



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
LICENCIATURA EN GEOGRAFÍA

**LA REGULACIÓN DEL CLIMA EN ÁREAS NATURALES
PROTEGIDAS. ESTUDIO TRANSESCALAR PARA LA
RESERVA DE LA BIOSFERA MARIPOSA MONARCA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A:

JUAN ANTONIO GALVÁN ACOSTA

DIRECTORA DE TESIS:
DRA. LETICIA GÓMEZ MENDOZA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2019





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.

“Un viaje de mil millas, comienza con un primer paso”

- Lao Tse



AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Susana y Javier. Son lo más valioso que tengo en toda mi existencia. No me alcanzaría el tiempo para devolverles las grandes cosas que han hecho por mí durante todo este largo camino. Me siento infinitamente agradecido con la vida por tenerlos a mi lado, e infinitamente afortunado de contar con ustedes en las buenas y en las malas. Espero que este primer proceso culminado los llene de orgullo, porque es para ustedes también. Los amo.

A mis hermanos, Ian y Cynthia. Los amo como no tienen idea. Hemos estado juntos por mucho tiempo y lo seguiremos estando. Este primer proceso terminado, se lo dedico a ustedes también.

A la Dra. Leticia Gómez. No alcanzan las palabras para expresarle mi enorme agradecimiento por haberme apoyado en la culminación de este proyecto de licenciatura. No hubiera sido posible concretarlo sin su siempre valiosa asesoría. Encuentro en usted a una gran profesional de la Geografía, que inspira a sus cercanos a desarrollar una visión científica que permita interpretar y cuestionar nuestra realidad. Así mismo, admiro su labor como docente e investigadora en la Universidad, una persona que ayuda siempre a crecer a aquel que esté dispuesto a hacerlo. Gracias por haberme permitido ser su alumno, su tesista y su ayudante.

A mi sínodo, Mtra. Margarita Franco, Dr. Abraham Navarro, Dra. Guadalupe Matías y Dr. David Zermeño. Enormes gracias por el tiempo invertido en la revisión del trabajo, y sobre todo gracias por los consejos para mejorarlo, y por los comentarios hacia el esfuerzo invertido en él.

A mis profesores universitarios, admiración y respeto por su noble labor en las aulas. Conservo las enseñanzas de cada uno de ustedes, las que me permitieron tener una formación sólida en geografía física, geografía humana, cartografía, pensamiento geográfico y didáctica de la geografía. Este agradecimiento es también, con un gran cariño, a la memoria de aquellos que ya no pudieron leer estas palabras.



A toda la generación 2014 de la licenciatura en Geografía. Haber compartido las aulas, los laboratorios y las prácticas de campo con ustedes ha sido una de las mayores satisfacciones en la vida. Entre ustedes y yo, siempre prevaleció el compañerismo y el respeto, pero, sobre todo, el amor por la ciencia. Enormes gracias a cada uno de ustedes por los momentos compartidos.

A todos mis alumnos y exalumnos de las materias de Meteorología, Climatología 1, Climatología 2 y Teoría y Método en Geografía Física. Brillantes geógrafos en formación, los cuales fueron una motivación hacia mí para mejorar y mejorar cada día más. Gracias por haberme permitido poner mi granito de arena en su proceso formativo. Los voy a tener presentes, siempre.

Al proyecto PIFFyL 2016015 *Cambio climático y sus implicaciones en la biodiversidad de México*, así como a todos los miembros del Seminario. Sin duda cada viernes de discusión significó un paso más en la formación científica.

Al proyecto PAPIIT IN226717 *Consolidación de la Red Fenológica Comunitaria en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca*, en el cual este proyecto de tesis tiene su origen.



ABSTRACT

Some studies have demonstrated that natural reserves, in addition to conserve their natural land cover, have an influence in some environmental processes such as forest fires, land-use change and climate regulation, although the last one is unclear how operates. Monarch Butterfly Biosphere Reserve (RBMM) is a natural reserve located at the central part of Mexico, at a zone characterized by high rates of deforestation, outside its limits. Given this difference, the hypothesis of this thesis suggests that there are fewer changes in temperature within the reserve, and more changes outside the reserve as a reflection of the climate regulation service. Temperature trend (1981-2010) was used as indicator of climate regulation, being evaluated at three different scales through a GIS: global, regional and local. In global scales, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ temperature data (Climate Research Unit) was used. In regional scale, 9km x 9km vector temperature data (Atmosphere Science Centre, UNAM) was analysed. By last, in local scale temperature data in climatological stations (National Weather Service) was evaluated. Global and regional scales were analysed using linear least squares regression method, while local scale was evaluated using the non-parametric Mann-Kendall statistical test. Also, a comparison between inside and outside trends were made to determine if they are significantly different from each other. The results suggest that RBMM does not have an effect in climate regulation in any of the scales studied, because temperature inside RBMM has sometimes higher trend than outside. This methodology might be applied in future investigations related to environmental variables trends detection, climate change adaptation and conservation strategies.

Key words: Monarch Butterfly Biosphere Reserve, temperature, climate trend, climate regulation services, multi-scalar analysis, Mann-Kendall test.



RESUMEN

Algunos estudios han demostrado que las áreas naturales protegidas, además de conservar su cubierta natural, tienen influencia en algunos procesos medioambientales: incendios forestales, cambio de uso de suelo y regulación climática, aunque esta última aún no es claro cómo opera. La Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (RBMM) es un área natural protegida localizada en la parte centro de México, en una zona caracterizada por altas tasas de deforestación, fuera de sus límites. Dada esa diferencia, la hipótesis de esta tesis sugiere que los cambios de temperatura en la RBMM son menores que fuera de ella, como un reflejo del servicio de regulación climática. La tendencia de temperatura (1981-2010) fue usada como indicador de regulación climática, siendo evaluada en tres escalas distintas mediante un SIG: global, regional y local. En la escala global, se usaron datos de temperatura de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ de resolución (Climate Research Unit). En la escala regional, se analizaron datos vectoriales de temperatura de $9\text{km} \times 9\text{km}$ de resolución (Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM). Por último, en la escala local se evaluaron datos de temperatura en estaciones climatológicas (Servicio Meteorológico Nacional). Las escalas global y regional fueron analizadas con el método de regresión lineal por mínimos cuadrados, mientras que la escala local fue evaluada usando la prueba estadística no paramétrica de Mann-Kendall. Además, se llevó a cabo un comparativo entre las tendencias dentro y fuera de la RBMM para determinar si son significativamente diferentes entre sí. Los resultados sugieren que la RBMM no tiene efecto en la regulación climática en ninguna de las escalas estudiadas, porque la tendencia de temperatura es mayor dentro de la RBMM que fuera de ella. Esta metodología podría ser aplicada en el futuro en investigaciones relacionadas con la detección de tendencias en variables medioambientales, adaptación al cambio climático y estrategias de conservación.

Palabras clave: Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, temperatura, tendencia del clima, servicios de regulación climática, análisis multiescalar, prueba de Mann-Kendall.



ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Justificación	7
1.3 Pregunta de investigación	11
1.4 Objetivos	11
1.4.1 General	11
1.4.2 Particulares	11
1.5 Hipótesis	12
1.6 Marco teórico conceptual.....	12
2. Descripción de la zona de estudio	24
3. Materiales y Métodos	30
3.1 Las bases de datos	30
3.1.1 Mallas de datos del Climatic Research Unit	30
3.1.2 Nodos de temperatura de UNIATMOS	31
3.1.3 Estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional	34
3.2 Procesamiento estadístico.....	38
3.2.1 Método de regresión lineal simple por mínimos cuadrados	38
3.2.2 Prueba no paramétrica de Mann-Kendall	41
3.3 Estimación de tendencias por escala	42
3.3.1 Estimación de tendencias a escala nacional	42
3.3.2 Estimación de tendencias a escala regional	44
3.3.3 Análisis de proximidad y estimación de correlación estadística	47
3.3.4 Estimación de tendencias a escala local	48
4. Resultados	50
4.1 Tendencias a escala nacional	50
4.1.1 Temperatura media anual	50
4.1.2 Temperatura media estacional	52
4.1.3 Temperatura mínima anual	55
4.1.4 Temperaturas mínima estacional	56
4.1.5 Temperatura máxima anual	60
4.1.6 Temperatura máxima estacional	61
4.2 Tendencias a escala regional	64
4.2.1 Temperatura máxima anual	64
4.2.2 Temperatura mínima anual	67
4.2.3 Tendencias estacionales	67
4.2.4 Análisis de proximidad	78
4.3 Tendencias a escala local	82



5. Discusión de los resultados **95**

5.1 La aproximación multiescalar en el estudio del clima 95
5.2 La conservación y restauración del hábitat de la mariposa monarca como estrategia para la
reducción de la vulnerabilidad de la especie ante los cambios de temperatura. 104

