dar las bases científicas, el grupo II trata sobre los efectos, la adaptación y la vulnerabilidad ante el cambio climático; el grupo III toca los temas referentes a la mitigación; adicionalmente se integra un grupo especial función es la de recopilar y analizar la información de gases de efecto invernadero (Ivanova y Cruz, 2013).

A la fecha el *IPCC* ha publicado cinco reportes, en los cuales se reúne el estado del conocimiento científico, socioeconómico y técnico respecto al cambio climático. El primero de ellos se publicó en 1990, el cual sentó el precedente para la creación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático; el segundo reporte (1995) aportó las bases para la adopción del Protocolo de Kyoto; el tercer reporte (2001) valoró distintos aspectos científicos, técnicos y socioeconómicos políticamente relevantes; el cuarto reporte se publicó en 2007 a la par de que se le otorgó el Premio Nobel de la Paz al *IPCC*; el quinto reporte es el más recientemente publicado en 2014 y en él se reunió a las investigaciones más actuales sobre el cambio climático (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, S/A).

Como parte de los esfuerzos internacionales para reducir y estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero, en 1997 se estableció el llamado Protocolo de Kyoto, en el cual, los países firmantes se comprometieron a disminuir sus emisiones a niveles similares a los observados en 1990. La XVIII Conferencia de las Partes (COP18) en Doha en 2012, formalizó la entrada en vigor del segundo periodo de compromisos del protocolo (Conde, 2006; SEMARNAT, 2013).

Los efectos del cambio climático se han visto reflejados de forma general, en un incremento de la temperatura media anual entre 1880 y 2012 de 0.85°C; el nivel medio del mar ha aumentado 19 cm. entre 1901 y 2010; de continuar la tendencia actual de emisiones de gases de efecto invernadero se estima el aumento de la temperatura media anual superior a 1.5 °C y el aumento del nivel del mar entre 40 y 63 cm. a fines del S. XXI (ONU, S/A).

Los acuerdos más recientes se derivan de la COP21 en París, Francia en 2015 y cuya entrada en vigor se fijó para el 4 de noviembre de 2016. Su objetivo principal es el de limitar el incremento de la temperatura global por debajo de 2°C; aumentar la capacidad de adaptación y resiliencia y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero que no pongan en riesgo la producción de alimentos; dirigir flujos financieros hacia un desarrollo resiliente y de bajas emisiones (CMNUCC, 2015).

El marco jurídico mexicano ante el cambio climático lo constituye la Ley General de Cambio Climático la cual distribuye atribuciones y competencias a los diferentes órganos de la administración pública, así mismo establece instrumentos institucionales, planeación, económicos, sancionadores y vigilancia de la política climática; además marca las metas nacionales a mediano y largo plazo (tabla 3.4.1) SEMARNAT, 2013).

Tabla 3.4.1. Instrumentos de política de cambio climático en México.

Nacional				Federal		Estatal		Municipal
Marco Jurídico	Ley Gral. De Cambio Climático			Programa Especial de Cambio Climático		Leyes estatales en materia de cambio climático		Programas municipales en materia de cambio climático
Planeación	Estrategia Nacional de Cambio Climático					Programas estatales de cambio climático		
Arreglos Institucionales	Sistema Nacional de Cambio Climático	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático	Comisión Intersecretarial de Cambio Climático	Consejo de Cambio Climático	Comisiones estatales intersecretariales de cambio climático			
Instrumentos	Registro Nacional de Emisiones	Inventario Nacional de Emisiones	Atlas Nacional de Riesgos	Sistema de Información	Normas Oficiales Mexicanas	Inventarios estatales de emisiones	Atlas estatales de riesgos	Atlas de riesgos de municipios vulnerables
Evaluación		Coordinación de Evaluación del INECC			Coordinación de Evaluación del INECC	Procedimientos de evaluación del programa estatal		Procedimientos de evaluación del programa municipal
Financiamiento		Fondo de Cambio Climático			Fondo de Cambio Climático	Fondo de Cambio Climático y Fondos Estatales	Fondo de Cambio Climático y gestión de otros recursos	

Fuente: SEMARNAT, 2013.

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) es el órgano creado a partir de la Ley General de Cambio Climático para coordinar y realizar estudios y proyectos de investigación científica y tecnológica con instituciones académicas públicas y privadas.

Uno de los proyectos derivados de esta colaboración es la *Actualización de escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica* en las que participaron instituciones como el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) el Instituto Mexicano de la Tecnología de Agua (IMTA), y el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) y cuyos fondos provinieron del Fondo de Medio Ambiente Mundial y administrado por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (Cavazos *et al.*, 2013 y Quinta Comunicación, 2012 en Fernández *et al.*, 2015).

En este proyecto se trabajó con 15 Modelos Generales de Circulación incluidos dentro de la Quinta Comunicación Nacional del *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIPP5, 2013)* y que a su vez sirvieron como base para el cálculo del modelo ensamble *Reliability Ensemble Averaging (REA)* (tabla 3.4.2). (Fernández *et al.*, 2015; INECC, 2016).

Los diferentes modelos se re-escalaron mediante métodos estadísticos de reducción de escala para pasar de la estructura original de 0.5°x0.5° de resolución a los 30"x30", con forzamientos radiativos 4.5 (bajas emisiones) y 8.5 (altas emisiones), horizontes de proyección a futuro cercano (2015-2039), futuro medio (2045-2069), futuro lejano (2075-2099) (excepto *REA* únicamente futuro cercano y futuro lejano) (Fernández *et al.*, 2015; Martínez *et al.*, 2016).

Tabla 3.4.2. Modelos de circulación para la Quinta Comunicación Nacional. () Modelos seleccionados para la Actualización de escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica.*

Modelo	Institución	País
BCC_CSM1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	China
CANeSM	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canadá
CNRMCM5*	Centre National de Recherches Météorologiques	Francia

CSIRO_Mk3	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	Australia
GFDL_CM3*	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	Estados Unidos
GISS_E2_R	NASA Goddar Institute for Space Studies	Estados Unidos
HADGEM2_ES*	Met Office Hadley Centre	Reino Unido
INM	Russian Institute for Numerical Mathematics	Rusia
IPSLcm5a_lr	Institut Pierre Simon Laplace	Francia
MIROC_esm	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies and Japan Agency for Marine Earth Science and Technology	Japón
MIROC_ESM_CHEM	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies and Japan Agency for Marine Earth Science and Technology	Japón
MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies and Japan Agency for Marine Earth Science and Technology	Japón
MPI_ESM_LR*	Max Planck Institute for Meteorology	Alemania
MRI_CGCM3	Meteorological Research Institute	Japón
NCC_NorESM1	Bjerknes Centre for Climate Research, Norwegian Meteorological Institute	Noruega
REA*	INECC (IMTA, CCA-UNAM y CICESE)	México

Fuente: Fernández et al. (2015).

Capítulo 4. Resultados

Análisis Espacial. La cartografía presentada marca el cumplimiento de los objetivos particulares planteados al inicio del trabajo de investigación; se muestran las condiciones climatológicas y de distribución potencial del bosque de oyamel actuales y proyectadas a futuro lejano (2075-2099).

Se dividen en cuatro bloques distintos:

1. Mapas de línea base. Se construyó a partir de la base de datos de las variables climatológicas proveniente del Servicio Meteorológico Nacional y constituyen la referencia a partir de la cual se aplicaron los modelos de cambio climático. Mapas 5.1-5.5)
2. RAE 4.5. Corresponde a la proyección de la línea base con la aplicación del forzamiento radiativo 4.5. (Mapas 5.6-5.10)
3. RAE 8.5. Son los mapas con la línea base proyectada con el modelo RAE con forzamiento radiativo 8.5, es decir, el más extremo. (Mapas 5.11-5.15).
4. Mapas de distribución. Son el resultado del trabajo de análisis en el software MaxEnt, y su posterior procesamiento en SIG. Muestra la distribución potencial considerando la línea base (actual), con el modelo de cambio climático REA en forzamientos radiativos de 4.5 y 8.5.

Línea base: La temperatura media muestra que la mayor parte de *Abies* se ubica a partir de la isoterma de 12°C (zona centro), sin embargo, se presentan hasta un máximo de 16°C (zona occidental) (mapa 4.1). La temperatura máxima presenta variaciones que van desde los 16°C hasta superar los 20°C (mapa 4.2). La temperatura mínima cubre las isotermas entre los 6°C y los 8°C (mapa 4.3). La precipitación ubica isoyetas con valores que oscilan entre 600 y 1000 mm anuales como mínimo (mapa 4.4). Las isolíneas de unidades fototérmicas tienen valores entre 500 y 700 (mapa 4.5).

Forzamiento 4.5: La temperatura media abarca a partir de las isotermas de entre 14° C en la zona central hasta 18°C en la parte poniente, es decir, un incremento de 2°C con respecto a la línea base (mapa 4.6). La temperatura máxima presenta

una oscilación entre los 22 y 24°C (mapa 4.7). La temperatura mínima tiene valores ubicados entre 6 y 10°C (mapa 4.8). La precipitación presenta una variación mayor, la Sierra Nevada muestra una precipitación mínima a partir 1100 mm, la Sierra de las Cruces 900 mm, La Malinche 300 mm, Pico de Orizaba 700 mm, Nevado de Toluca 1000 mm y la zona de la RB Mariposa Monarca 700 mm (mapa 4.9). Las unidades fototérmicas se ubican entre 600 y 700 (mapa 4.10).

Forzamiento 8.5: La temperatura media en los sitios que actualmente cubre el bosque de oyamel, se enmarcan por las isotermas de 16 y 18°C lo que da un contraste de hasta 4°C frente al escenario base (mapa 4.11). La temperatura máxima alcanza entre 24 y 28°C (mapa 4.12). La temperatura mínima varía entre 8 y 10°C (mapa 4.13). La precipitación va de los 700 a 800 mm como mínimo, excepto en el área de La Malinche con 300 mm (mapa 4.14). Las unidades fototérmicas alcanzan valores entre 700 y 800 (mapa 4.15).

La precipitación fue la variable climática con mayor importancia (excluyendo relieve por no ser de interés), después la temperatura mínima y máxima, en cuarto lugar, la temperatura media y por último las unidades fototérmicas, la cual no tuvo ninguna contribución al modelo (tabla 4.1).

Tabla 4.1. Participación de variables climáticas en el modelado.

Variable	Contribución Porcentual
Precipitación	41.3
T. mínima	27.5
T. máxima	27.5
T. media	3.4
U. fototérmicas	0

Fuente Araiza-Olivares, 2017, con datos de MaxEnt.

La aplicación de escenarios de cambio climático del modelo de circulación REA, permitió construir tres distintos escenarios (base, FR 4.5, FR 8.5) y a su vez estimar la distribución espacial y calcular la superficie potencial y la variación relativa del bosque de *Abies religiosa* en la región del SVT en horizonte temporal 2075-2099, así como contrastar los resultados con los modelos *GFDL* y *HADGEM2* (tabla 4.2).

El mapa de distribución potencial del escenario base muestra condiciones propicias y muy propicias principalmente en RB Mariposa Monarca, APFF Nevado de Toluca, Sierra de las Cruces, Ajusco-Chichinautzin, PN Izta-Popo, PN El Chico, PN La Malinche, límites de Tlaxcala y Puebla, PN Pico de Orizaba y PN Cofre de Perote (mapa 4.16).

Las condiciones muy propicias en el escenario 4.5 (mapa 4.17) se concentran en el norte y centro de la Sierra de las Cruces y una pequeña porción en el corredor Ajusco-Chichinautzin, áreas circundantes a los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, Ixcamaxtitlán en Puebla, así como porciones en el PN Cofre de Perote.

En el escenario 8.5 (mapa 4.18) las condiciones muy propicias se restringen a zonas circundantes a los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, mientras que las adecuadas se mantienen en pequeñas áreas de la Sierra de las Cruces y PN Cofre de Perote.

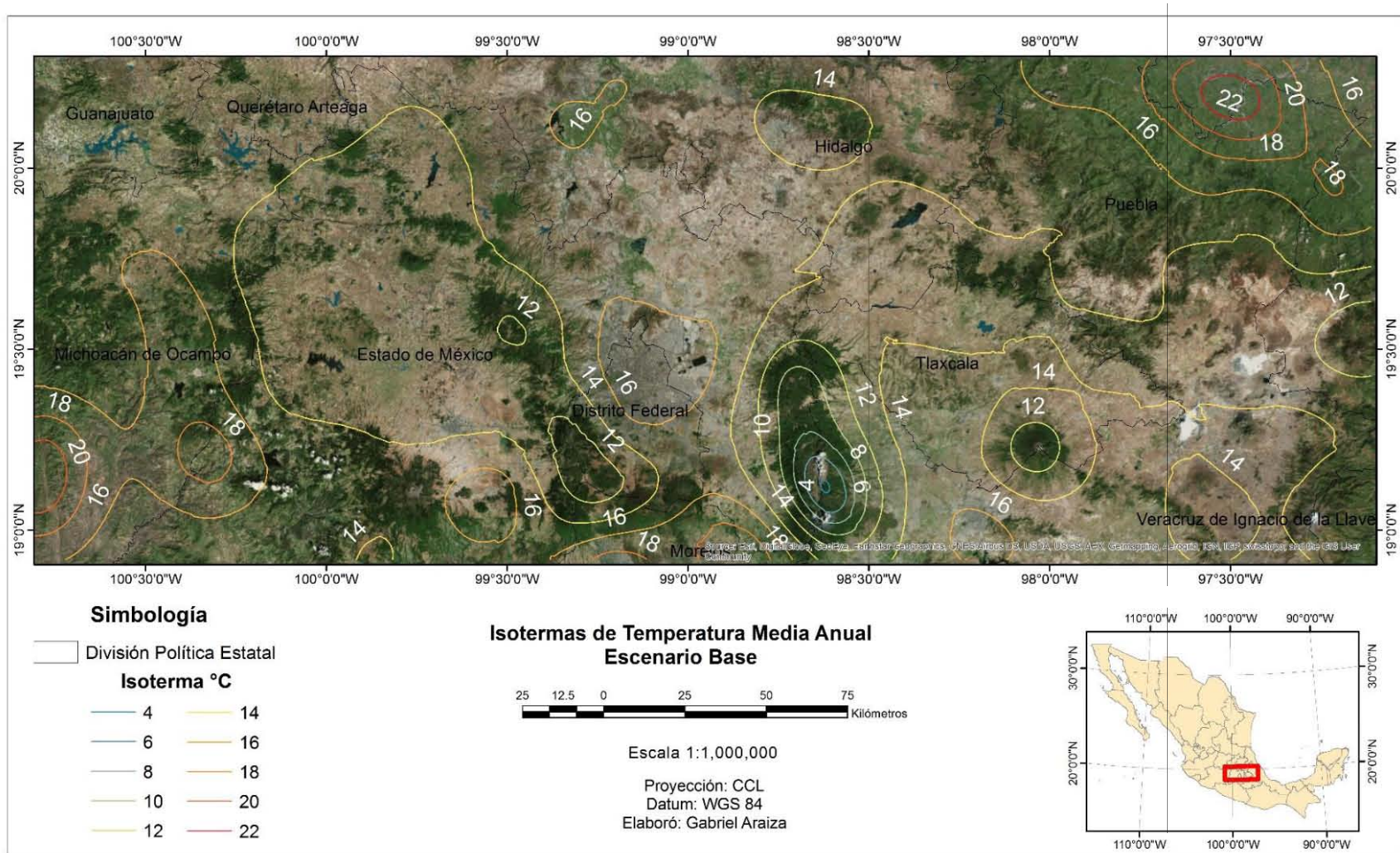
Los ejercicios comparativos con *GFDL* y *HADGEM2* siguieron la misma ruta metodológica de *REA*; la precipitación acumulada resultó con la mayor variación con respecto al modelo *REA* puesto que, la mayoría de las estaciones presentan un incremento significativo, no obstante, se observaron ciertas similitudes entre *GFDL* y *HADGEM2*, principalmente en el forzamiento 8.5 en donde se observa que la superficie de la categoría *Muy adecuada* tiene cifras similares a la línea base.