6. Conclusiones **114**

Referencias **117**



ÍNDICE DE FIGURAS

2. Descripción de la zona de estudio **24**

Figura 2.1 Contexto de la zona de estudio. Subzonificación, límites municipales y núcleos urbanos	25
Figura 2.2 Contexto de la zona de estudio. Subzonificación, topografía, santuarios y colonias de hibernación. Fuente: Rendón y Vidal (2014).....	27

3. Materiales y Métodos **30**

Figura 3.1 Ejemplo de una malla de temperatura media anual para el año 2010 del Climatic Research Unit (CRU)	32
Figura 3.2 Ubicación de las estaciones climatológicas que fueron usadas para la creación de las mallas de CRU. Fuente: Harris et al. (2014).....	32
Figura 3.3 Ubicación de los nodos de reanálisis del Centro de Ciencias de la Atmósfera, y su espaciamiento de 9 km entre cada uno.	35
Figura 3.4 Ubicación de las estaciones climatológicas usadas para la estimación de tendencias a escala local	37
Figura 3.5 Esquema metodológico para la estimación de tendencias a escala nacional	43
Figura 3.6 Esquema metodológico para la estimación de tendencias a escala regional	45
Figura 3.7 Distribución de los nodos usados para la relación de proximidad, en un área buffer de 13 km (n=45).....	47

4. Resultados **50**

Figura 4.1 Tendencias de temperatura media anual a escala nacional.	51
Figura 4.2 Distribución de tendencias de temperatura media mensual en México para el periodo invernal	53
Figura 4.3 Distribución de tendencias de temperatura media mensual en México para el periodo primaveral	53
Figura 4.4 Distribución de tendencias de temperatura media mensual en México para el periodo veraniego	54
Figura 4.5 Distribución de tendencias de temperatura media mensual en México para el periodo otoñal	54
Figura 4.6 Distribución de tendencias de temperatura mínima anual.....	56
Figura 4.7 Distribución de tendencias de temperatura mínima mensual en México para el periodo invernal.....	58
Figura 4.8 Distribución de tendencias de temperatura mínima mensual en México para el periodo primaveral.....	58
Figura 4.9 Distribución de tendencias de temperatura mínima mensual en México para el periodo veraniego.....	59



Figura 4.10 Distribución de tendencias de temperatura mínima mensual en México para el periodo otoñal	59
Figura 4.11 Distribución de tendencias de temperatura máxima anual en México.....	60
Figura 4.12 Distribución de tendencias de temperatura máxima mensual en México para el periodo invernal.....	62
Figura 4.13 Distribución de tendencias de temperatura máxima mensual en México para el periodo primaveral.....	62
Figura 4.14 Distribución de tendencias de temperatura máxima mensual en México para el periodo otoñal	63
Figura 4.15 Distribución de tendencias de temperatura máxima mensual en México para el periodo veraniego.....	63
Figura 4.16 Tendencias de temperatura máxima anual a escala regional.	65
Figura 4.17 Tendencias de temperatura mínima anual a escala regional.	66
Figura 4.18 Tendencias de temperatura máxima mensual a escala regional para el periodo invernal.	69
Figura 4.19 Tendencias de temperatura máxima mensual a escala regional para el periodo primaveral.	70
Figura 4.20 Tendencias de temperatura máxima mensual a escala regional para el periodo veraniego	71
Figura 4.21 Tendencias de temperatura máxima mensual a escala regional para el periodo otoñal	72
Figura 4.22 Tendencias de temperatura mínima mensual a escala regional para el periodo invernal.	74
Figura 4.23 Tendencias de temperatura mínima mensual a escala regional para el periodo primaveral.	75
Figura 4.24 Tendencias de temperatura mínima mensual a escala regional para el periodo veraniego.	76
Figura 4.25 Tendencias de temperatura mínima mensual a escala regional para el periodo otoñal.	77
Figura 4.26 Comparativo de tendencias dentro y fuera de la RBMM para temperatura máxima anual. Fuente: elaborado con base en el mapa de la figura 3.16.....	79
Figura 4.27 Comparativo de tendencias dentro y fuera de la RBMM para temperatura mínima anual. Fuente: elaborado con base en el mapa de la figura 3.17.....	79
Figura 4.28 Comparativo de tendencias dentro y fuera de la RBMM para temperaturas máximas estacionales. Fuente: elaborado con base en los mapas de las figuras 3.18 a 3.21	80
Figura 4.29 Comparativo de tendencias dentro y fuera de la RBMM para temperaturas mínimas estacionales. Fuente: elaborado con base en los mapas de las figuras 4.22 a 4.25.....	81
Figura 4.30 Gráfica comparativa elaborada con base en la tabla 4.5, la cual muestra la relación existente entre las tendencias de temperaturas máximas estacionales, tanto a escala local medida con los datos de la estación climatológica 15197 y las tendencias estimadas a escala regional en el sitio de la estación.....	88
Figura 4.31 Gráfica comparativa elaborada con base en la tabla 4.5, la cual muestra la relación existente entre las tendencias de temperaturas mínimas estacionales, tanto a escala local medida con los datos de la estación climatológica 15197 y las tendencias estimadas a escala regional en el sitio de la estación.....	88



Figura 4.32 Gráfica comparativa elaborada con base en la tabla 4.6, la cual muestra la relación existente entre las tendencias de temperaturas máximas estacionales, tanto a escala local medida con los datos de la estación climatológica 15066 y la tendencia que se estima a escala regional en el sitio de la estación..... 89

Figura 4.33 Gráfica comparativa elaborada con base en la tabla 4.6, la cual muestra la relación existente entre las tendencias de temperaturas mínimas estacionales, tanto a escala local medida con datos de la estación climatológica 15066 y la tendencia que se estima a escala regional en el sitio de la estación..... 89

Figura 4.34 Contexto ambiental de la ubicación de las estaciones 15066 y 15197 usadas para la estimación de tendencias en la escala local. Fuente: Información vectorial de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y del Servicio Meteorológico Nacional. 92



ÍNDICE DE TABLAS

2. Descripción de la zona de estudio **24**

Tabla 2.1 Colonias de hibernación de la mariposa monarca dentro de la RBMM agrupadas por santuario. Se tomaron los ejemplos más representativos de cada uno. 28

3. Materiales y Métodos **30**

Tabla 3.1 Ubicación de los municipios para la descarga de los nodos de UNIATMOS 33

Tabla 3.2 Criterios usados en la selección de estaciones climatológicas, para el análisis de tendencias de temperatura a escala local..... 36

Tabla 3.3 Síntesis de la fórmula de mínimos cuadrados para la obtención del valor de cambio, con el manejo de archivos ráster 46

4. Resultados **50**

Tabla 4.2 Resultados de la prueba de Mann-Kendall para la estación 15066, temperaturas anuales y estacionales mínimas 83

Tabla 4.1 Resultados de la prueba de Mann-Kendall para la estación 15066, temperaturas anuales y estacionales máximas 83

Tabla 4.3 Resultados de la prueba de Mann-Kendall para la estación 15197, temperaturas anuales y estacionales máximas 84

Tabla 4.4 Resultados de la prueba de Mann-Kendall para la estación 15197, temperaturas anuales y estacionales mínimas 84

Tabla 4.5 Comparativo del valor de las tendencias estimadas para la estación climatológica 15197 y el valor de las tendencias que se estimaron a escala regional para el sitio en el que se ubica dicha estación 86

Tabla 4.6 Comparativo del valor de las tendencias estimadas para la estación climatológica 15066 y el valor de las tendencias que se estimaron a escala regional para el sitio en el que se ubica dicha estación 86





1. Introducción

1.1 Planteamiento del problema

Las áreas naturales protegidas son territorios delimitados que funcionan como herramientas destinadas a la conservación de los elementos bióticos y abióticos del medio, en aquellos sitios naturales que han sido poco o nada alterados por la población humana (Villalobos, 2000), promueven el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y el desarrollo de la población (Bezaury y Gutiérrez, 2009). Entre los efectos positivos que estas áreas han tenido, se mencionan la disminución, tanto en la ocurrencia de incendios forestales, como en el valor de la tasa de cambio de uso de suelo (March y Flamenco, 1996; Soares *et al.*, 2010) así como de las emisiones de gases invernadero a la atmósfera (Figuroa, *et al.*, 2011). Sin embargo, fuera de los límites de las áreas protegidas, el territorio nacional presenta deforestación.

A nivel mundial la superficie forestal continúa disminuyendo como consecuencia del incremento de la población humana y sus necesidades alimentarias. Se estima una reducción de 129 millones de ha durante el periodo 1990-2015 (una tasa de cambio total de 3.1%), quedando en la actualidad menos de 4,000 millones de ha en el planeta (Food and Agriculture Organization, 2016).