Tabla 4.2. Estimación de superficie potencial y variación del bosque de oyamel con el modelo *REA*. Horizonte lejano (2075-2099).

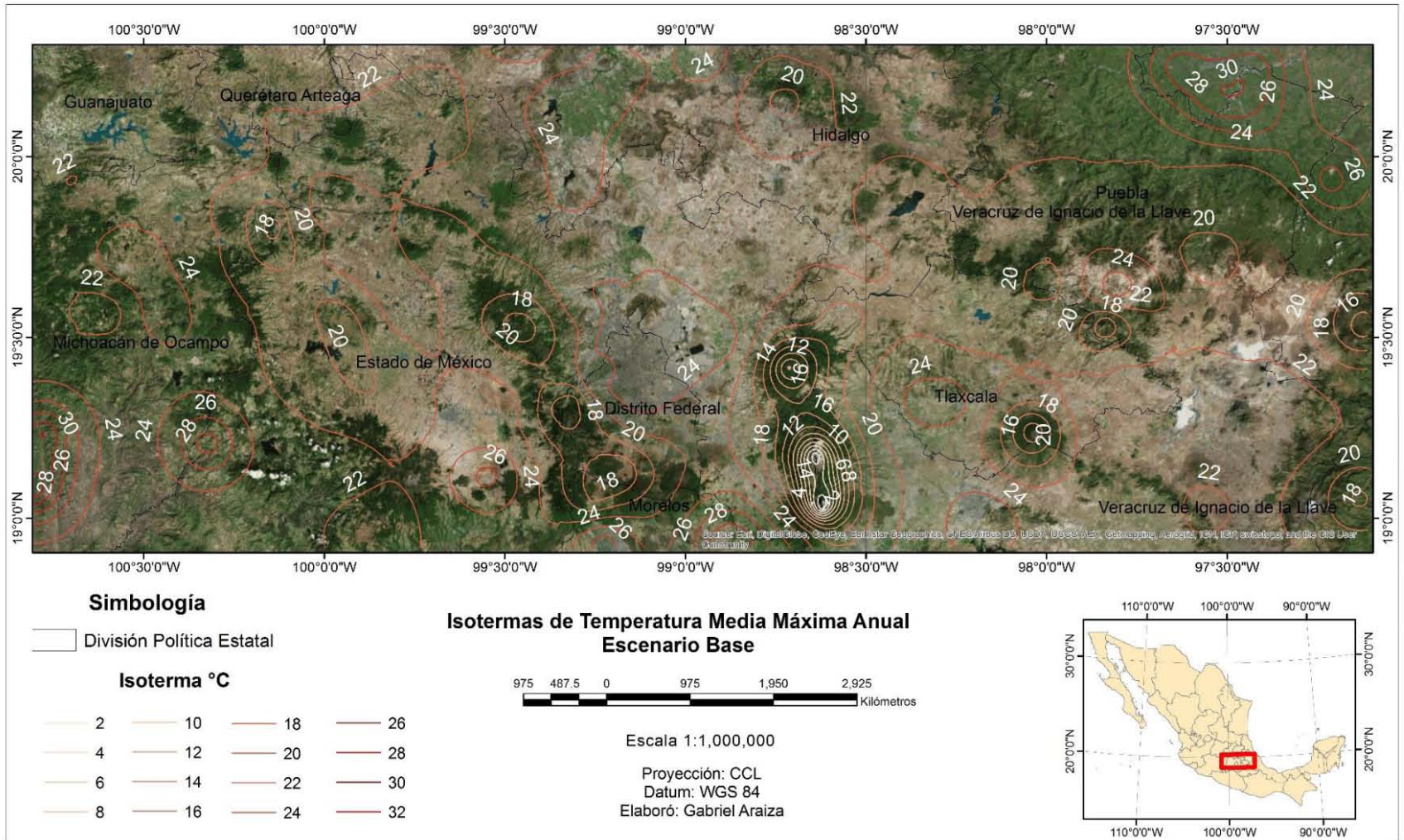
Categoría	Superficie actual (ha.)	Superficie REA 4.5 (ha.)	Superficie REA 8.5 (ha.)	Superficie GFDL 4.5 (ha.)	Superficie GFDL 8.5 (ha.)	Superficie HADGEM2 4.5 (ha.)	Superficie HADGEM2 8.5 (ha.)
No adecuado	4840880.7	5521716.7	5876454.5	5561332	5598203.5	5502337.7	5669802.8
Poco adecuado	681950.6	462522.5	382777.2	588314.2	661028.2	517315.2	584026.9
Moderadamente adecuado	319152.5	130850.8	40044.1	71427.7	27953.7	102639.8	30183.1
Adecuado	465609.4	225516.1	67912	108642.2	24009.3	118160.1	29582.9
Muy adecuado	78973.5	46046.4	19464.7	56936.4	75457.8	146199.6	73056.9

Fuente: Araiza-Olivares.

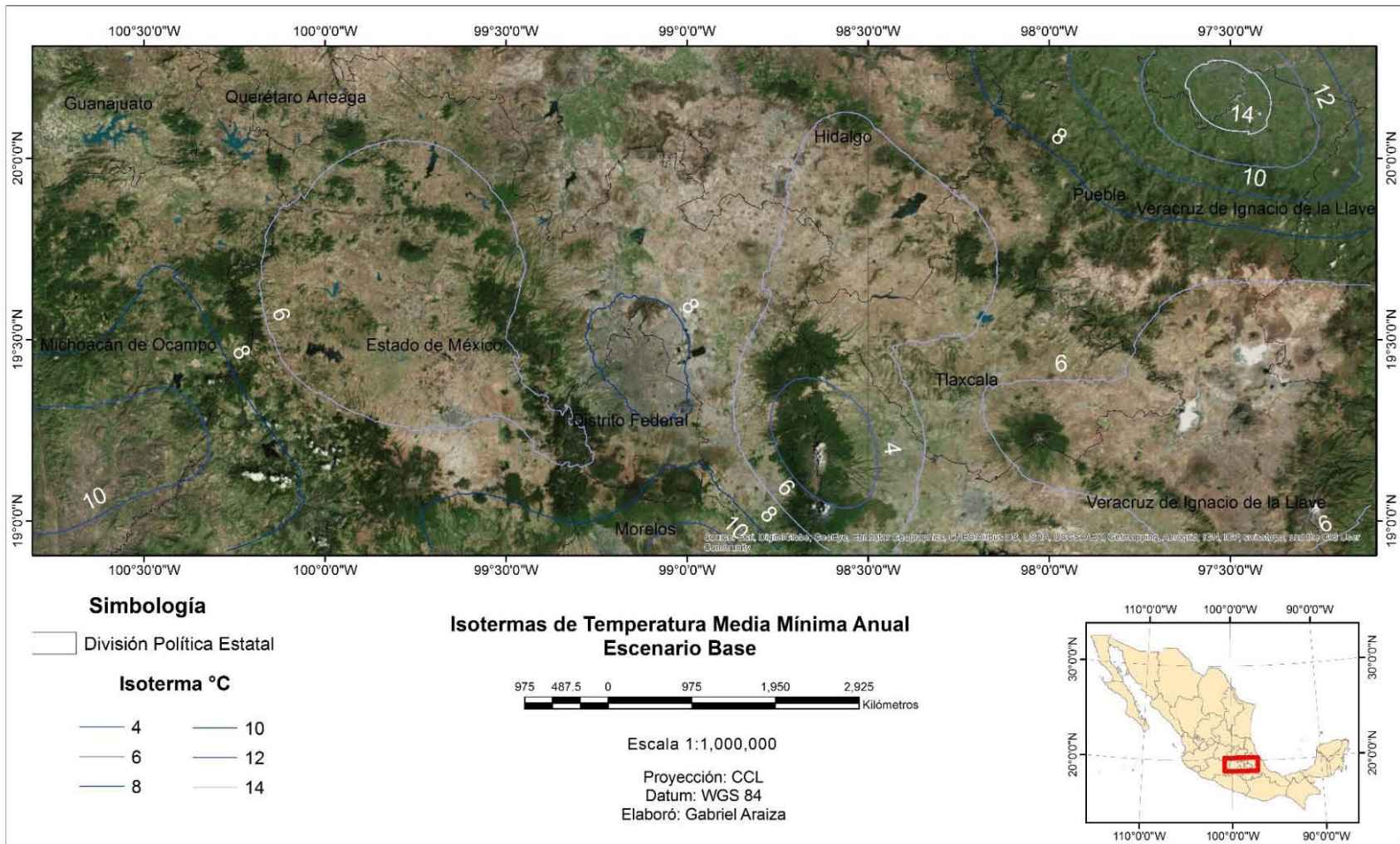
Mapa 4.1. Temperatura Media Anual. Fuente: Araiza-Olivares.



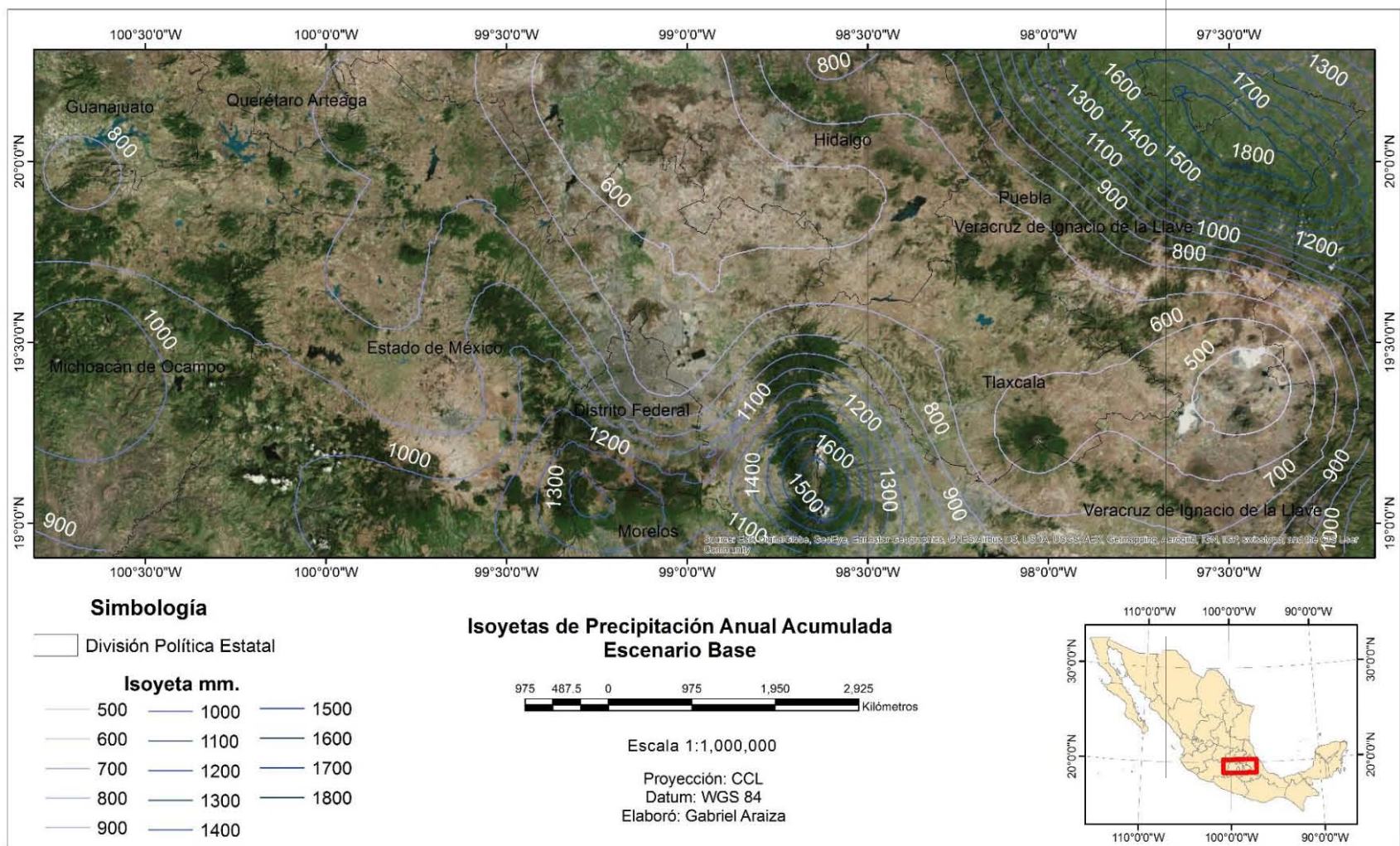
Mapa 4.2. Temperatura Media Máxima. Fuente: Araiza-Olivares.