Vergés *et al.*, (2014) analizaron el cambio del uso de suelo y vegetación en todo el país, en una investigación cuyo objetivo es el de calcular, por tipos de cobertura, las tasas



medias anuales de cambio para el periodo 1976-2007, así como identificar en qué zonas del territorio nacional han ocurrido esos cambios. Los resultados que arrojó este proyecto son que, si bien continúa la deforestación de selvas y bosques templados a nivel nacional, estos últimos se consideran como un tipo de vegetación más estable ante el cambio de uso de suelo, dado que para el periodo 1976-2000 los autores calcularon una tasa de cambio anual de -0.28%, a la vez que para el periodo 2000-2007 la tasa de cambio anual se estimó en 0.60%. Sin embargo, al abarcar todo el periodo (1976-2007), la tasa de cambio únicamente en bosques es de -0.08% anual. El comportamiento del cambio de cobertura de selvas es similar, pero con cifras más altas que los bosques: en el primer periodo, esta cobertura tuvo una tasa de cambio de -0.053% anual, mientras que para el segundo periodo, tuvo una muy ligera recuperación, de tal forma que su tasa de cambio fue de apenas 0.01% anual. De esta forma, para todo el periodo de estudio (1976-2000), las selvas han tenido una tasa de cambio de -0.041%, más que los bosques.

Para el periodo 1970-1993 cuando el INEGI elaboró la Carta de Vegetación y Uso de Suelo Serie I, se tiene registro de una pérdida de 8.3 millones de ha bajo un ritmo medio anual de 490 mil ha. De toda esa superficie perdida, el 42.1% correspondió a selvas, las cuales disminuyeron a una velocidad media de 206 mil ha anuales. Sin embargo, para el periodo 1993-2002 cuando se elaboró la Serie II de la misma carta, se contabilizó una pérdida de poco más de 3 millones de ha, las cuales disminuyeron a una velocidad media anual de 336 mil ha (considerablemente menor que el periodo anterior), donde las selvas contribuyeron con el 43.3% (1.3 millones de ha) a un ritmo medio de 130 mil ha/año aproximadamente. Por último, entre los años 2002 y 2007, se registró una pérdida de 1.9 millones de ha de vegetación natural, a una tasa media anual de 382 mil ha y donde



nuevamente las selvas fueron el tipo de vegetación más afectado al contribuir con una pérdida de 835 mil ha, lo que representa el 43.9%. Estas últimas disminuyeron a una velocidad aproximada de 139 mil ha por año.

Las estadísticas del Global Forest Watch (2016) indican que la pérdida promedio anual de la superficie arbórea en el país, supera en más de cuatro veces la recuperación de la misma. Los estados que más contribuyeron a dicha pérdida entre los años 2001 y 2014, fueron Campeche, Quintana Roo, Chiapas y Yucatán.

López (2012) llevó a cabo un estudio cartográfico para identificar los sitios en donde ha ocurrido algún cambio de uso de suelo, mediante el análisis de las capas vectoriales de uso de suelo y vegetación de INEGI Series II y III. Para ello, creó una malla regular de más de 19,000 puntos con un espaciamiento de 10 km para todo el territorio nacional, con la finalidad de extraer la información de la cobertura para ambas series cartográficas e identificar en cuáles hubo un cambio de cobertura. Los resultados de dicho proyecto coinciden con los del Global Forest Watch con respecto a la vegetación de bosque tropical, si bien existen pérdidas en la parte occidental de México, aparecen también en grandes cantidades en la porción oriental: desde el centro de Tamaulipas, todo Veracruz, Tabasco, norte y este de Chiapas y el resto de la península de Yucatán.

Según SEMARNAT (2014), el Estado de México (entidad que alberga una parte de la Reserva de la Mariposa Monarca) figura como una de las entidades con mayores valores de cambio de uso de suelo, con una tasa anual de 0.41%, posicionándose solo detrás de los estados de Tamaulipas, Chiapas, Nuevo León, Sinaloa y Yucatán. No obstante, hay que recalcar que, en esta lista, el estado de Michoacán figura varios lugares abajo.



Céspedes y Moreno (2010) por ejemplo, llevan a cabo un estudio de deforestación y reforestación a nivel nacional. De dicho estudio, se desprende la conclusión de que Veracruz es el estado con mayor tasa de deforestación, un resultado que no es tan alarmante si se considera que en ese estado se tiene una tasa de reforestación mediana, de modo que al considerar la diferencia que existe entre la tasa de deforestación y la tasa de reforestación, Campeche y Tamaulipas presentan una situación crítica.

Al hablar de bosque templado, López (2012) determina que las mayores pérdidas se encuentran en la zona occidental, centro y sur del territorio nacional: occidente de Chihuahua y Durango, estados del Pacífico desde Nayarit hasta Chiapas y prácticamente toda la provincia del Sistema Volcánico Transversal. Respecto a esta última provincia, una de las zonas en donde más cambios de uso de suelo hubo desde una cobertura de bosque hacia otra diferente es precisamente en una franja que se extiende ambos lados del límite entre los estados de Michoacán y Estado de México, donde se encuentra la Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca (de aquí en adelante, RBMM). Los bosques templados en esta porción del Sistema Volcánico Transversal han sido transformados a otros usos de suelo.

La importancia de resaltar lo anterior, recae en que el cambio de uso de suelo es una de las principales causas del cambio climático, considerado a éste como un factor próximo del deterioro medioambiental. El cambio climático conduce a cambios en el valor y/o cambios en la tendencia de algunas variables medioambientales, como pueden ser la temperatura (CONABIO, 2009) y a su vez desencadena una serie de eventos adversos: representa amenazas al incremento de incendios forestales tanto en cantidad como en



extensión (CONANP, 2011) y modificaciones en la distribución real de ciertas especies (Téllez y Dávila, 2003; Maldonado y Alfaro, 2010).

De manera general, las condiciones climáticas de México proyectadas hacia el futuro, varían según los datos o los modelos usados. No obstante, existe una cierta concordancia de que todo el país se encuentre bajo incrementos de temperatura con un gradiente norte-sur, y con incrementos y disminuciones de la precipitación, dependiendo la zona del territorio: en el caso del año 2050, se espera un incremento de la precipitación en un rango de 0.1 y 0.2 mm/día con excepción de la Península de Yucatán donde podría haber decrementos en la misma proporción. En el caso de la temperatura media anual, al mismo año es posible tener incrementos de hasta 1°C en la mayor parte del país, con excepción del norte y noroeste del territorio, donde habría incrementos de 1.5°C por encima de lo normal (Sánchez *et al.*, 2011).

Las estimaciones y evaluaciones de las tendencias para determinadas variables climatológicas como pueden ser la temperatura o la precipitación a diferentes escalas espaciales son de utilidad para ayudar en la construcción de futuros escenarios climáticos. Tal como lo expresan Jain y Kumar (2012) en una investigación realizada para las cuencas hidrográficas de India, “la agricultura y sectores relacionados, seguridad alimentaria, así como el sector energético, son dependientes de la variabilidad temporal de las variables climatológicas”, algo que no está muy alejado de la realidad de nuestro país: una buena cantidad de las actividades económicas como la agricultura, la pesca, el turismo y las actividades de la transformación requieren tener presentes las variaciones



y tendencias de variables como la temperatura y precipitación para su correcta planificación.

Ante la necesidad de conocer cuál es el comportamiento de las variables climáticas en el país y contar con un registro numérico al respecto para la toma de decisiones para el manejo y la conservación, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) ha instalado desde 2012 una serie de Estaciones Meteorológicas Automáticas y de registro continuo (llamadas EMAs) para el monitoreo de temperatura, precipitación, velocidad y dirección del viento, entre otras. Dichas estaciones fueron instaladas bajo criterios geográficos, ecosistémicos y de conocimiento de la vulnerabilidad, de tal forma que, a la fecha se cuentan con 389 de ellas de libre acceso (INECC, 2008), más las estaciones disponibles del Servicio Meteorológico Nacional. Sin embargo, esta red cuenta aún con una serie corta de registros climatológicos, de aproximadamente cinco años que impediría un análisis del clima local en el largo plazo.

Por lo anterior, los registros continuos del clima han evidenciado que variables como la temperatura o la precipitación están cambiando, pero aún no se cuenta con estudios suficientes que permitan comprender de qué forma se comporta el clima dentro de un ANP, y si ese comportamiento es distinto al que existe fuera de su límite.

Así pues, la propuesta de este proyecto de tesis es conocer de qué forma influye una la delimitación de un área natural protegida como lo es la Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca en el comportamiento de las tendencias de la temperatura medida en diferentes escalas de análisis. Para ello, se hará uso de la información climatológica existente en diversas fuentes de información como son las mallas de datos climáticos a



resoluciones globales, nodos de temperatura de escalas regionales, y estaciones climatológicas de escalas locales.

1.2 Justificación

En México los estudios que vinculan al cambio climático con Áreas Protegidas y ecosistemas están más encausados a analizar la función que tienen esas zonas naturales en la captación y emisión de dióxido de carbono, mientras que en el escenario internacional, los trabajos se dirigen más hacia las respuestas de la vegetación al cambio climático (Villers y Trejo, 1998). A su vez, los estudios que se han llevado a cabo analizan una sola área o un conjunto de ellas. Por lo anterior, este proyecto llevará a cabo un estudio en el que se analice el papel de la RBMM como reguladora del clima, en diferentes escalas espaciales.