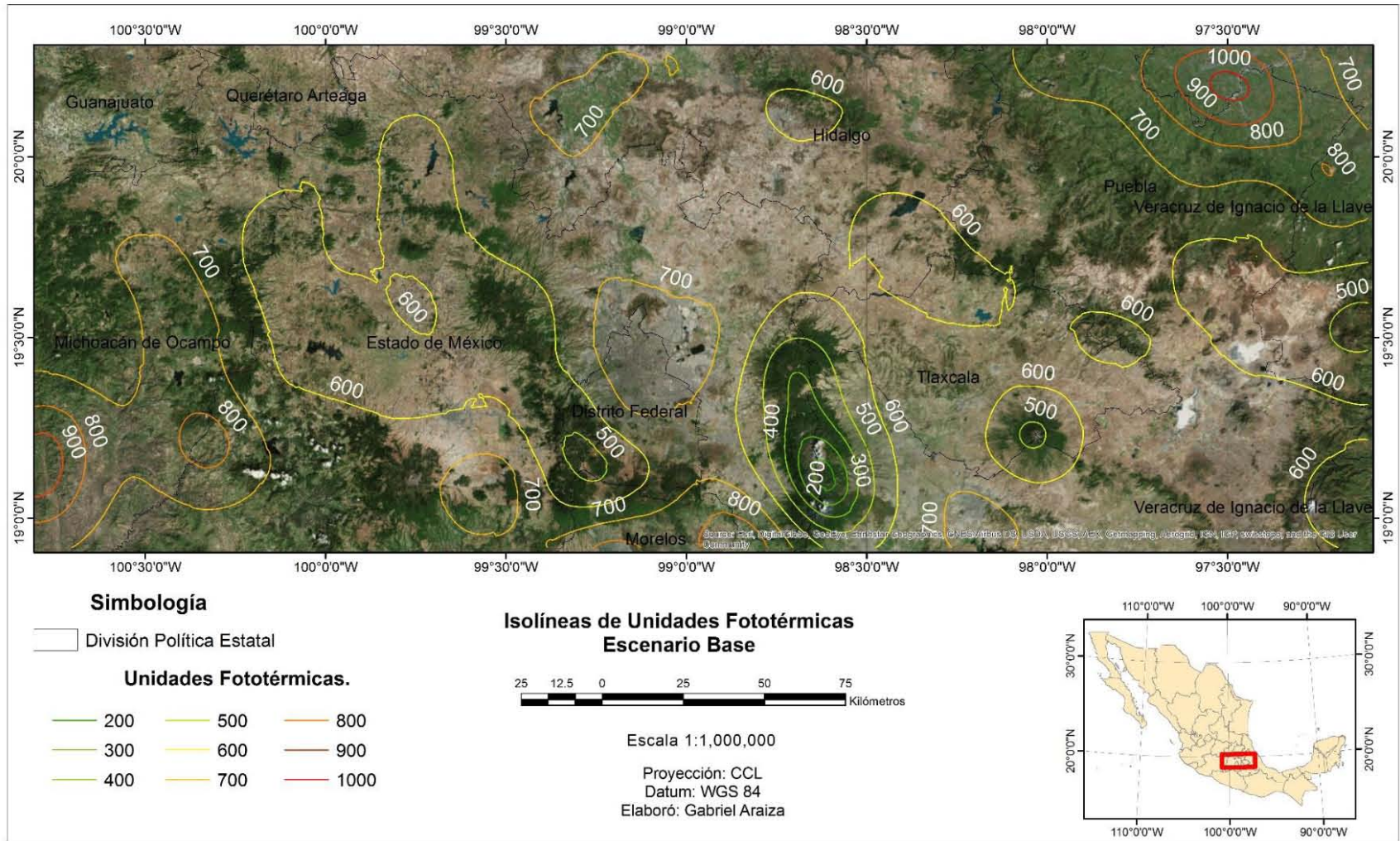
Mapa 4. 3. Temperatura Media Mínima. Fuente: Araiza-Olivares.



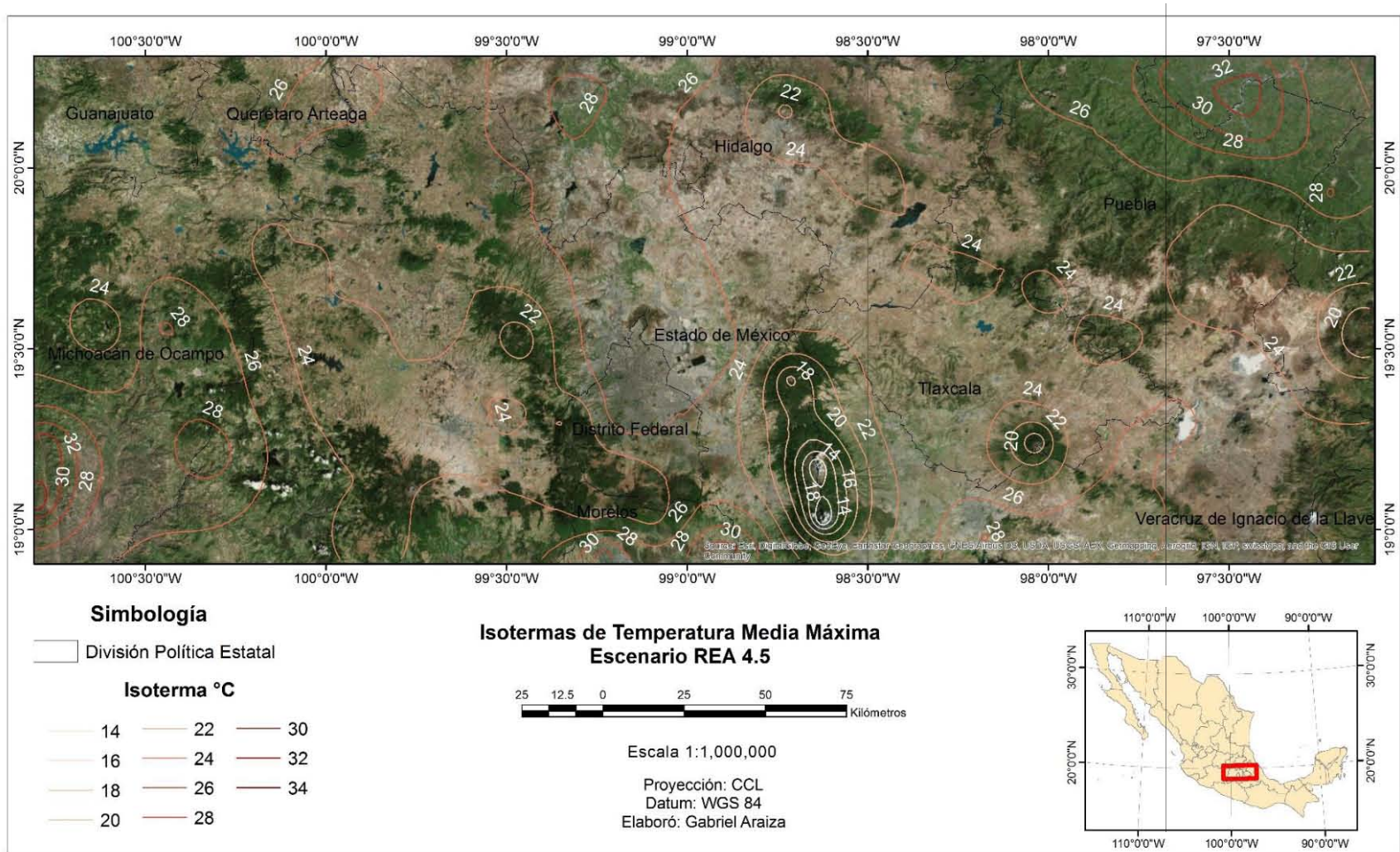
Mapa 4.4 Precipitación Anual Acumulada. Fuente: Araiza-Olivares.



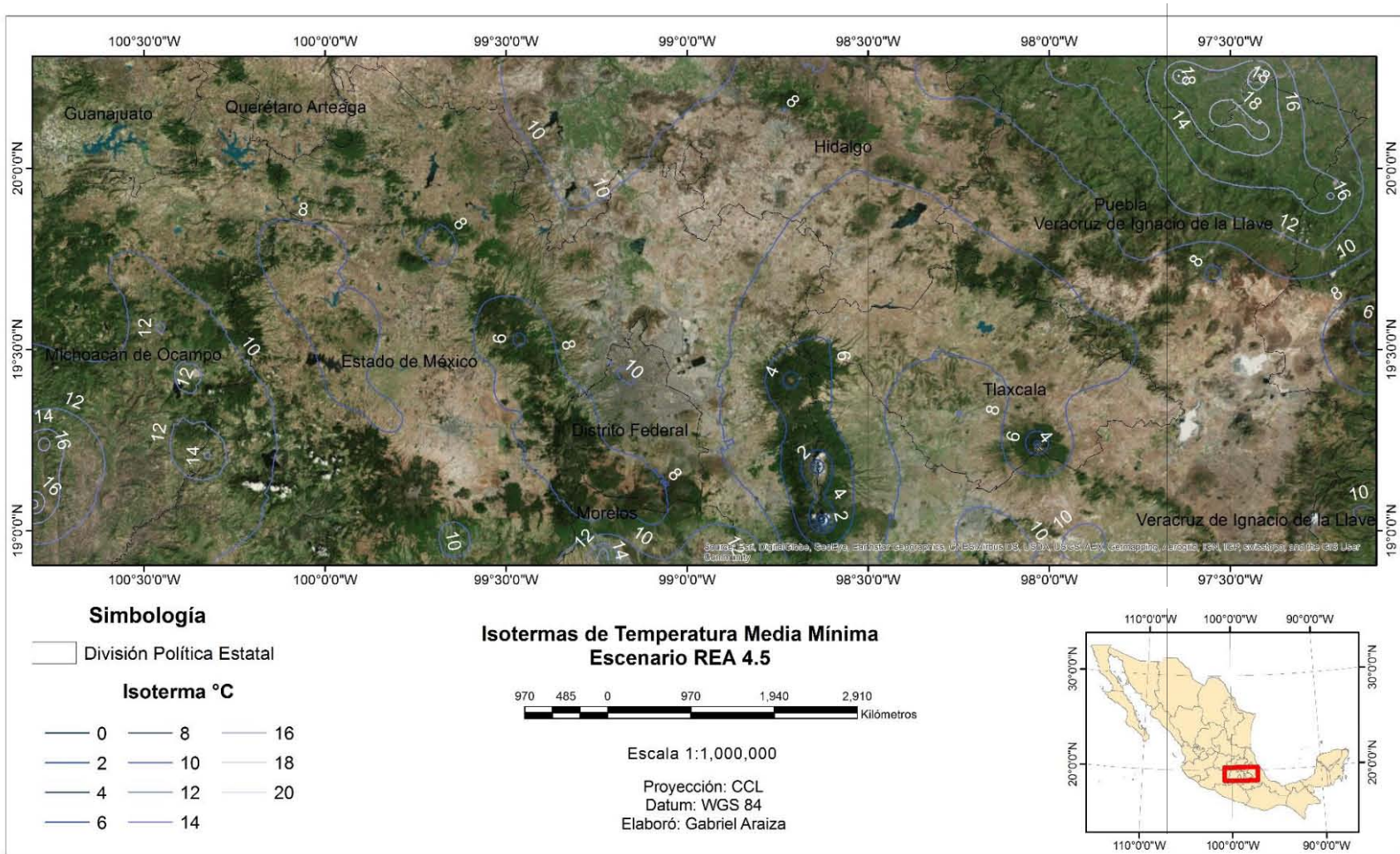
Mapa 4.5. Unidades Fototérmicas. Fuente: Araiza-Olivares.



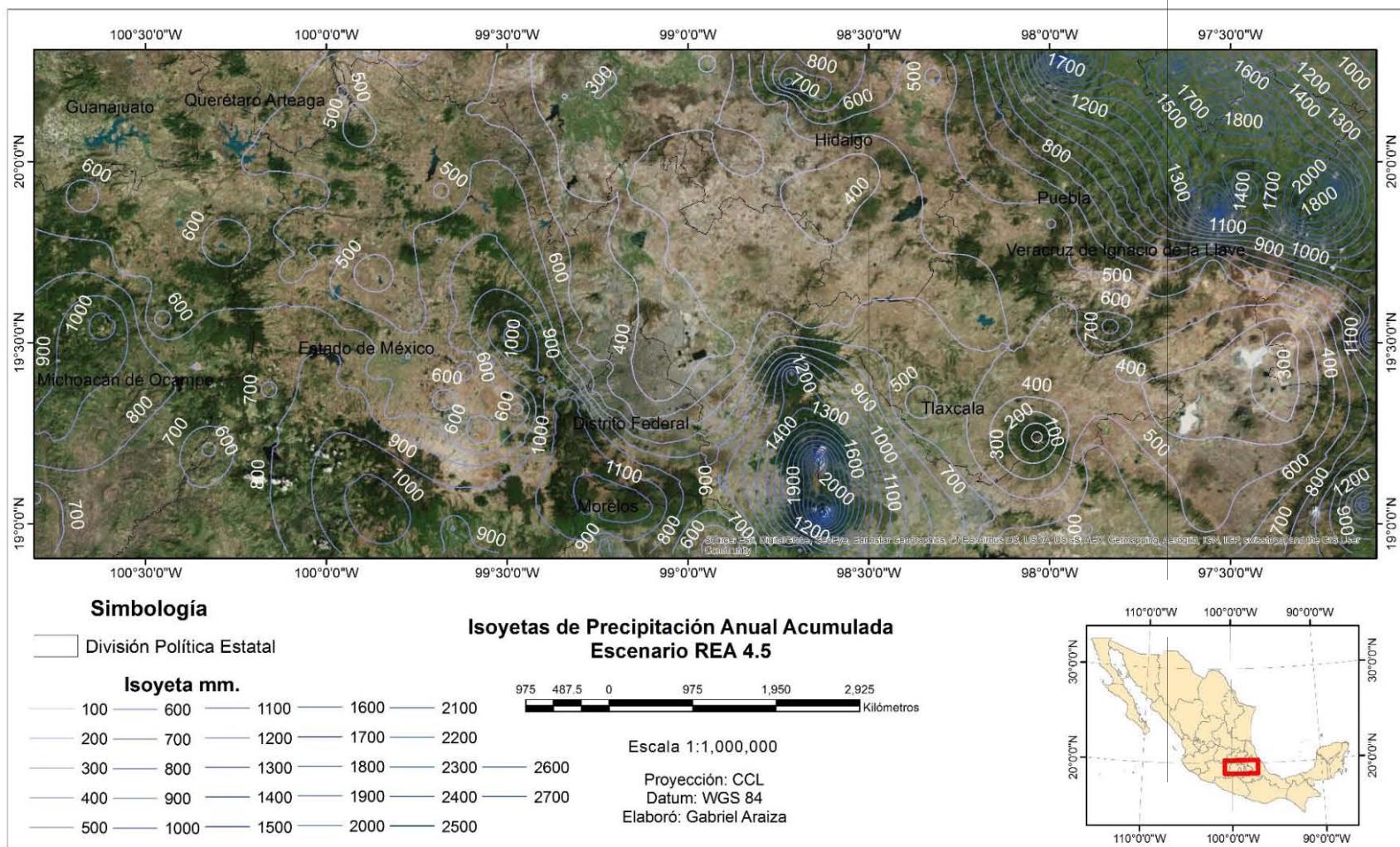
Mapa 4.7. Temp. Media Máxima REA 4.5. Fuente: Araiza-Olivares.