De todo el conjunto de problemas medioambientales que existen en México (extinción de especies, pérdida de biodiversidad, contaminación y sobreexplotación de acuíferos, contaminación y degradación de suelos) la deforestación es el más preocupante (Céspedes y Moreno, 2010), dado que, a la fecha, las tasas de cambio de cobertura vegetal en el país se han mantenido negativas (pérdidas), a tal grado que México muestra los valores más altos de toda Latinoamérica (SEMARNAT, 2005).

El cambio climático es un elemento de carácter medioambiental a considerar en la política nacional. Teniendo en cuenta la amenaza que este fenómeno representa para la biodiversidad, se han desarrollado una serie de instrumentos normativos que toman en cuenta al cambio climático en la planeación territorial: Ley General de Cambio Climático



(2012) y Programa Especial de Cambio Climático (2014), más los planes de manejo de cada Área Natural Protegida. Y aunque el cambio climático se ha convertido en un tema en la agenda política de México, el Programa de Manejo de la RBMM (CONANP, 2011) no cuenta en ningún apartado con un análisis sobre el comportamiento del clima, y por ende de acciones o estrategias con esa perspectiva.

Así mismo, se cuenta con una gran cantidad de herramientas de planeación y prevención ante escenarios futuros de cambio climático (Estrategia de la CONANP al 2040, Programas Estatales de Adaptación al Cambio Climático). Por ejemplo, la CONANP elaboró su estrategia al 2040 (E2040), la cual se conforma por diez ejes o líneas de acción para las áreas naturales protegidas, divididos en tres grupos: sustantivos, de conducción y de soporte. En el caso de los ejes sustantivos, se plantea el estudio y monitoreo del cambio climático: búsqueda del aumento de la resiliencia en la biodiversidad, de los servicios ambientales y de las comunidades que habitan esas zonas a partir de la disminución de la vulnerabilidad, la gestión del riesgo y el incremento de capacidades. De hecho, dentro de la CONANP una de las líneas prioritarias para la investigación es el *Conocimiento para la toma de decisiones*, cuyo objetivo es impulsar la disponibilidad de información actualizada y sistematizada respecto a aspectos biológicos, sociales y ambientales: en particular, la creación de programas de monitoreo.

Los escenarios de cambio climático son construcciones del clima en un horizonte futuro creados con base en la solución de un complejo conjunto de ecuaciones matemáticas que modelan la atmósfera, y que, a su vez, son elaborados con una climatología base, es decir, las condiciones climatológicas medias predominantes en un lugar, al momento



de crear el escenario futuro. Sin embargo, no hay estudios que muestren la transición que existe desde la climatología base hasta los escenarios de cambio climático, misma que sería mostrada por una tendencia. Un análisis de tendencias permite cuantificar en términos estadísticos los cambios que han ocurrido en una serie histórica, con la finalidad de estimar un comportamiento futuro sin necesidad de consultar un escenario de cambio climático.

Por su parte, la escala es un concepto en cartografía que explica la relación matemática existente entre las dimensiones de un elemento cartografiado y sus dimensiones en la superficie terrestre. Sin embargo, para geografía, la escala resulta ser un concepto más amplio, pues significa la extensión superficial que ocupa cualquier fenómeno tanto físico como humano, la resolución espacio-temporal del mismo, así como la estructura jerárquica y los niveles de organización de un sistema ambiental (Phillips, 2004 en Sheppard y McMaster, 2004). Y si bien hay procesos que pertenecen exclusivamente a una sola escala de análisis, también hay procesos que se entienden en una multiplicidad de ellas.

En cualquier estudio de carácter geográfico, es importante elegir la escala de análisis bajo la cual algún proceso será estudiado, y la resolución de las bases de datos que ayudarán al estudio en cuestión. Una escala lógica bajo la cual un proceso ocurre y que además puede ser estudiado y entendido en su mejor forma, se conoce como escala operacional (Sheppard y McMaster, 2004).

Como se mencionó en apartados anteriores, dada la extensión de las Áreas Naturales Protegidas, estas tienen efecto en algunos procesos de carácter medioambiental,



muchos de los cuales son reflejados en escalas nacionales o continentales. Si las Áreas Naturales Protegidas tienen efecto en la regulación climática de un sitio, esta se verá reflejada en una escala nacional, tal como los procesos anteriores. Por ende, la escala operacional de la cual parte este estudio, es la escala nacional.

Un proceso determinado puede ser analizado a través de escalas comparativamente menores que su escala operacional, no así en sentido opuesto, en el que un proceso de escala local puede no ser visto en escalas más grandes. Dada la condición anterior, la regulación climática es un proceso que puede ser estudiado en escalas menores a la escala nacional, por esa razón se emplearán otras escalas de análisis de menores resoluciones.

Por otra parte, los trabajos que proponen adaptaciones al cambio climático, emplean bases de datos climáticas de muy baja resolución, y que en muchas ocasiones son reconstrucciones estadísticas que no reflejan la condición real del clima. Por ende, no debe considerarse solo una, sino el conjunto de ellas que permita entender, en principio, el comportamiento del clima en cada una, pero también la interacción y el vínculo que existe entre todas ellas.

Con respecto a la zona de estudio, la RBMM es un Área Natural Protegida que se localiza en una zona en la que las tasas de deforestación anual son muy altas en comparación con otras zonas del país. Pero a diferencia de lo que ocurre en zonas no protegidas, la zona núcleo de la RBMM está mejor conservada que el exterior. Dado ese contraste, se plantea si esa diferencia es suficiente para tener un impacto en la regulación del clima.



Se espera que al llevar a cabo un proyecto de este tipo se pueda aportar información climática que ayude a la mejor comprensión del comportamiento del clima dentro de la RBMM, a la toma de decisiones y la generación de políticas públicas enfocadas a la adaptación de las especies predominantes de la zona, así como para la gestión, el aprovechamiento de los recursos naturales contenidos y el bienestar de la población local.

1.3 Pregunta de investigación

Las áreas naturales protegidas son una herramienta para la regulación de diferentes procesos ambientales con respecto a su exterior. Por lo anterior: ¿La tendencia de la temperatura dentro del área protegida es menor que la tendencia fuera de los límites de la misma?

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Identificar la diferencia que existe en las tendencias de temperatura máxima y mínima dentro y fuera de la RBMM para tres escalas distintas: global, regional y local.

1.4.2 Particulares

- Calcular las tendencias de temperatura máxima y mínima para la escala global, regional y local, en la zona circundante de la RBMM
- Contrastar las tendencias de temperatura máxima y mínima dentro y fuera de la RBMM, en las tres escalas diferentes.



1.5 Hipótesis

La RBMM funge como reguladora del clima, por lo que la tendencia de la temperatura dentro de ella será menor que el exterior.

Con la finalidad de encausar mejor la presente investigación, se formuló el siguiente juego de hipótesis:

- Hipótesis nula: La RBMM es una reguladora del clima en alguna de las escalas bajo estudio, por ende, la temperatura dentro de ella presenta nula o poca tendencia, mientras que la temperatura fuera de ella presenta tendencias significativas.

- Hipótesis alternativa: La RBMM no es una reguladora del clima en ninguna de las escalas bajo estudio, por ende, la temperatura dentro y fuera de ella presenta tendencias significativas.

1.6 Marco teórico conceptual

Las Áreas Naturales Protegidas son territorios delimitados que han sido poco o nada alterados por la actividad humana. Juegan un papel importante en la conservación del medio natural y de los recursos naturales. Muestra de ello, es la injerencia que tienen en la distinción del cambio de uso de suelo y la deforestación con respecto a otras zonas que carecen de protección alguna. Así pues, se espera que las Áreas Naturales Protegidas (en particular la RBMM por fines de este proyecto) tenga también una injerencia en la regulación del clima, visto por medio de la estimación de tendencias estadísticas de temperatura dentro y fuera de la misma, y en diferentes escalas.



Área Natural Protegida. Son las zonas del territorio nacional y aquellas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, en donde los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del ser humano, o que requieren ser preservadas y restauradas, y están sujetas al régimen previsto en la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (2012). El proyecto en cuestión considera a las Áreas Naturales Protegidas y sus acciones de conservación como un elemento condicionante en la construcción de las tendencias.

Cambio climático. Cambio en el estado del clima que puede ser identificado por las alteraciones en el valor central y/o en las variaciones de sus propiedades, que persiste por un periodo extendido, usualmente décadas o más tiempo. El cambio climático puede ser debido a procesos naturales internos o forzamientos externos (IPCC, 2014).

Cambio de uso de suelo. Proceso que convierte de manera permanente a bosques, selvas o manglares, en tierras para actividades agrícolas o ganaderas mediante la deforestación, la sucesión secundaria, la degradación y la alteración (SEMARNAT, 2005). Al ser la zona de estudio la que presenta las mayores tasas de deforestación en el país, se asume que es más probable que el cambio en los valores y tendencias del clima sean más evidentes con respecto a otras zonas.