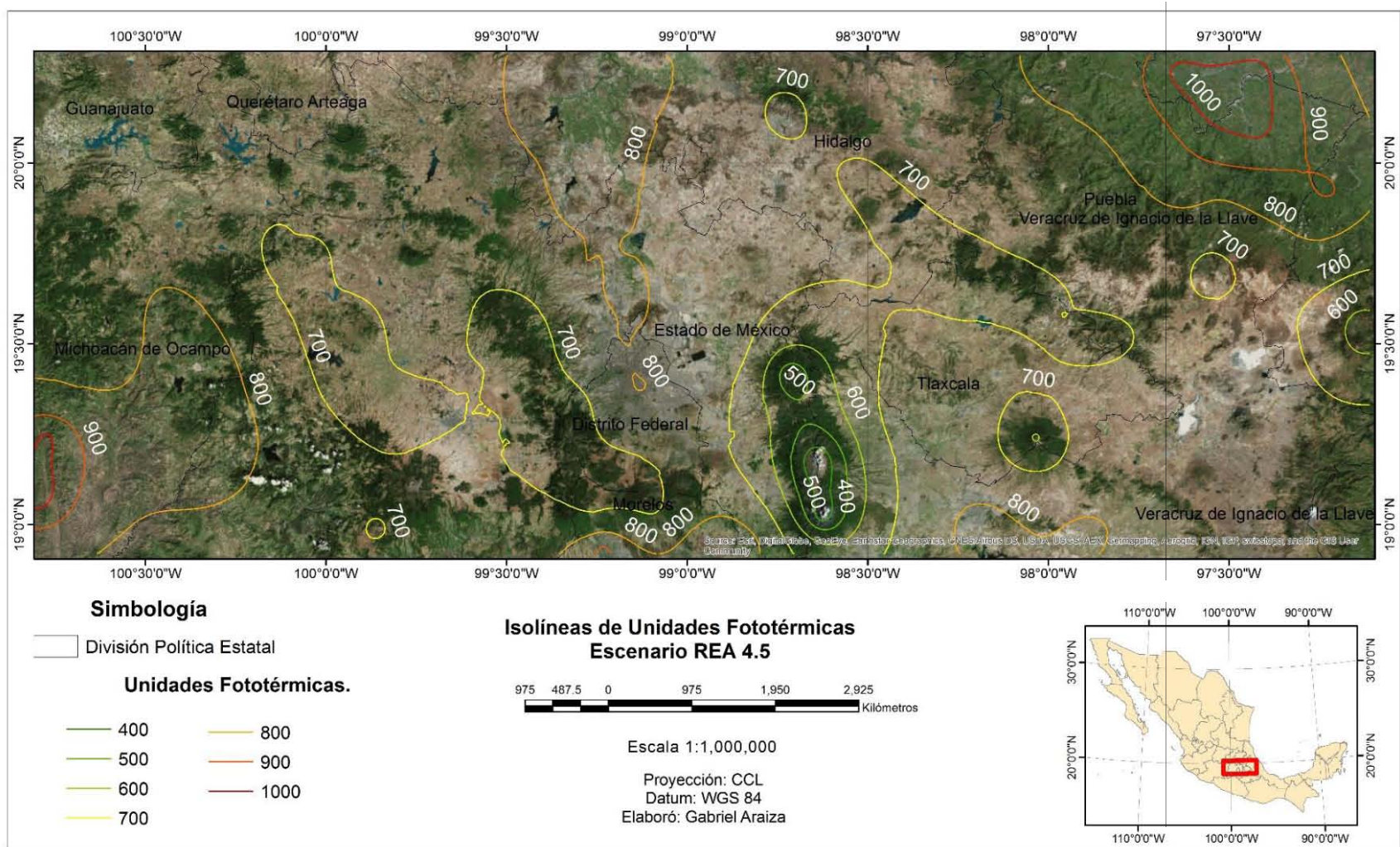
Mapa 4.8. Temp. Media Mínima REA 4.5. Fuente: Araiza-Olivares.



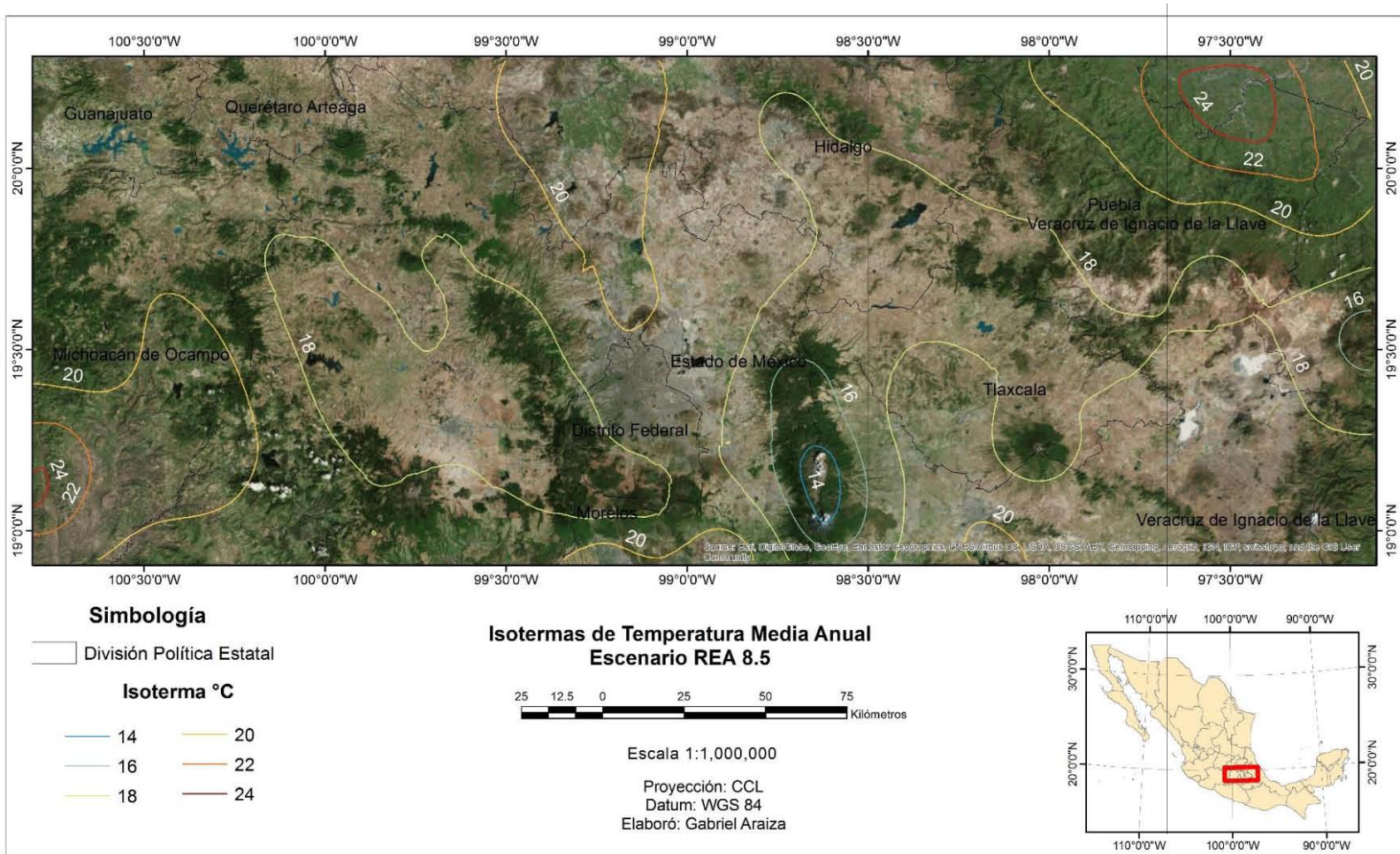
Mapa 4.9. Precipitación REA 4.5. Fuente: Araiza-Olivares.



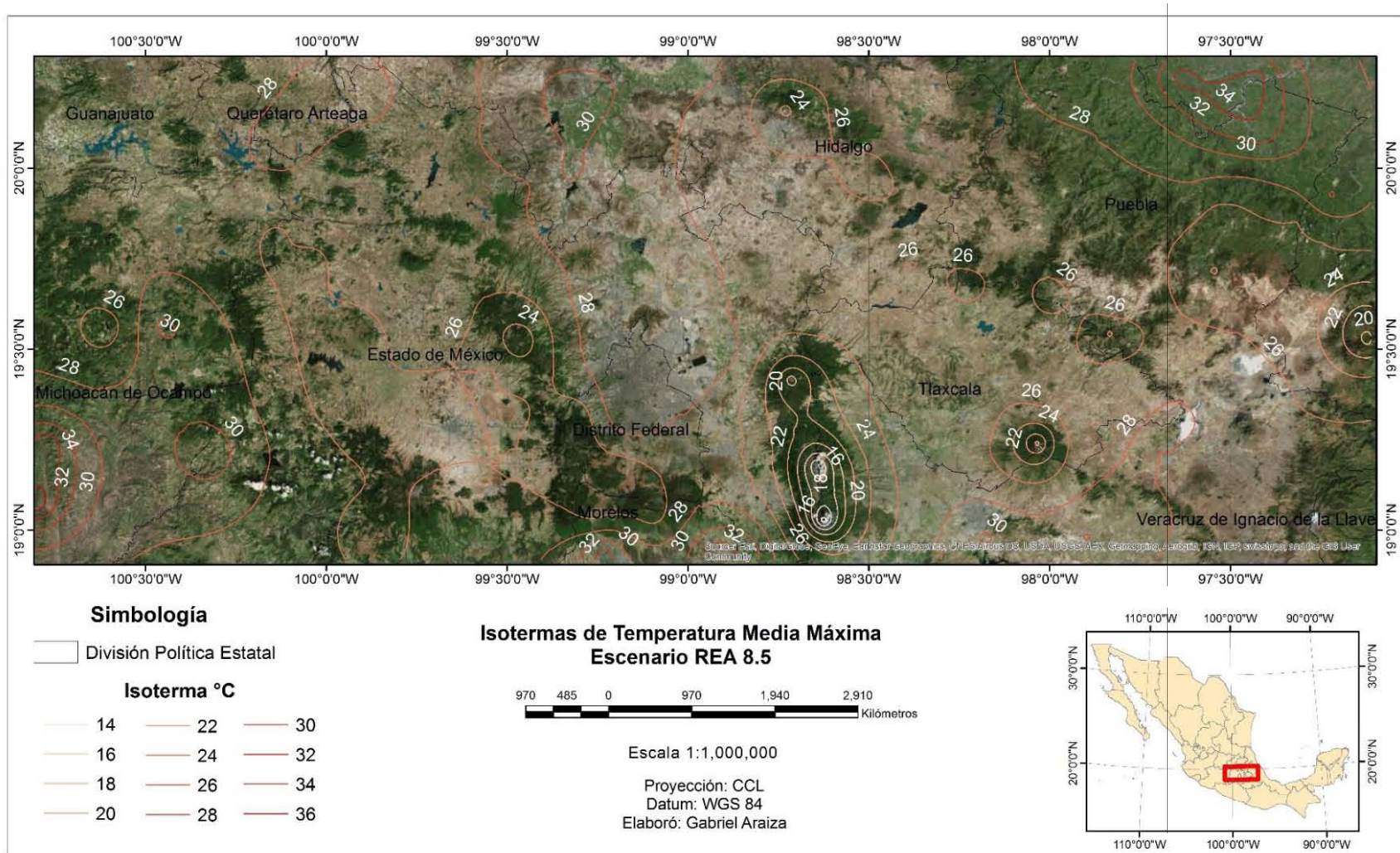
Mapa 4.10. Unidades Fototérmicas REA 4.5. Fuente: Araiza-Olivares.



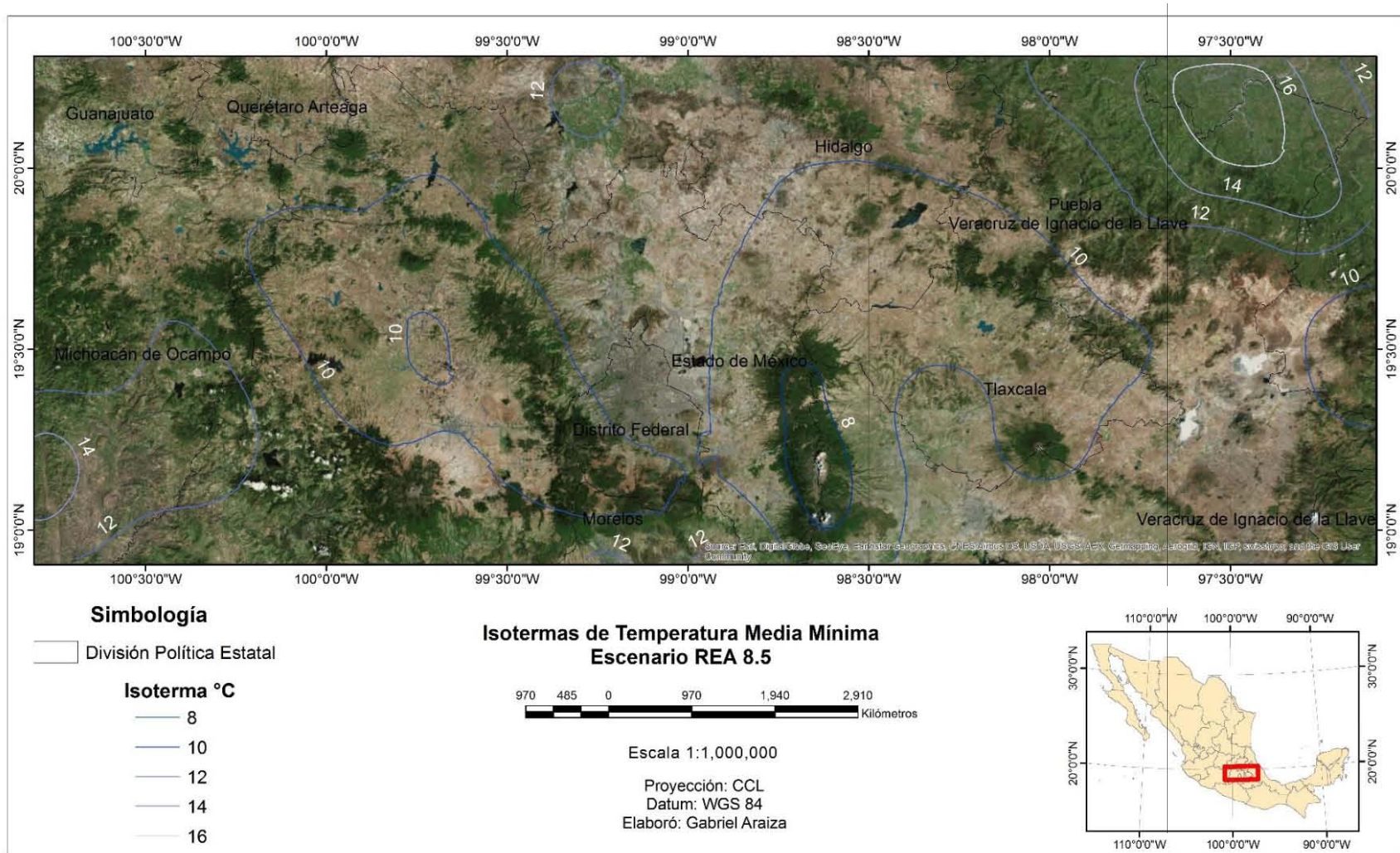
Mapa 4.11. Temp. Media Anual REA 8.5. Fuente: Araiza-Olivares.



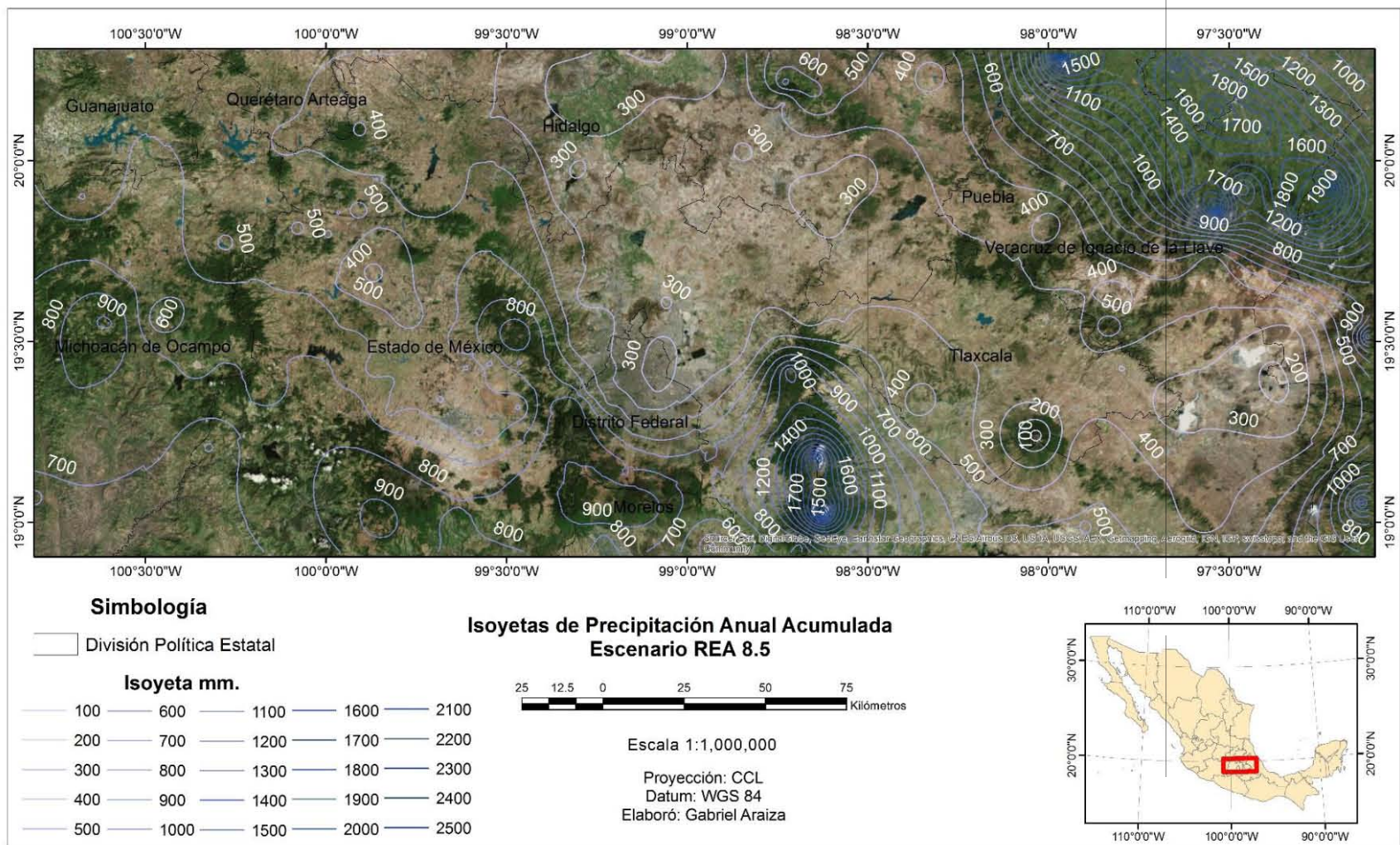
Mapa 4.12. Temp. Media Máxima REA 8.5. Fuente: Araiza-Olivares.



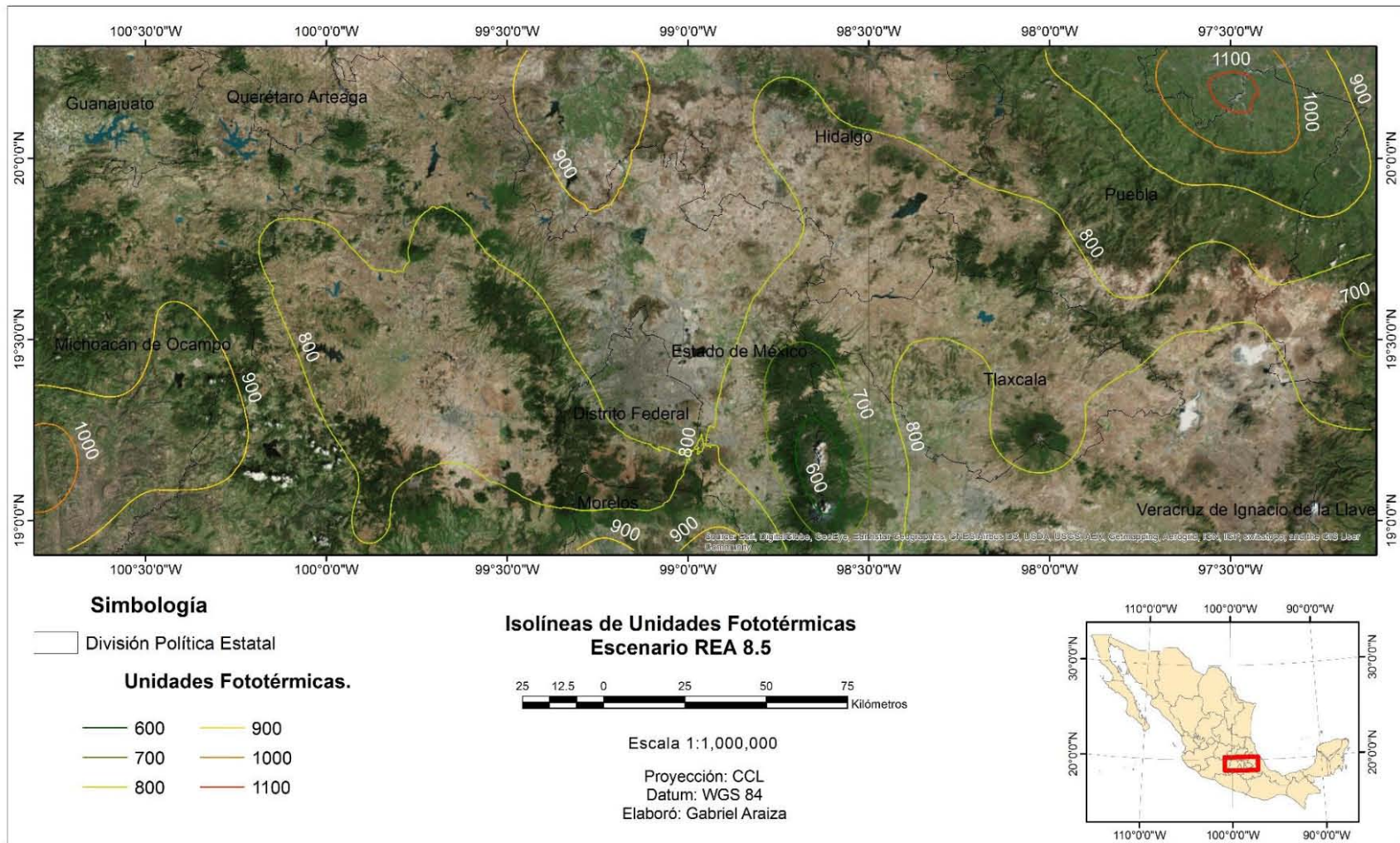
Mapa 4.13. Temp. Media Mínima REA 8.5. Fuente: Araiza-Olivares.



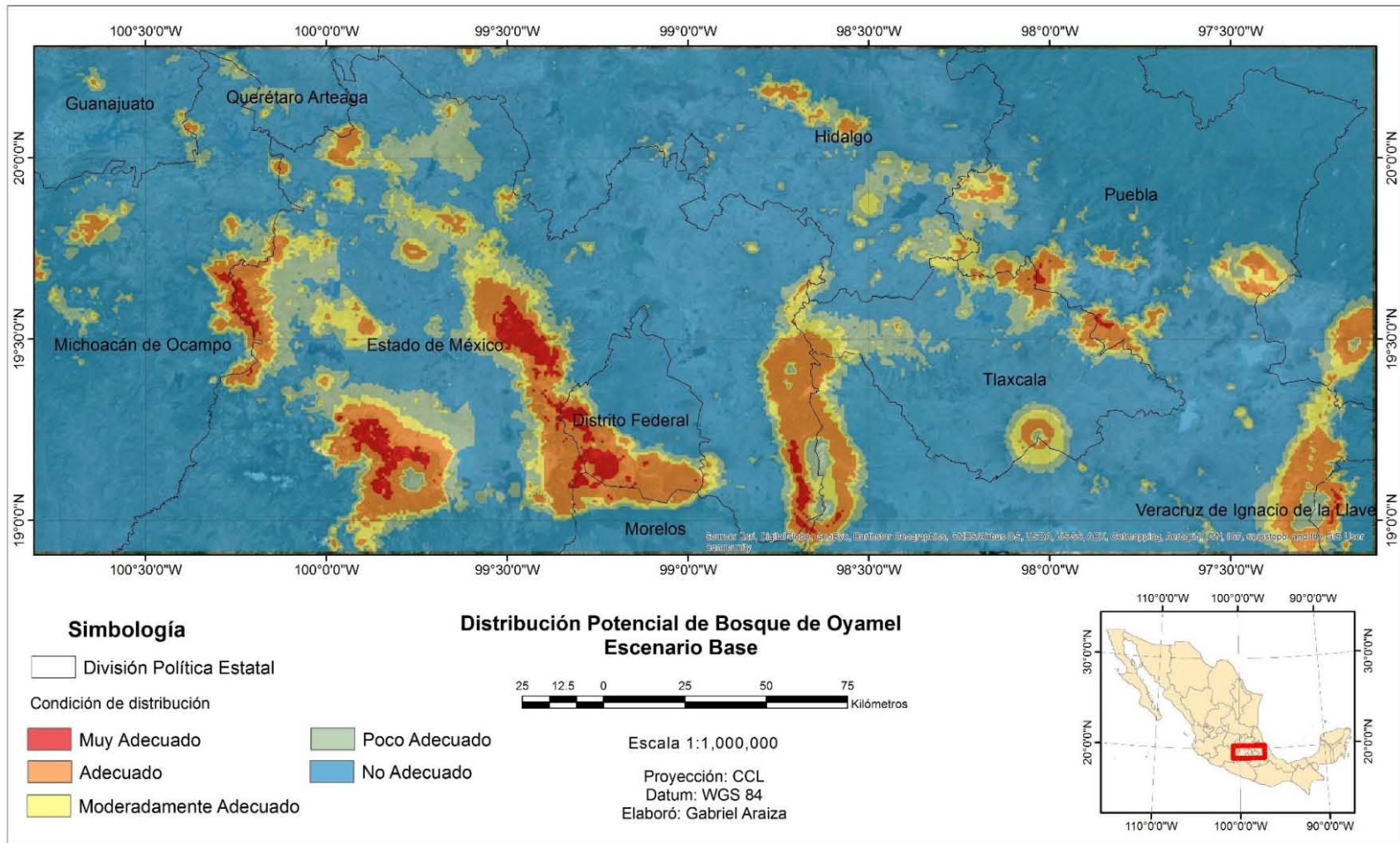
Mapa 4. 14. Precipitación REA 8.5. Fuente: Araiza-Olivares.



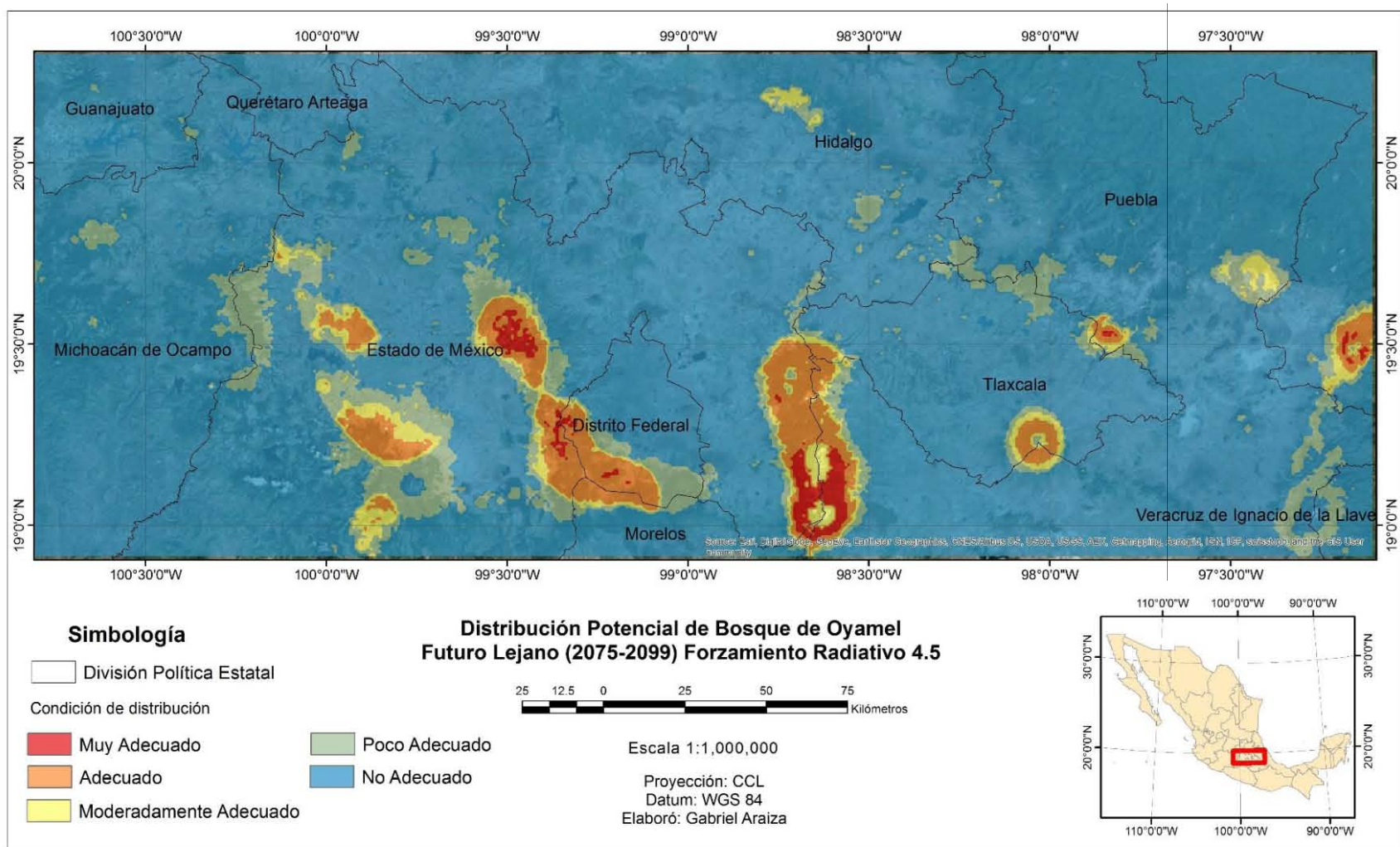
Mapa 4.15. Unidades Fototérmicas REA 8.5. Fuente: Araiza-Olivares.