Conservación. Se refiere a la permanencia de ecosistemas y hábitats naturales, y el mantenimiento y recuperación de poblaciones viables de especies, en sus entornos naturales o fuera de ellos, y en el caso de las especies domesticadas y cultivadas, en los entornos en que hayan desarrollado sus propiedades específicas (Organización de las Naciones Unidas, 1992). Las Áreas Naturales Protegidas ejercen acciones de



conservación, y son ellas las que se plantea tienen una repercusión en la forma en la que el clima está cambiando, y por ello crea una diferencia al interior y al exterior.

Deforestación. Es la conversión de los bosques a otro tipo de uso de tierra. La deforestación incluye áreas de bosque convertidas a la agricultura, pastizales, embalses y áreas urbanas. El término excluye de manera específica en donde los árboles fueron extraídos a causa del aprovechamiento o tala, y en donde se espera que el bosque se genere de manera natural, a menos que el aprovechamiento vaya seguido de una extracción de los árboles restantes para introducir usos de tierra alternativos, o bien, donde la perturbación, sobreexplotación y alteraciones de las condiciones medioambientales afecten el bosque en una medida tal que no pueda mantener una cubierta de dosel de más del 10% (Recursos Forestales Mundiales, 2012). La deforestación es solo uno de los procesos que propician el Cambio de Uso de Suelo.

Escala en el clima. Se refiere a la extensión superficial que abarca un fenómeno climático. A su vez, una escala espacial es proporcional a la escala temporal que dicho fenómeno ocupe.

Monitoreo del clima. Es el proceso periódico de recolección, análisis, interpretación e información respecto a indicadores y variables de tipo climatológico: valores medios y extremos de precipitación, temperatura, viento, humedad, etcétera. La World Meteorological Organization (2016) considera a la vigilancia meteorológica como el producto de la combinación de sistemas de información, instalación de telecomunicaciones y centros de predicción y procesamiento. Es por ello que para la



construcción de tendencias en este proyecto, se toman las series de tiempo históricas y recientes.

Regulación climática. Los ecosistemas influyen en el clima local y la calidad del aire, Los árboles proporcionan sombra, mientras que los bosques influyen en las precipitaciones y en la disponibilidad de agua, tanto a escala local como a escala regional. Así mismo, los ecosistemas influyen en la regulación del clima mediante el almacenamiento de gases de efecto invernadero (Food and Agriculture Organization, 2018)

Tendencia estadística. Patrón estadístico para un conjunto de datos de una serie histórica, el cual es probable continuar en el futuro y utilizarlo en la generación de predicciones (Mendenhall, Beaver y Beaver, 2010). La construcción de tendencias en este proyecto para zonas al interior y exterior de zonas protegidas, permitirá compararlas y establecer si existe una diferencia significativa entre ellas.

Variabilidad climática. Se refiere a las variaciones en el estado medio y otros parámetros estadísticos (tal como desviaciones estándar, la ocurrencia de eventos extremos, etc.) del clima, en todas las escalas espaciales y temporales (IPCC, 2014).

Diversos estudios han documentado los efectos y posibles efectos del cambio climático y la variabilidad climática dentro de áreas naturales protegidas (Téllez y Dávila, 2003; Maldonado y Alfaro, 2010; Fatoric, 2014; Nogueira, 2014; Wiens *et al.*, 2011; Virkkala *et al.*, 2014; Barnes *et al.*, 2016). En México estos estudios que vinculan el cambio climático con las áreas naturales protegidas y los ecosistemas forestales están dirigidos a analizar la función que tienen estas zonas en la influencia de algunos procesos ambientales, como son la captación y emisión de dióxido de carbono, mientras que, en el escenario



internacional, los trabajos se dirigen más hacia las respuestas de la vegetación al cambio climático (Villers y Trejo, 1998).

Soares *et al.* (2010) realizaron un estudio para todas las áreas naturales protegidas de la selva del Amazonas en Brasil, y tuvo por objetivo identificar el papel que tienen estas áreas en la mitigación del cambio climático, en particular el efecto que tienen en inhibir o reducir la deforestación con respecto a una zona no protegida. Parten del mismo argumento que plantea esta tesis: existe una categoría de protección de por medio que puede diferenciar procesos ambientales dentro y fuera de la ANP; en el caso de Soares *et al.* (2010) se trata de la deforestación. Para ello emplean el análisis de buffers externos e internos al área protegida, y bajo un método estadístico bayesiano identificaron espacios con igual probabilidad de ser deforestados, según un conjunto de variables espaciales como cercanía a ciudades, caminos, cuerpos de agua y pendientes del terreno. Con lo anterior, dos zonas, una dentro y una fuera del área protegida puede ser comparables entre sí, y con ello se puede saber si la protección de un área ejerce una influencia en la conservación. La conclusión que este trabajo arroja es que de las cuatro categorías de protección de la zona, tres de ellas (que abarcan un total de casi 580 áreas protegidas) han mostrado ser eficientes en la reducción de las tasas de deforestación con respecto a la zona externa.

Por su parte, Téllez y Dávila (2003) llevan a cabo una modelación bioclimática de 20 especies *cactaceae* solo en la reserva de la biosfera de Tehuacán-Cuicatlán, en Puebla-Oaxaca, bajo tres diferentes probables escenarios de cambio climático que comprenden un total de 19 variables climatológicas, con la finalidad de conocer los cambios en la



distribución potencial de las especies en comparación con la distribución potencial actual. A diferencia de otros trabajos similares (Barve *et al.*, 2012), este no considera un horizonte específico en la modelación, sino que construye únicamente los escenarios según las tendencias de la temperatura y la precipitación de la zona: en el caso de la temperatura, los escenarios se construyen con 1 a 2°C de incremento, mientras que la precipitación se analiza con -10 a -15% de cambio (independientemente de los años en los que estos cambios ocurran). Los resultados que arroja esta investigación son que ante esas condiciones climáticas, ocurrirá una disminución notable en las áreas de distribución potencial, que en algunos casos podrían desaparecer. Sin embargo las áreas resultantes no parecen tener un patrón claro de distribución con respecto a la Reserva de la Biosfera: hay áreas de distribución proyectadas dentro, fuera o en ambos lados del límite del área, lo que podría sugerir que la Reserva de Tehuacán-Cuicatlán no tiene un efecto en esa distribución.

Maldonado y Alfaro (2010) por su parte, llevan a cabo la construcción de escenarios de cambio climático para el Parque Nacional Isla del Coco, Costa Rica, mediante el uso de modelos numéricos e información climatológica de estaciones automáticas. A su vez, Ramírez (2005) y Aguilar (2005) (en Maldonado y Alfaro, 2010) analizan tendencias en distintas series de tiempo para distintas variables climáticas: en el primer caso, una evaluación y detección de cambio climático, mientras que en el segundo se efectúa un análisis de los cambios en los extremos de temperatura y precipitación.

El trabajo de Fatoric (2014) tuvo por objetivo conocer el vínculo existente entre la información cuantitativa (datos climatológicos de estaciones) y cualitativa (la percepción



de la población local) que se obtuvo respecto al cambio climático en el Área Natural Protegida de Aiguamolls de l'Empordá, en el Mediterráneo español; esto con la finalidad de conocer qué tan viable es llevar a cabo políticas de adaptación al cambio climático, puesto que el primer paso para lograrlas de manera exitosa es que la población involucrada reconozca los cambios en el clima en el que se desenvuelve. Precisamente para obtener la información cuantitativa se aplicaron pruebas de regresión lineal a series históricas de variables meteorológicas con el objetivo de determinar tendencias y cambios, además de conocer si esas variaciones estadísticas coinciden con la percepción de la población local. El resultado que arrojó esta investigación es que efectivamente, hay una asociación estadísticamente significativa entre los cambios que registran los datos y los cambios que la población local percibe.

Nogueira (2014) elaboró un tratamiento estadístico con la prueba de Mann-Kendall para series históricas de datos hidrográficos con la finalidad de determinar tendencias en los valores de escorrentía superficial para el área protegida de Serra de Mantiqueira, en el sureste de Brasil. Y es que, tal como se menciona en dicho trabajo, uno de los procesos que pueden conducir el cambio o la alteración en el comportamiento del escurrimiento superficial es el cambio climático. Sin embargo, los resultados finales de este trabajo arrojan que las tendencias estimadas para series de datos sobre precipitación son poco significativas, no así las tendencias de escurrimiento las cuales apuntan a una evidente disminución.