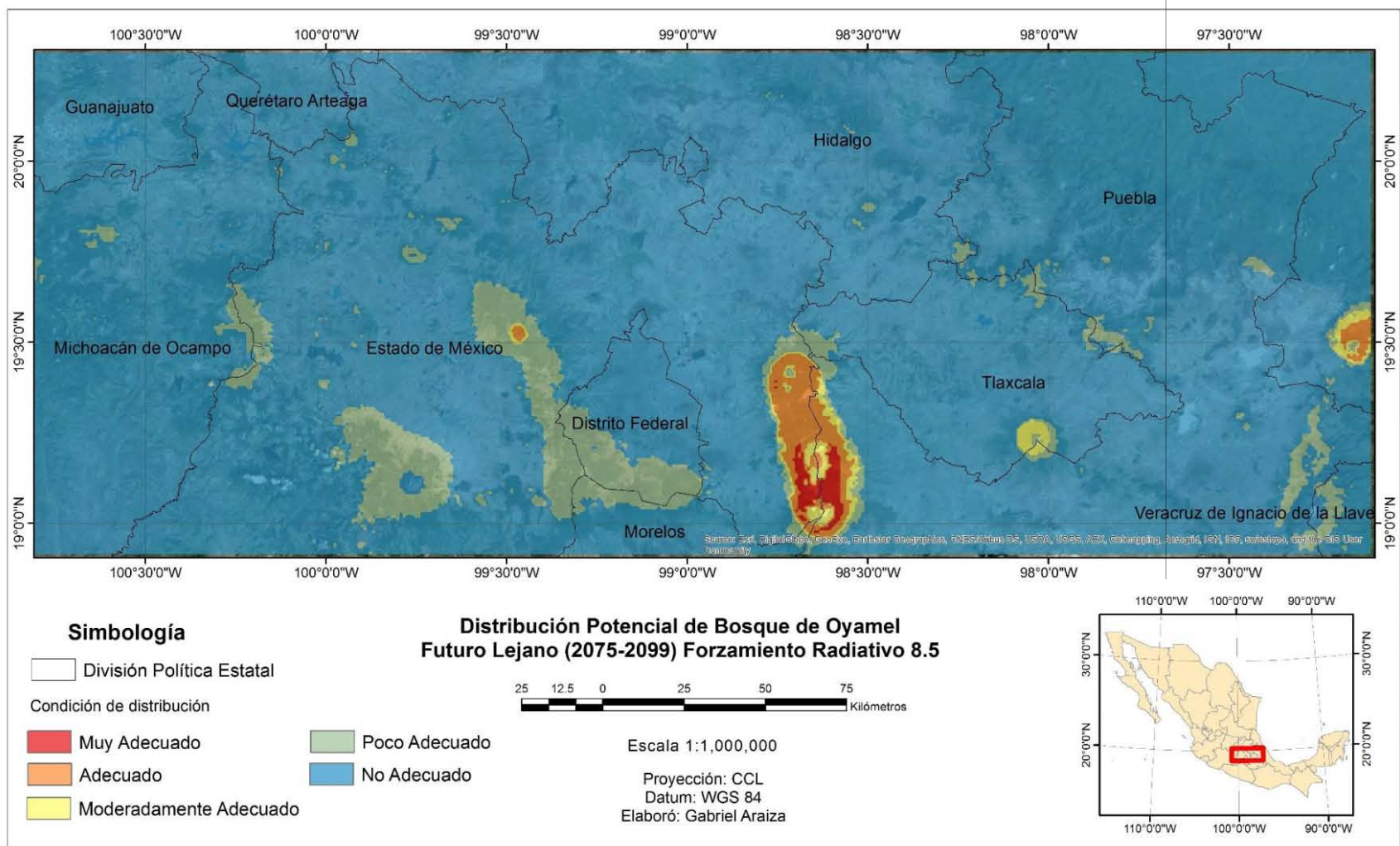
Mapa 4.16. Dist. Potencial de Oyamel Línea Base. Fuente: Araiza-Olivares.



Mapa 4.17. Dist. Potencial de Oyamel REA 4.5. Fuente: Araiza-Olivares.



Mapa 4. 18. Dist. Potencial del Oyamel REA 8.5. Fuente Araiza-Olivares.



Documental y trabajo de campo. El bosque de oyamel es un ecosistema con una gran biodiversidad; aporta importantes servicios ambientales a las poblaciones que se ubican dentro y fuera de sus límites geográficos, así mismo el potencial económico resulta en una importante palanca de desarrollo.

A través de la investigación documental y el trabajo de campo, se identificaron elementos que juegan un papel importante en miras a la conservación de este ecosistema. Lo anterior se conjunta en un análisis FODA (figura 4.1).

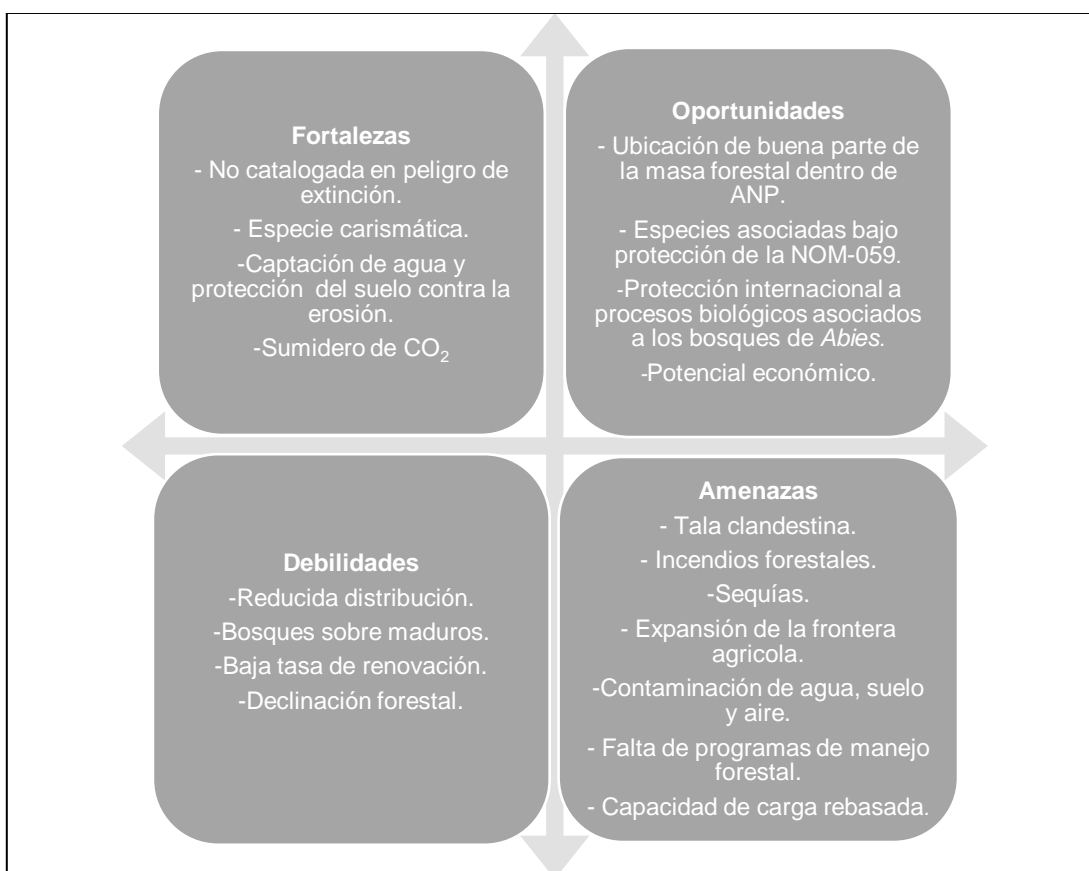


Figura 4.1. Análisis FODA. Fuente: Araiza-Olivares.

Fortalezas:

- *Abies religiosa* actualmente no se clasifica como una especie en peligro de extinción puesto que dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010 no se encuentra enlistada como sujeta a protección, mientras tanto, en la *Red List* elaborada por la UICN se ubica en la categoría de *Preocupación Menor*.
- El uso ornamental como parte de celebraciones religiosas otorgan al oyamel un valor patrimonial.
- Entre los diversos servicios ambientales que provee destacan la captación e infiltración de agua proveniente de las abundantes precipitaciones, la regulación de la escorrentía, lo que evita la erosión de los suelos.
- Los bosques de oyamel representan importantes sumideros de carbono, ya que de él obtienen la materia necesaria para su desarrollo, principalmente en aquellos individuos que se encuentran en etapas juveniles de desarrollo; llegan a rebasar las 130 ton/ha/año.

Oportunidades:

- Un porcentaje importante de las masas forestales de *Abies* se localizan dentro de los límites de distintas ANP, bajo diferentes categorías tanto a nivel local como federal, lo cual proporciona cierto nivel de protección. Destacan a nivel federal: RB de la Mariposa Monarca, APFF Nevado de Toluca, PN Insurgente Miguel Hidalgo (La Marquesa), PN Desierto de los Leones, PN Lagunas de Zempoala, PN Iztaccíhuatl-Popocatepetl, PN La Malinche, PN Cofre de Perote y PN Pico de Orizaba; a nivel estatal sobresalen: PE Santuario del Agua Presa Corral de Piedra, PETR Zempoala-La Bufa, PE Santuario del Agua y Forestal Subcuenca tributaria Río San Lorenzo y los PE Santuarios del Agua y Forestal Salto de Atlautla y Cascadas Diamante.
- Los bosques de oyamel tienen un papel fundamental para la subsistencia de gran variedad de organismos, algunos de ellos sujetos a protección mediante la NOM-059-SEMARNAT-2010, sobresale la mariposa monarca (*Danaus plexippus*). Se han localizado sitios de hibernación más grandes dentro de la

RB Mariposa Monarca, sin embargo, existen otros de menor extensión en PE Santuario del Agua Presa Corral de Piedra y el PN Iztaccíhuatl-Popocatepetl. Otra especie enlistada en la mencionada norma es el ajolote (*Ambystoma altamirani*) la cual ha sido localizada en el PN Lagunas de Zempoala y el PN Desierto de los Leones y cuyo hábitat depende directamente de la captación de agua por parte de los bosques (CONANP, 2009).

- La migración de la mariposa monarca es uno de los procesos biológicos más reconocidos a nivel mundial, debido a ello, la UNESCO en 2008 la declaró como patrimonio natural de la humanidad.
- El alto valor que supone la producción tanto maderable como no maderable proveniente de los bosques de oyamel representa beneficios económicos principalmente para las comunidades indígenas establecidas en sus inmediaciones.

Debilidades:

- El bosque de oyamel es de carácter relictual, su presencia se restringe a sitios cuyas condiciones ambientales son similares a las prevalecientes en épocas anteriores y resultan favorables.
- La sobre-madurez y la baja tasa de renovación del bosque se encuentran estrechamente vinculados. Se ha observado que los bosques con superficies perturbadas, principalmente a causa de incendios; tienen un número importante de claros, ello permite la entrada de luz solar al sotobosque lo que favorece la renovación natural del bosque y a su vez una mayor actividad fotosintética y de captura de carbono.
- La declinación forestal es un fenómeno que afecta severamente la salud del bosque; se trata de un problema multifactorial, del cual se desprende el estrés de los individuos y causa síntomas como la clorosis, la senescencia prematura, la pigmentación anormal en hojas, el menor diámetro lo que desemboca en la muerte del individuo. Entre las posibles causas están la contaminación del aire y el suelo, así como el ataque de plagas y enfermedades.

Amenazas:

- La tala clandestina es una gran amenaza que afecta a los bosques en general. Diversos grupos criminales, ante la demanda, han visto una manera de hacerse de recursos económicos mediante la explotación de la madera, la cual es comerciada en mercados no regulados.
- A pesar de que los bosques de oyamel son usualmente húmedos y la incidencia de incendios es relativamente baja, se han presentado eventos que han afectado considerablemente al arbolado, estos en su mayoría son provocados. Todo ello debilita al árbol, lo que repercute en su mayor vulnerabilidad ante el ataque de enfermedades y plagas.
- Las sequías son otro elemento que amenaza la supervivencia del bosque de oyamel, pues su régimen ombrotérmico requiere de una alta humedad. Los fenómenos de variabilidad climática, así como el cambio climático global pueden incrementar la incidencia de eventos de sequía extrema.
- La expansión de la frontera agrícola ha significado una importante fragmentación de los bosques y su eventual pérdida en una parte importante del territorio.
- La contaminación del aire, la tierra y el suelo son factores que podría estar involucrados en el fenómeno de declinación forestal en zonas cercanas a las grandes ciudades. En el caso del PN Desierto de los Leones se ha observado el efecto negativo de la contaminación al debilitar fuertemente el arbolado y ha desembocado en la muerte masiva de ejemplares formando los llamados cementerios.
- La carencia de programas de manejo para la explotación forestal específica ha llevado a una progresiva pérdida de la cubierta vegetal debido a la tala inmoderada, principalmente con fines comerciales.
- El bosque de oyamel es para el turismo, sin embargo, se constató en trabajo de campo, que la asistencia masiva ha traído consigo problemas como la contaminación sonora, del suelo, y el agua; la extracción de flora y la destrucción de brotes de regeneración natural.

Capítulo 5. Discusión

El cambio climático es uno de los mayores retos de la sociedad a nivel mundial. Sus efectos a largo plazo no se conocen con certeza, a medida que avanza el tiempo, las investigaciones en torno a distintas temáticas en los que atiende este fenómeno arrojan nueva información útil con objeto de prevenir y adaptarse ante nuevas condiciones.

Los esfuerzos para reducir la degradación ambiental han transitado por distintas fases históricas, desde el conservacionismo estricto donde el manejo de los recursos estaba restringido a las clases dominantes a los nuevos paradigmas que abrazan modelos de gestión encabezados por las comunidades locales en búsqueda de conservar la riqueza biológica y del desarrollo sustentable, mismo que eventualmente cambiará para adaptarse a la realidad a las que hagan frente.

El tema del cambio climático al tomar cada vez mayor relevancia ha impulsado grandes acuerdos en la política internacional que buscan favorecer el crecimiento económico a través, principalmente, del desarrollo sustentable, con el fin de reducir la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera y con ello limitar el incremento de la temperatura global a menos de 2°C.

México, a pesar de contar con un marco legal e instituciones que consideran al cambio climático, aún requiere fortalecer la infraestructura institucional, como lo es la adquisición de información climatológica en cantidad y calidad suficiente para incrementar el estado del arte a través de investigaciones y cuyas proyecciones se presenten con mayor certeza, de tal manera que los mecanismos de adaptación y mitigación tengan el efecto deseado.

El uso de modelos de circulación regional, así como de escenarios con distintos forzamientos radiativos y diferentes horizontes temporales, ha permitido realizar estudios específicos con un grado de detalle más alto, lo que conlleva a la posibilidad de identificar los sitios más vulnerables y con ello a la formulación de políticas más eficientes. Sin embargo, en todos los casos presentan incertidumbre.

El uso de diferentes sistemas informáticos resulta efectivo para la modelación y la proyección de la distribución en diferentes horizontes temporales de los bosques de oyamel a lo largo del Sistema Volcánico Transversal, sirve como una herramienta que permite la identificación de zonas en las cuales el bosque de oyamel se verá más afectado, así como los posibles nichos donde es posible llevar a cabo trabajos que permitan la conservación del ecosistema a través de la formulación de planes y programas de manejo.

A pesar de ello, persiste la limitante de la disponibilidad de información climatológica para la realización de estudios de este corte, debido a la escasez de estaciones dentro de zonas boscosas, sin embargo, los usos de métodos estadísticos ayudan a cubrir parcialmente estas deficiencias.

La restauración del ecosistema es una de las vías por las que se puede alcanzar la conservación de la especie; la utilización germoplasma de distintas procedencias puede ser adecuada debido a la variación genética lo cual permite el desarrollo de la especie en sitios donde se encontraba y alcanzar un estado más saludable y vigoroso (Ashby, 1987; Rodríguez-Trejo, 2006; García-Quintana *et al.*, 2007 en Benavides, Gazca *et al.*, 2011).

La correcta gestión de los recursos forestales brinda no sólo beneficios económicos, sino que ayuda a la conservación y renovación del bosque mismo lo cual, además, se refleja en el incremento de la capacidad de captura de carbono debido a la alta actividad fotosintética de los árboles jóvenes (Razo-Zarate *et al.*, 2015).

Durante los recorridos de campo en el APFF Nevado de Toluca, se constató la presencia de un número significativamente mayor de individuos jóvenes; en contraste, zonas poco perturbadas dentro del PN Desierto de los Leones tienen individuos longevos, escasos claros y baja presencia de arbolado joven, lo cual coincide con las afirmaciones antes citadas.

Capítulo 6. Conclusiones

El oyamel ocupa un nicho ecológico muy específico, ello lo coloca en una posición de fragilidad y cuya conservación resulta vital debido a los procesos biológicos que en él se generan; una cantidad importante de especies encuentra aquí el hábitat necesario para subsistir. Especies emblemáticas y catalogadas como en peligro de extinción tal como la mariposa monarca dependen en gran medida de las condiciones que le brinda el ecosistema para cumplir su ciclo vital.

Los múltiples servicios ambientales que aportan como la captura de carbono y la captación de agua se suman al gran potencial económico derivado de actividades de extracción de materias primas y ornato, así como, atractivo turístico; sin menoscabo de la relevancia patrimonial que tiene entre comunidades indígenas.

Un aspecto observado durante los recorridos en campo fue la perturbación del bosque a causa de la deficiente gestión. La tala ilegal, las invasiones de asentamientos humanos y sobre carga de visitantes, deriva en la contaminación tanto del aire (acústica); del suelo (residuos sólidos); agua (residuos sólidos) así como en la extracción de flora y fauna.

El análisis puntual de estaciones climatológicas a la escala temporal utilizada en este trabajo no permitió encontrar algún patrón claro entre la Oscilación del Sur y las condiciones de temperatura y humedad en valores acumulados que afecten de manera importante al bosque de oyamel, por lo que es deseable profundizar en el estudio de estos datos.

No obstante, la variación de las fechas de inicio o término, así como de intensidad en las lluvias y el incremento de la temperatura pueden generar cambios en detrimento de los procesos fenológicos de los árboles, generándose un estrés adicional, lo que conduciría a un estado de mayor vulnerabilidad frente al ataque de plagas y enfermedades.

Los modelos de cambio climático varían entre sí, debido a las distintas metodologías con las cuales fueron desarrolladas; ello supone un grado de incertidumbre inherente a los mismos por tanto resulta imprescindible tratarlos como

proyecciones y no predicciones, por tal razón, se juzgó prudente realizar ejercicios comparativos del escenario seleccionado *REA*, en este caso *GFDL* y *HADGEM2*.

Los ejercicios con modelos de circulación *GFDL* y *HADGEM2* mostraron ciertas coincidencias, especialmente en la variable precipitación en el forzamiento radiativo 8.5; ambos tienen cifras contrastantes con respecto al modelo ensamble *REA* especialmente en la precipitación; este último modelo presenta cambios negativos en la cantidad acumulada anual a diferencia de *GFDL* y *HADGEM2* que en su mayor parte se advierte un incremento significativo en este elemento.

La variación en la superficie de manera general fue negativa para las categorías *favorable* y *muy favorable*, excepto en el *GFDL* 8.5 donde se aprecia un incremento significativo en esta medición.

Así mismo, bajo el modelo seleccionado *REA*, se aprecia un claro ascenso vertical de las masas forestales, esto debido a que el árbol busca condiciones que le resulten más favorables para su desarrollo.

La existencia de programas de manejo para las ANP tanto federales como locales, su correcta implementación, así como su oportuna actualización, brindan la estructura jurídica necesaria para la correcta gestión y protección de los bosques y sus procesos biológicos. A pesar de ello, muchas de las ANP se encuentran desactualizados y sin documentación respecto a las evaluaciones que marca la ley.

El uso de buenas prácticas en el manejo forestal derivaría en un desarrollo económico sostenible para las comunidades asentadas en los bosques, con ello se estimula el sentido de pertenencia de las mismas y como consecuencia la protección del mismo. Esta situación se ha observado en el APFF Nevado de Toluca cuya densidad boscosa se ha recuperado cerca de 8 mil hectáreas entre 1993 y 2015 (Gómez, 2016).

El fortalecimiento al programa de pago por servicios ambientales y apoyo a la industria silvícola con el fin de estimular el desarrollo económico de las comunidades puede funcionar como un instrumento que apoye a la protección de los bosques.

Dar soporte a la creación de bancos de germoplasma y proyectos de investigación orientados a reforestación y migración asistida a altitudes mayores ante el desfase adaptativo frente al cambio climático (Castellanos, Linding *et al.*, 2014; Sáenz, 2014).

La progresiva pérdida de cobertura Arborea debido al cambio climático, sumado a las presiones de origen antrópico, no sólo representa un peligro para la conservación del oyamel en sí mismo, si no de los organismos asociados, como lo presentado en lo referente a la mariposa monarca. Ello supondría un eventual colapso en las cadenas tróficas con graves consecuencias para la biodiversidad.

La carencia de bases de datos climatológicos completos y con amplios periodos de funcionamiento, representan un obstáculo para las investigaciones en materia de cambio y variabilidad climática; corregir esta situación significaría un incremento en las potencialidades de este tipo de estudios al incrementar su confiabilidad a largo plazo.

La evolución de metodologías en la construcción de modelos globales y regionales de circulación y la publicación de subsecuentes comunicaciones nacionales de cambio climático y reportes por parte del *IPCC* hacen necesaria la constante revisión y actualización de las investigaciones del impacto del cambio y la variabilidad climática sobre los ecosistemas y más concretamente el bosque de oyamel.

Finalmente, la conservación de los ecosistemas es un tema multifactorial en el cual las autoridades deben coordinarse con las instituciones académicas para generar modelos de gestión adecuados y abiertos a la participación de las comunidades locales y la sociedad en general encaminadas a generar soluciones consensuadas que permitan un desarrollo sostenible que resulte en ambientes más sanos para todos.

Bibliografía

- Aguirre, C., Villa, A. (Editores) (1995) *Cooperación social para el manejo sostenible de los ecosistemas forestales: Quinto simposium bienal México/Estados Unidos de América*. 17-20 octubre de 1994. Guadalajara, Jalisco, México.
- Alonso, A., Arellano, A. (1989) *Mariposa Monarca. Su hábitat de hibernación en México*. Revista Ciencias, No. 15, pp. 6-11.
- Aranda, R. (12 de junio 2005) *Resurge la fauna en zona restringida del Popocatepetl; vuelven lince, coyote, tecolote y aguililla de cola roja*. Diario Crónica. Consultado el 6 de abril de 2017. En línea: <http://www.cronica.com.mx/notas/2005/215334.html>
- Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas (2000) *Declaración autorizada, sin fuerza jurídica obligatoria, de principios para un consenso mundial respecto de la ordenación, la conservación y el desarrollo sostenible de los bosques de todo tipo*. Conferencia 151/26, Vol III. Consultado el 6 de marzo de 2016. En línea: <http://www.un.org/documents/ga/conf151/spanish/aconf15126-3annex3s.htm>
- Ayllón, T. (2003) *Elementos de meteorología y climatología*. Ed. Trillas. México.
- Bahia, P., Souza, A., de Oliveira, E., (2013) *Áreas naturais protegidas: Um breve histórico do surgimento dos parques nacionais e das reservas extrativistas*. Revista Geográfica de América Central, No. 50, pp. 195-213.
- Barrios, M., Zanetti, V., Fraga, C., Nince, P., Campelo Júnior, J., Lobo, F. (2010) *Unidades fototérmicas e temperatura-base inferior de frutos de Mangueira Alfa, Na baixada*. Revista Brasileira de Fruticultura, Vol. 32, No. 2, pp. 479-485.

- Bello, L. (2014) *Escenarios de cambio climático regionalizados para la reserva de la biosfera, Sierra Gorda Guanajuato mediante el modelo LARS-WG*. Tesis de Licenciatura. Colegio de Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM.
- Benavides, H., Gazca, M., López, S., Camacho, F., Fernández, D., de la Garza, M., Nepamuceno, F. (2011) *Variabilidad en el crecimiento de plántulas de ocho procedencias de Abies religiosa (H.B.K.) Schlecht. et Cham., en condiciones de vivero*. Madera y Bosques, Vol. 17, No. 3, pp. 83-102.
- Boyer, C. (2007) *Revolución y paternalismo ecológico: Miguel Ángel de Quevedo y la política forestal en México, 1926-1940*. Historia Mexicana, Vol. 42, No. 1, pp. 91-138.
- Bray, D. (2011) *Las políticas públicas y el desarrollo forestal en México: Una historia de éxitos y retos*. Seminario internacional sobre evaluación de políticas públicas forestales.
- Brenner, L. (2009) *Aceptación de políticas de conservación ambiental: el caso de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca*. Economía, Sociedad y Territorio, Vol. 9, No. 30, pp. 259-295.
- Buzai, G. Baxendale, C. (2011) *Análisis socioespacial con sistemas de información geográfica*. Tomo 1 Perspectiva científica, Temáticas ráster. Editorial Lugar. Argentina.
- Caballero, M., Lozano, S., Ortega, B. (2007) *Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: Una perspectiva desde las ciencias de la Tierra*. Revista Digital Universitaria, Vol. 8, No. 10. Consultado el 20 de mayo de 2017. En línea: <http://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/int78.htm>
- Calderón, C. (2012) *Estadística para estudiantes de Administración de Empresas*. Universidad Nacional del Callao. Facultad de Ciencias Administrativas. Instituto de Investigación. En línea: [http://www.unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Final es_Investigacion/IF_JUNIO_2012/IF_CALDERON%20OTOYA_FCA/](http://www.unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Final_es_Investigacion/IF_JUNIO_2012/IF_CALDERON%20OTOYA_FCA/). Consultado el 22 de diciembre de 2016.

- Castañeda, J. (2006) *Las áreas naturales protegidas de México, de su origen precoz a su consolidación tardía*. Scripta Nova Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales. Vol. 10 No. 218 (13). Universidad de Barcelona.
- Castejón, O. (2011) *Diseño y análisis de experimentos con Statistix*. Universidad Rafael Urdaneta. Fondo Editorial Biblioteca, Maracaibo, Venezuela.
- Castellanos, D., Linding, R., Silva, M., Sáenz, C. (2014) *Zonificación altitudinal provisional de Abies religiosa en un área cercana a la Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca, Michoacán*. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. Vol. 20, No. 20, pp. 215-225.
- Castillo, J. (2011) *Factores de influencia en el enraizamiento de estacas de Abies religiosa (H.B.K) Schl. Et Cham*. Tesis de maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas.
- Castillo, J., López, M., López, J., Cetina, V., Hernández, T. (2013) *Factores de influencia en el enraizamiento de estacas de Abies religiosa (Kunth) Schtdl. et Cham*. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, Vol. 19, No.1, pp. 175-184.
- Castro, C., Bauer, L., Trinidad, A., Carrillo, R., (2007) *Cadmio, plomo, níquel y zinc en suelos del Parque Desierto de los Leones*. Terra Latinoamericana, Vol. 25, No. 2, pp. 95-103.
- Cavazos, T., Salinas, J., Martínez, B., Colorado, G., de Grau, P., Prieto, R., Conde, A., Quintanar, A., Santana, J., Romero, R., Maya, M., Rosario, J., Ayala, M., Carrillo, H., Santiesteban, O., Bravo, M. (2013) *Actualización de los escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la quinta comunicación nacional. Informe final del proyecto al INECC*. Consultado el 1 de septiembre de 2016. En línea: <http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.html>. 150 pp.
- Cervantes, P. (2008) *Media, varianza y desviación estándar*. Ciencia y Mar, Vol. 12, No. 34, pp. 29-36.

Challenger, A. (1998) *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro*. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, Instituto de Biología de la UNAM, Agrupación Sierra Madre S.C. México.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2001) *Programa de manejo Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca*. México.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2006) *Programa de conservación y manejo Parque Nacional El Chico*. México.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2009) *Monitoreo del Ajolote (Ambystoma altamirani) en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala*. Consultado el 7 de julio de 2017. En línea: <http://www.conanp.gob.mx/acciones/fichas/zempoala/info/info.pdf>

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2010) *Monitoreo de las colonias de hibernación de la mariposa monarca (Danaus plexippus) en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca*. Consultado el 5 de abril de 2017. En línea: <http://www.conanp.gob.mx/acciones/fichas/mariposa/info/info.pdf>

Comisión Nacional Forestal, Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza (2013) *El Fondo Monarca. Un instrumento de pago por servicios ambientales en apoyo a la conservación de bosques y la retribución a las comunidades forestales*. Consultado el 6 de abril de 2017. En línea: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/7/5107monarca.pdf>

Comisión para la Cooperación Ambiental (2008) *Plan de América del Norte para la conservación de la Mariposa Monarca*. Consultado el 1 de abril de 2017. En línea: <http://www3.cec.org/islandora/es/item/2350-north-american-monarch-conservation-plan-es.pdf>

Comisión para la Cooperación Ambiental (2009) *Monitoreo de la Mariposa Monarca en América del Norte: resumen de iniciativas y protocolos*. Consultado el 5 de abril de 2017. En línea: <http://www3.cec.org/islandora/es/item/2378-monarch-butterfly-monitoring-in-north-america-es.pdf>

CONABIO, CONANP, INE, SEMARNAT, PROFEPA (2012) *Propuesta de lista de especies prioritarias para la conservación en México*. Consultado el 1 de abril de 2017. En línea: http://www.biodiversidad.gob.mx/especies/pdf/EspeciesPrioritarias/PPT_ProEspPrioritarias_Ag12_CONAVIS_DocSarukhan.pdf

Conde, A. (2015) *Indicadores de vulnerabilidad al cambio climático: ¿Cuestión de opinión?* Seminario-taller: Información para la toma de decisiones: Población y Medio Ambiente. Colegio de México. Consultado el 25 de noviembre de 2016. En línea: <http://www.inegi.org.mx/eventos/2015/Poblacion/doc/p-CeciliaConde.pdf>

Conde, C. (2006) *México y el cambio climático global*. Dirección General de Divulgación de la Ciencia, UNAM.

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (2015) *Acuerdo de París*. París, Francia.

Cortez, H., García F., Guzmán, A., (2014) *Conservando la Mariposa Monarca (Danaus Pexippus L.), conservando enemigos naturales de plagas*. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, Vol. 20, No. 3, pp. 247-253.

Cruz, D. (2013) *Adaptación a cambio climático en el área protegida Sierra Gorda, Guanajuato*. Tesis de Licenciatura. Colegio de Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM.

Díaz, G. (2012) *El Cambio Climático. Ciencia y Sociedad*, Vol. XXXVII, No. 2, pp.227-240.

Díaz, J., Monterroso, A., Tinoco, J., Toledo, M., Conde, C., Gay, C. (2011) *Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in México*. *Atmósfera*, Vol. 24, No. 1, pp. 31-52.