Por su parte Wiens *et al.* (2011), basándose en proyecciones de cambio climático, identificaron y cartografiaron, para el estado de California en Estados Unidos, posibles



condiciones climáticas “nuevas” determinadas a partir de un análisis de componentes principales. Los resultados que arrojó esta investigación son que los principales cambios en las condiciones climáticas (medidos en términos de superficie) se darán precisamente dentro de las áreas naturales protegidas del estado, y no en su exterior. El argumento que los autores dan para explicar este fenómeno, es que muchas de las áreas protegidas del estado se encuentran en lugares considerados como muy vulnerables a los cambios en el clima, lugares que en su interior poseen características que regulan en buena medida las condiciones climáticas locales como es el caso de zonas con cubierta glaciaria o zonas desérticas.

Virkkala y Rajasärkka (2011) a partir del uso de modelos bioclimáticos, encuentran que para las áreas protegidas de Finlandia la pérdida proyectada en la distribución de especies de aves de conservación es menor con respecto a áreas que carecen de alguna categoría de protección. Al afirmar lo anterior, se entiende entonces que existe una distinción entre un área protegida y una no protegida para un fenómeno como lo es la conservación de especies. En dicha investigación los autores no sugieren que en áreas protegidas este fenómeno no esté ocurriendo, sino que está ocurriendo de una forma diferente a como lo hace afuera, de tal forma que se considera que estas áreas protegidas son una oportunidad para el incremento de la resiliencia de las especies. Dudley *et al.* (2010) de manera similar afirman también que las áreas naturales protegidas son una herramienta fundamental para la adaptación al cambio climático, aunque también tienen gran relevancia en la mitigación.



Barnes *et al.* (2016) llevaron a cabo un trabajo que tiene por objetivo identificar cuáles son los factores al interior de las áreas naturales protegidas de todo el planeta que propician una distinción entre ellas en cuanto a las tendencias en la conservación o incremento de la biodiversidad. Dicho estudio parte de reconocer que un área protegida se caracteriza, en general, por conservar o incrementar la diversidad biológica que un área sin protección. En sus resultados, los autores encuentran correlaciones positivas en cuanto al nivel de desarrollo de la población residente en un área protegida (por ejemplo entre áreas naturales protegidas de África y Europa) y el nivel de conservación de especies de aves y mamíferos; y correlaciones negativas en cuanto a densidad vial y la tendencia de la población de estas mismas especies.

Dentro de la RBMM también se han efectuado estudios de carácter ambiental: por un lado Champo *et al.* (2012) llevaron a cabo una investigación para identificar los cambios de la cobertura forestal dentro de la RBMM a partir de la clasificación supervisada de imágenes multiespectrales con dos fechas distintas (2006 y 2010) con el objetivo de generar mapas de cobertura del suelo únicamente en dos tipos: 'bosque' y 'no bosque'. Con dicho análisis de cambios entre las dos fechas, se encontró que predomina la pérdida (áreas 'bosque' convertidas a 'no bosque') sobre la ganancia (áreas de 'no bosque' convertidas a 'bosque') dentro de la misma RBMM, con una diferencia de casi 1600 ha para el periodo estudiado. No obstante, al estimar los cambios por cada subzona de la Reserva, se determina que dentro de la zona núcleo las pérdidas son mucho mayores en comparación con toda la Reserva: una tasa anual de 2.52% en el primer caso contra 0.99% en toda la Reserva.



Barve *et al.* (2012) llevaron a cabo un diagnóstico del comportamiento de la temperatura y la precipitación dentro de la Reserva mediante los datos diarios de las nueve estaciones cercanas de las zonas de hibernación. De estas variables, interesa saber cuál es la tendencia con respecto a los valores límite de mortalidad de la mariposa monarca (por ejemplo, distancia mínima de temperatura/precipitación diaria con respecto a la temperatura/precipitación umbral de la mariposa monarca) para inferir con ello si esas tendencias (las cuales se asumen parcialmente como cambio climático) son las responsables de las altas mortalidades recientes de la mariposa monarca. Se usaron además escenarios de cambio climático para siete variables bioclimáticas construidas bajo escenarios de emisiones A y B al 2050. Se ejecutaron en un modelo de distribución potencial de especies (modelo de nichos) con el propósito de identificar aquellas zonas potenciales a ese horizonte para albergar a la especie. Los resultados que arrojó esta investigación son que las áreas de distribución potencial dentro de la RBMM bajo esos escenarios de cambio climático se reducirán entre un 75% y un 100%. No obstante hay otras zonas que son potenciales para albergar a la especie como el Parque Nacional Iztapalapa, La Sierra de Chichinautzin y la Sierra de La Malinche, mismas que según la proyección mantendrán las mismas condiciones bioclimáticas idóneas para la hibernación de la especie, pero sin la cobertura de bosque de oyamel, característica de la RBMM.

Por su parte, Islas *et al.* (2015) efectuaron un trabajo cuyo objetivo fue estimar dentro de la zona núcleo de la Reserva, la superficie potencial para la hibernación de la mariposa monarca en un futuro (al 2050) bajo una perspectiva de cambio climático por medio de la aplicación de dos métodos distintos: la reducción de escala (*downscaling*) y la ejecución



de un Modelo de Ensamble Regional (MER). En el primer caso se utilizan dos escenarios de cambio climático generados por dos MCG distintos (escenarios A2 y B2), y en el segundo se emplea únicamente el escenario A2. La delimitación de zonas potenciales de distribución en este estudio considera también variables geomorfológicas por lo que, añadido a la condición climática, la geomorfología del sitio se toma en cuenta mediante la modelación cartográfica de la pendiente del terreno, orientación de laderas y altitud. La conclusión que este trabajo arrojó es que dentro de la zona núcleo la tendencia es a la disminución del área potencial bajo esos escenarios, alcanzando porcentajes hasta del 4% de la superficie total en el escenario más drástico. No obstante, si se estima la distribución potencial únicamente en superficie de bosque de oyamel, el escenario más drástico arroja que la extensión de la superficie potencial puede reducirse en un 100%.

En el ámbito institucional, en México se ha elaborado la Estrategia Nacional de Cambio Climático (2012), la cual es un instrumento de gestión para la disminución de este fenómeno. En este documento se señala como una línea de acción para el fortalecimiento de capacidades institucionales en la mitigación y adaptación al cambio climático a la promoción y creación de Áreas Naturales Protegidas en los niveles estatales y federales, el incremento de la conectividad de los ecosistemas terrestres y marinos y la preservación de los procesos ecológicos regionales. Así mismo, al ser las actividades agropecuarias emisoras de gases invernadero, se reconoce a estas Áreas Naturales Protegidas como un elemento indispensable en la captura y almacenamiento de carbono, por lo cual su implementación y su manejo adecuado (restauración, regeneración y reforestación) tendría un efecto positivo en la mitigación del cambio climático.



Así mismo, para la Ley General de Cambio Climático (2012), el establecimiento, conservación y adecuado manejo de áreas naturales protegidas y corredores biológicos se consideran como acciones de adaptación más que de mitigación del cambio climático.



2. Descripción de la zona de estudio

La Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca (en breve RBMM) es un área natural protegida localizada entre los estados de Michoacán y Estado de México, la cual está catalogada dentro de la categoría de manejo de 'Reserva de la Biósfera', entendida como "...áreas biogeográficas relevantes a nivel nacional, representativas de uno o más ecosistemas no alterados significativamente por la acción del ser humano, o que requieran ser preservados o restaurados, en los cuales habiten especies representativas de la biodiversidad nacional, incluyendo a las consideraciones endémicas, amenazadas o en peligro de extinción" (LGEEPA, 2012). En este caso, si bien las condiciones morfológicas, climáticas, hidrológicas e incluso culturales de la Reserva son de suma importancia y se asumen como singulares, la componente biogeográfica se considera de mayor peso y por ende determina la categoría de manejo del área, tal como lo expresa su Programa de Manejo (2001). Fue decretada el 09 de octubre de 1986, si bien ya seis años antes, el 9 de abril de 1980 había sido establecida como zona de reserva y refugio de la fauna silvestre.