Dirección del Parque Nacional Izta-Popo, Subdirección de Cultura para la Conservación, Departamento de Investigación y Monitoreo (2014) *Ficha de*

identificación Abies religiosa. Consultado el 9 de marzo de 2017. En línea: http://iztapopo.conanp.gob.mx/documentos/fichas_de_especies/Abies_religiosa.pdf

Environmental Systems Research Institute (S/A) *Cómo funciona Kriging*. En línea: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-kriging-works.htm>. Consultado el 31 de diciembre de 2016.

Espinosa, A. (8 de diciembre de 2012) *Descubren otro santuario monarca*. El Diario. Consultado el 6 de abril de 2017. En línea: http://diario.mx/Nacional/2012-12-08_72fe2144/descubren-otro-santuario-monarca/

Espinoza, J. (1996) *El Niño y sus implicaciones sobre el medio ambiente*. Acta Oceanográfica del Pacífico. INOCAR. Vol. 8, No. 1, pp. 116-134. Ecuador.

Farjon, A. (2013) *Abies religiosa*. The IUCN Red List of Threatened Species 2013: e.T39592A2929657. Consultado el 1 de julio de 2017. En línea: <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T39592A2929657.en..>

Fernández, A., Zavala, J., Romero, R., Conde, A., Trejo, R. (2015) *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad, y adaptación en México y Centroamérica*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. En línea: <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas>. Consultado el 15 de diciembre de 2016.

Franquis, F., Infante, A. (2003) *Los bosques y su importancia para el suministro de servicios ambientales*. Revista Forestal Latinoamericana, No. 34, pp. 17-30.

Gay, C., Rueda, J. (Coords.) (2015) *Reporte Mexicano de Cambio Climático. Grupo I Bases Científicas. Modelos y Modelación*. Programa de Investigación en Cambio Climático, UNAM.

- Golden Gate Weather Services (2017) *El Niño and La Niña Years and Intensities*. Consultado el 11 de mayo de 2017. En línea: <http://ggweather.com/enso/oni.htm>
- Gómez, J. (Coord.) (2007) *Atlas agroclimático de la República Mexicana*. Departamento de Geografía. División de Estudios de Posgrado. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM.
- Gómez, J., Monterroso, A., Tinoco, J., Toledo, M., Conde, C., Gay, C. (2011) *Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in México*. *Atmósfera*, Vol. 23, No. 1, pp. 31-52, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.
- Gómez, L., Medina, M. (Coords.) (2012) *Guía de métodos estadísticos en climatología*. Colegio de Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. DGAPA-PAPIIME. UNAM.
- González, R., Mendoza, M., Alvarado, D. (2010) *Exposición a ozono en relación a vitalidad en un bosque de oyamel (Abies religiosa (Kunth) Schldl. & Cham)*. *Madera y Bosques*, Vol. 16, No. 4, pp. 7-19.
- Granados, D., López, G. (2001) *Declinación Forestal*. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Ambiente, Vol. 7, No. 1, pp. 5-13.
- Granados, R., Reyna, T. (Coord.) (2012) *Centro-Occidente de México. Variación climática e impactos en la producción agrícola*. Geografía para el siglo XXI. Serie: Libros de investigación, No. 9. Instituto de Geografía, UNAM.
- Greatbatch, R. (2000) *The North Atlantic Oscillation*. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, No. 14, pp. 213-242.
- Guerrero, R., González, J., Castro, A. (2014) Análisis florístico de un bosque de *Abies* y el bosque mesófilo de montaña adyacente en Juanacatlán, Mascota, Jalisco, México. *Botanical Science*, Vol. 92, No.4, pp. 541-562.
- Hernández, J., Hernández, E. (2015) Proteger lo natural, desproteger lo social. Reflexiones de los impactos de la conservación de la naturaleza en México. Pasos. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural, Vol. 13, no. 1, pp. 73-88.

- Hernández, J., Hernández, E. (2015) *Proteger lo natural, desproteger lo social. Reflexiones de los impactos de la conservación de la naturaleza en México*. Pasos Revista de Turismo y Patrimonio Cultural. Vol. 13, No. 1, pp. 73-88.
- Hernández, M., Carrasco, G., Alfaro, G. (2007) *Mitos y realidades de la sequía en México*. I.6.3. Temas Selectos de Geografía de México, Instituto de Geografía UNAM.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2016) *Escenarios de cambio climático*. Consultado el 30 de mayo de 2017. En línea: <http://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/escenarios-de-cambio-climatico-80126>
- IPCC (2014). Cambio Climático 2014. *Informe Síntesis. Contribuciones de los grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. (Equipo Principal de Redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyers (Eds.)). IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs.
- IPCC (S/A) *¿Qué es el IPCC?* Consultado el 20 de mayo de 2017. En línea: http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml
- Isasi, E. (2011) *Los conceptos de especies indicadoras, paraguas, banderas y claves: su uso y abuso en ecología de la conservación*. Interciencia, Vol. 36, No. 1, pp. 31-38.
- Ivanova, A., Cruz, X. (2013) *La estructura y el papel del IPCC y el ciclo AR5. 3er Congreso Nacional de Cambio Climático*. Programa de Investigación en Cambio Climático, UNAM.
- Jiménez, M. (2014) *Anexo del informe técnico: Elaboración de un boletín con información hidroclimática en los mares de México. Indicadores climáticos. Una manera para identificar la variabilidad climática a escala global*. Instituto Nacional de Pesca.

- Kumar, S., Stohlgren, T. (2009) *Maxent modeling for predicting suitable hábitat for threatened and endangered tree Canacomyrca monticola in New Caledonia*. Journal of Ecology and Natural Environment, Vol. 1, No. 4, pp. 94-98.
- Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable*. Diario Oficial de la Federación, 24 de enero de 2017.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Diario Oficial de la Federación, 4 de junio de 2012.
- Llorente, J., Ocegueda, S. (2008) *Estado del conocimiento de la biota, en Capital natural de México*. Vol. 1, Conocimiento actual de la biodiversidad, pp. 283-322, Conabio, México.
- López, J. (2013) *Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca: aportes para su conocimiento y conservación*. Geografía para el S. XXI, serie textos universitarios, no. 12. Instituto de Geografía, UNAM.
- Magaña, V. (Editor) (2004) *Los impactos del Niño en México*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación. México.
- Magaña, V., Pérez, J., Conde, C. (1998) *El fenómeno de El Niño y sus impactos*. Revista Ciencias, No. 51, julio-septiembre, pp. 14-18.
- Magaña, V., Pérez, J., Conde, C., Gay, C., Medina, S. (1997) *El fenómeno de El Niño y la Oscilación del Sur (ENOS) y sus impactos en México*. UNAM.
- Martínez, J., Fernández, A., Osnaya, P. (Compiladores) (2004) *Cambio climático: Una visión desde México*. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Martínez, N. (2010) *Apuntes sobre modelación de nichos ecológicos*. Laboratorio de evolución molecular y experimental. Instituto de Ecología, UNAM.
- Martínez-Méndez, N., Aguirre-Planter, E. Eguiarte, L., Jaramillo-Correa, J. (2016) *Modelado de nicho ecológico de las especies del género Abies (Pinaceae)*

en México: Algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. Botanical Sciences, Vol. 94, No. 1, pp. 5-24.

Mendoza, E. (2003) *Clasificación y ordenación de los bosques de Abies religiosa (H.B.K.) Cham & Schitchl. En la Faja Volcánica Transmexicana.* Universidad Autónoma de Chapingo.

Merino, L. (2004) *Conservación o deterioro. El impacto de las políticas públicas en las instituciones comunitarias y en los usos de los bosques de México.* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible A.C.

Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (S/A) 1< Gobierno de España. Consultado el 21 de mayo de 2017. En línea: http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/publicaciones/publicaciones/cuatriptico_IPCC-AR5_tcm7-311197.pdf

Montealegre, J. (1996) *Escalas de variabilidad climática.* Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Murillo, D., Ortega, I., Cariilo, J., Pardo, A., Rendón, J. (2012) *Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos.* Ing. USBMed, Vol. 3, No.1, pp.62-68.

Niño, L. (2011) *Interpolación espacial de la abundancia larval de Aedes aegypti para localizar focos de infestación.* Rev. Panam Salud Pública, Vol. 6, No. 29, pp. 416-422.

Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Diario Oficial de la Federación, 30 de diciembre de 2010.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2012) *El estado de los bosques del mundo.* Roma.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (S/A) *Resumen del estado actual del manejo y ordenación forestal en México.*

Consultado el 24 de enero de 2017. En línea:
<http://www.fao.org/docrep/008/j2628s/J2628S13.htm>

Ortíz, C. (1987) *Elementos de agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la República Mexicana*. Tercera edición. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma de Chapingo.

Pardo, R. (S/A) *Nuestro futuro coman: el informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Depósito de documentos de la FAO. Consultado el 3 de febrero de 2017. En línea:
<http://www.fao.org/docrep/s5780s/s5780s09.htm>

Pearman, P., Guisan A., Broennimann, O., Randin, C. (2008) *Niche dynamics in space and time*. Trends in Ecology and Evolution, Vol. 23, No. 3, pp. 149-158.

Phillips, S., AT&T (2006) *Una breve guía didáctica sobre MaxEnt*. En línea:
<https://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/tutorial/tutorial-in-spanish.doc>. Consultado el 1 de enero de 2017.

Procuraduría Ambiental y Ordenamiento Territorial del DF (2010) *Cuantificación del carbono almacenado en la vegetación del suelo de conservación del Distrito Federal*. Consultado el 3 de abril de 2017. En línea:
http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/estudios/IPA-05-2010_Estudio_Carbono_Difusion_INIFAP-CGEO.pdf

Ramos, A., Noa, J., Martínez, M., Flores. (2009) *Los oyameles al servicio de los veracruzanos*. Agroentorno, año 12, no. 103, pp. 28-30. Fundación Produce Veracruz.

Razo, R., Gordillo, A., Rodríguez, R., Maycotte, C., Acevedo, O. (2015) *Coeficientes de carbono para arbustos y herbáceas del bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico*. Revista mexicana de Ciencias Forestales, Vol. 6, No. 31, pp. 58-67.

Rendón, E., Fajardo, A., Tavera, G. (2014) *Superficie forestal ocupada por las colonias de hibernación de la mariposa monarca en diciembre de 2014*.

Consultado el 6 de abril de 2017. En línea:
http://awsassets.panda.org/downloads/superficie_ocupada_por_la_mariposa_monarca_2014_2015.pdf

Rojas, O., Li, Y., Cumani, R. (2015) *Entendiendo el impacto de sequía provocada por El Niño en el área agrícola mundial: una evaluación utilizando el Índice de Estrés Agrícola de la FAO (ASI)*. Serie sobre el Medio Ambiente y la Gestión de los Recursos Naturales, No. 23.

Romero, L. (29 de setiembre de 2016) *El Nevado de Toluca recupera 8 mil hectáreas de bosque*. Gaceta digital UNAM. Consultado el 9 de julio de 2017. En línea: <http://www.gaceta.unam.mx/20160929/el-nevado-de-toluca-recupera-ocho-mil-hectareas-de-bosque/>

Rzedowski, J., (2006) *Vegetación de México*. 1era edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.

Sánchez, A., López, L., Granados, D. (2005) *Semejanza florística entre los bosques de Abies religiosa (H.B.K.) Cham. & Schltdl. de la Faja Volcánica Transmexicana*. Investigaciones Geográficas, No. 56, pp. 62-76. Instituto de Geografía, UNAM.

Sánchez, N., Signoret, M., Garduño, R. (2006) *La Oscilación del Atlántico Norte: un fenómeno que incide en la variabilidad climática de México*. Ingeniería Investigación y Tecnología, Vol. VII, No. 2, pp. 85-95.

Sánchez, O., Vega, E., Peters, E., Monroy, O. (Editores). (2003) *Conservación de ecosistemas templados de montaña en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, US Fish & Wildlife Service, Unidos por la Conservación A.C., Instituto de Geografía de la UNAM, Ford Foundation, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Centro de Investigaciones sobre Recursos Bióticos, Secretaría de Ecología del Estado de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Sierra Madre A.C., Fondo Pro Cuenca de Valle de Bravo A.C.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2010) *Plan de Manejo Tipo para la Mariposa Monarca (Danaus p. plexippus)* Consultado el 6 de abril de 2017. En línea:

http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/gestionambiental/vidasilvestre/Documents/PMT_Nov_2010/PMT%20MARIPOSA%20MONARCA.pdf

SEMARNAT (2013) *Estrategia Nacional de Cambio Climático*. Visión 10-20-40. Gobierno de la República. México.

SEMARNAT (2017) *Anuarios estadísticos de producción forestal*. Consultado el 4 de abril de 2017. En línea: <http://www.gob.mx/semarnat/documentos/anuarios-estadisticos-forestales>

Servicio Meteorológico Nacional (S/A) *ENOS*. Consultado el 6 de mayo de 2017. En línea: <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/diagnostico-climatico/enos>

Sistema de Información para la Reforestación (S/A) *Abies religiosa* (Kunth Schltld. et Cham.) Consultado el 8 de marzo de 2017. En línea: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/873Abies%20religiosa.pdf>

The Plant List (2012) *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. & Cham. Consultado el 1 de marzo de 2017. En línea: <http://www.theplantlist.org/tpl1.1/record/kew-2610057>

Tivo, Y., Iglesias, L. (2006) *Pulmones de México: los bosques de oyamel*. Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de la Universidad Veracruzana. Vol. XIX, No.3. Consultado el 8 de marzo de 2017. En línea: <https://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol19num3/articulos/bosques/>

Torres, C. (2013) *Análisis de los cambios del límite superior del bosque en el volcán Iztaccíhuatl*. Tesis de Licenciatura. Colegio de Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM.

Triola, M. (2009) *Estadística*. Décima edición. Pearson Educación. México.

Universidad de Alcalá de Henares (S/A) NAO. Consultado el 11 de mayo de 2017.
En línea: <http://www3.uah.es/clima/prediccion/nao.htm>

Vidal, R. (2005) *Las Regiones Climáticas de México* I.2.2. Temas Selectos de Geografía de México. Instituto de Geografía, UNAM.

Vitz, M. (2012) *La ciudad y sus bosques. La conservación forestal y los campesinos en el Valle de México, 1900-1950*. Estudios de Historia Moderna y Contemporánea de México, No. 43, pp. 135-172.

World Wildlife Fund (2017) *Superficie forestal ocupada por las colonias de hibernación de la mariposa monarca en México - temporada 2016-2017*. Consultado el 15 de marzo de 2017. En línea: <http://www.wwf.org.mx/?292030/Superficie-forestal-ocupada-por-las-colonias-de-hibernacion-de-la-mariposa-monarca-en-Mexico-2016-2017>

World Wildlife Fund, Telcel (S/A) *Mariposa Monarca Danaus Plexippus*. Consultado el 5 de abril de 2017. En línea: http://www.wwf.org.mx/que_hacemos/programas/mariposa_monarca/

Zambrano, Y. (2014) *Posibilidades de implementación de un sistema de indicadores para la gestión de sequías en la demarcación hidrográfica de Manabí-Ecuador*. Trabajo fin de Master en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de Valencia.

Zunino, M., Zullini, A. (2003) *Biogeografía. La dimensión espacial de la evolución*. Editorial Fondo de Cultura Económica, México.