Para cubrir los objetivos de este proyecto, se acordó utilizar como área de análisis, aquella comprendida entre los puntos extremos 20.0988N, 100.5180W; 20.0988N, 99.9376W; 19.1944N, 100.5180W; 19.1944N, 99.9376W, tal como se muestra en la figura 2.1



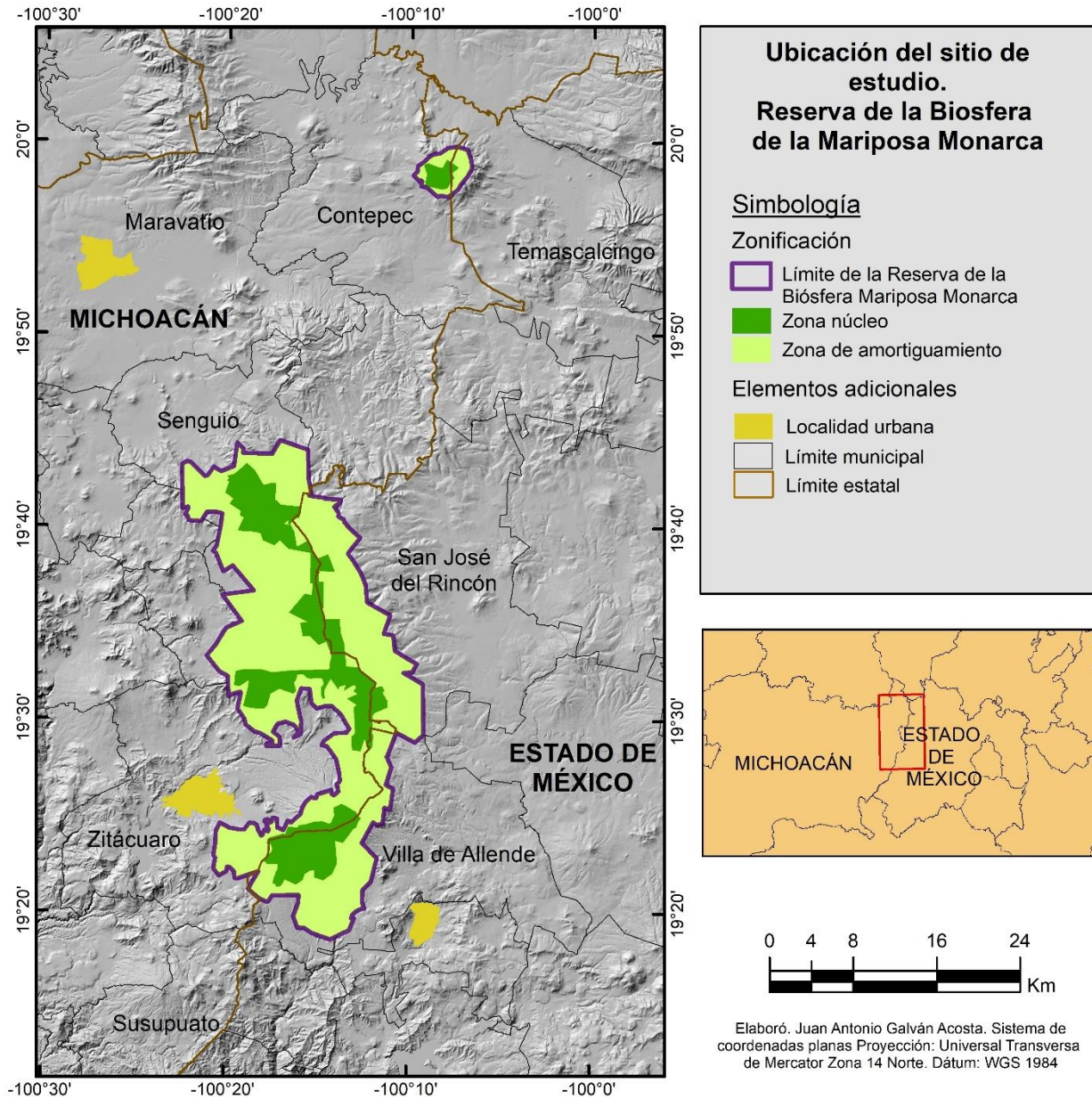


Figura 2.1 Contexto de la zona de estudio. Subzonificación, límites municipales y núcleos urbanos

La Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca cuenta con un área total de 56,259 hectáreas, las cuales dentro del Estado de Michoacán abarcan los municipios de Contepec, Senguio, Angangueo, Ocampo, Zitácuaro y Áporo, mientras que en el Estado de México se expanden por los municipios de Temascalcingo, San Felipe del Progreso, Donato Guerra y Villa de Allende. Zitácuaro es la ciudad más cercana a la RBMM.



La RBMM forma parte de la provincia fisiográfica del Sistema Volcánico Transversal. Su historia geológica predominantemente vulcano-tectónica ha generado la formación de morfologías de ese tipo: volcánicas como conos de escoria, depósitos piroclásticos, lahares y derrames de lava junto con la disección de algunos sitios y la formación de desniveles considerables, tal como se puede observar en la figura 2.2. Tiene un clima de tipo templado subhúmedo, con temperaturas medias anuales que van de los 8° C a los 22° C, y precipitaciones promedio de 70 mm a 1,200 mm. Las temperaturas del mes más frío suelen oscilar entre los -3° C y los 18°C (CONANP, 2001).

Entre las especies florales más características se encuentran el bosque de oyamel (característico de la zona núcleo), bosque de pino, bosque de pino-oyamel, bosque de encino y bosque de cedro. Se han reportado cerca de 200 especies animales características del Sistema Volcánico Transversal, cuya distribución es causada por la confluencia de las dos regiones biogeográficas de México: neártica y neotropical. (CONANP, 2001). De todas las especies, la más característica sin restarles importancia a todas las demás, es la mariposa monarca (*Danaus plexippus*).

Desde los primeros días del mes de noviembre hasta el mes de febrero del año siguiente, las comunidades de mariposas monarcas arriban y permanecen dentro de la Reserva procedentes del norte del continente como un mecanismo de refugio invernal originado prácticamente desde el equinoccio de otoño, en el que paulatinamente conforme se avanza hacia el solsticio de invierno, las horas luz y la temperatura comienzan a disminuir en el norte de América.



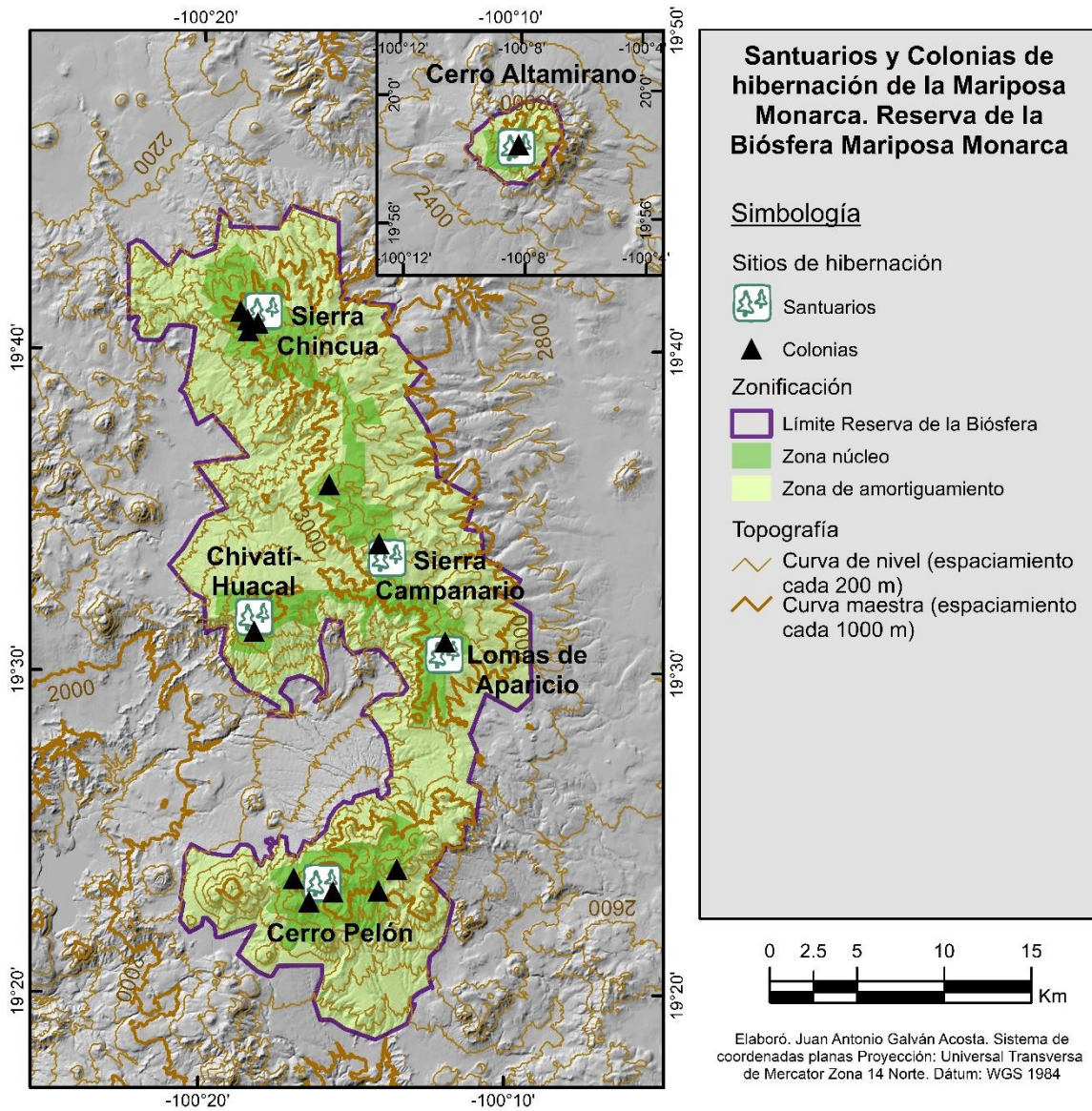


Figura 2.2 Contexto de la zona de estudio. Subzonificación, topografía, santuarios y colonias de hibernación. Fuente: Rendón y Vidal (2014)

De acuerdo con Islas *et al.* (2015) la mariposa monarca se asienta en la Reserva durante el invierno, porque esta área cuenta con una serie de características medioambientales para que la especie pueda hibernar allí: una precipitación menor a los 68 mm totales del periodo invernal, una temperatura media de entre 9° y 12°C para el mismo periodo, una mínima de entre 0° y 3°C y una máxima que va de 17° a 19°C, una elevación de más de



2,800 msnm y menor a 3,400 msnm, así como una pendiente que oscila entre 3-48%, entre otras más (figura 2.2).

Existen en Norteamérica, dos poblaciones migratorias de mariposa monarca (*Danaus plexippus*), una de menor tamaño que la otra, la cual migra desde las montañas rocosas hacia el estado de California y se alberga durante el invierno en bosques de eucalipto, mientras que la segunda lo hace desde el noroeste de los Estados Unidos y sureste de Canadá, a lo largo de 4,000 km hacia la zona centro de México, en sitios puntuales de hibernación dentro de la RBMM (Rendón y Vidal, 2014; figura 2.2; tabla 2.1).

Tabla 2.1 Colonias de hibernación de la mariposa monarca dentro de la RBMM agrupadas por santuario. Se tomaron los ejemplos más representativos de cada uno.

Estado	Santuario	Colonia	
Michoacán	Cerro Altamirano	Ejido Contepec	
	Cerro Pelón	Ejido Nicolás Romero	
	Chivatí-Huacal	Comunidad Indígena Carpinteros	
	Sierra Campanario	Ejido El Rosario	
	Sierra Chincua		Propiedad Federal
			Ejido Cerro Prieto
			Ejido El Calabozo Fraccionamiento I
Lomas de Aparicio	Crescencio Morales		
Estado de México	Cerro Pelón	Ejido El Capulín	
		Ejido Mesas Altas de Xoconusco	
		San Pablo Malacatepec	
	Sierra Campanario	Ejido La Mesa	

Fuente: Rendón y Vidal, 2014

Para el caso de la RBMM, un santuario es un área que alberga características naturales únicas y excepcionales que lo hacen merecedor de algún tipo de protección, mientras que la colonia es uno o un conjunto de sitios puntuales integrados a un santuario, en los que se reconoce que alguna vez la mariposa monarca ha hibernado, desde su



descubrimiento en 1975 (<http://www.soymonarca.mx/santuarios.html>). Existen colonias en las que se reconoce que año tras año la mariposa monarca llega e hiberna allí (por ejemplo, colonia El Rosario en el santuario de Sierra Campanario; figura 2.2; tabla 2.1) mientras que en otros se tienen registros esporádicos de su presencia (por ejemplo, la colonia Mesas Altas de Xoconusco, en el santuario de Cerro Pelón; Rendón y Vidal, 2014; figura 2.2; tabla 2.1).



3. Materiales y Métodos

3.1 Las bases de datos

3.1.1 Mallas de datos del Climatic Research Unit

Para estimar las tendencias de la temperatura a escala nacional, se utilizaron bases de datos de tipo ráster de datos climáticos llamados CRU TS3.10 del Climatic Research Unit elaborados por Harris *et al.* (2014). Se asume a estos datos como el comportamiento de las variables climáticas (y en particular de la temperatura) a escala nacional o gran escala dada la resolución de los mismos, las fuentes de información que alimentan esas bases de datos, y porque, de acuerdo con los autores, este tipo de información “solo deberá ser usada para el análisis de tendencias en el clima” (Harris *et al.*, 2014).

Estos archivos de tipo ráster fueron descargados del Climatic Research Unit (CRU), por medio de la página del International Research Institute for Climate and Society, por sus siglas en inglés IRI (<https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.UEA/.CRU/>).

Los archivos tienen una resolución espacial de 0.5° y tienen la característica de contener dentro de cada píxel el valor de diferentes variables climatológicas como son las temperaturas media, máxima y mínima, rango diurno de temperatura, precipitación, cobertura nubosa, entre otras. Para cumplir los objetivos planteados, las variables que se utilizaron fueron la temperatura máxima, mínima y media mensual. Dado que los datos descargados de la plataforma se encuentran en valores mensuales, fue necesario convertirlos a valores anuales, y posteriormente a valores estacionales.



CRU tiene un cubrimiento espacial de escala mundial, la cual abarca prácticamente todas las masas continentales del planeta con excepción de la Antártida. Se eligió el formato de descarga GeoTiff puesto que es compatible con Sistemas de Información Geográfica (SIG), además de contar con una georreferenciación.

De acuerdo con Harris *et al.* (2014), estas mallas de datos climáticos fueron generadas a partir de las observaciones registradas en una gran cantidad de estaciones distribuidas por todo del planeta, más otras bases de datos climáticos en formato ráster ya existentes.

De acuerdo con López (2015), un reanálisis es un proceso en el que, por medio de un conjunto de avanzados sistemas o modelos de asimilación de datos, permite integrar toda la información del dominio atmosférico con la incorporación de información proveniente de diversas fuentes: estaciones en superficie, radiosondeos, mediciones en aviones, mediciones en barcos, imágenes de satélite, entre otros. La diversidad de fuentes de información meteorológica enriquece en buena medida la calidad de los datos. A su vez, estos últimos son integrados en mallas regulares, de diversas resoluciones

2.2.2 Nodos de temperatura de UNIATMOS

Para llevar a cabo el análisis de las tendencias de la temperatura a escala regional, se utilizaron datos de temperatura máxima y mínima mensual para el periodo que comprende desde enero de 1979 a diciembre de 2009, los cuales fueron obtenidos de los nodos de reanálisis del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM (<http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/kml/>), cuya descarga se lleva a cabo a nivel municipal en formato Excel. Se asume que estos datos representan el comportamiento de las temperaturas en una escala regional dada la resolución de los mismos y las fuentes de información que alimentan dicha base. De acuerdo a los metadatos de dichos nodos, se



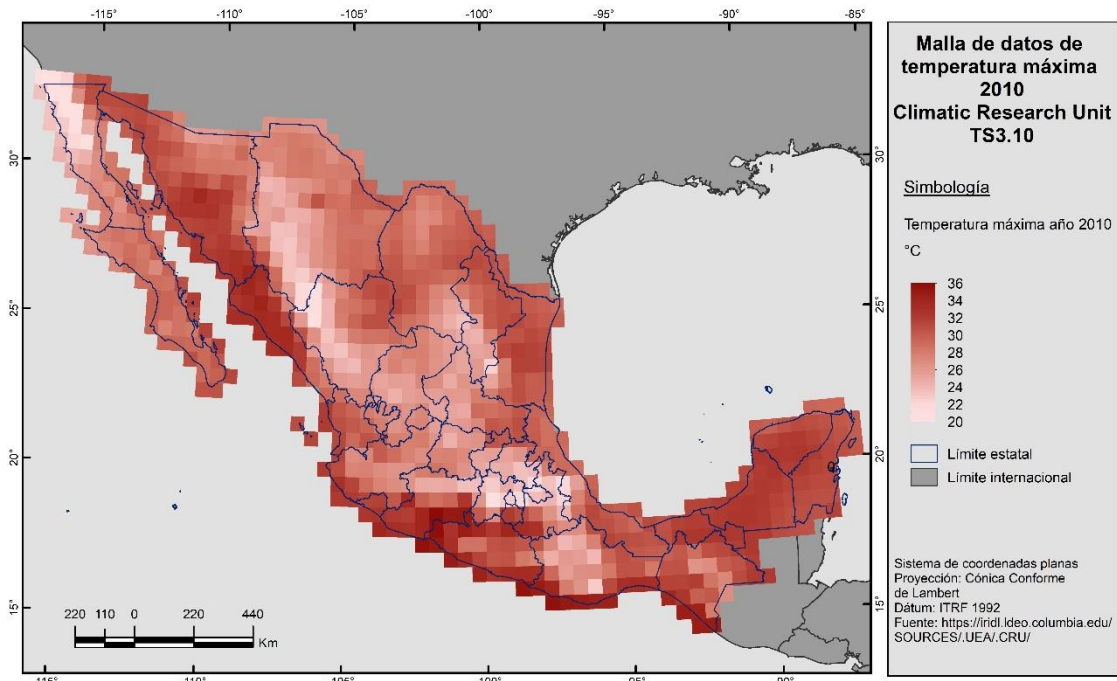


Figura 3.1 Ejemplo de una malla de temperatura media anual para el año 2010 del Climatic Research Unit (CRU), colocada en un SIG, con una capa de entidades federativas sobrepuesta. Ese tipo de mallas fueron usadas en el cálculo de la tendencia para esa variable, a escala nacional. Se trata de una geometría cuadrada que al transformar su proyección en cónica, adquiere esa forma.

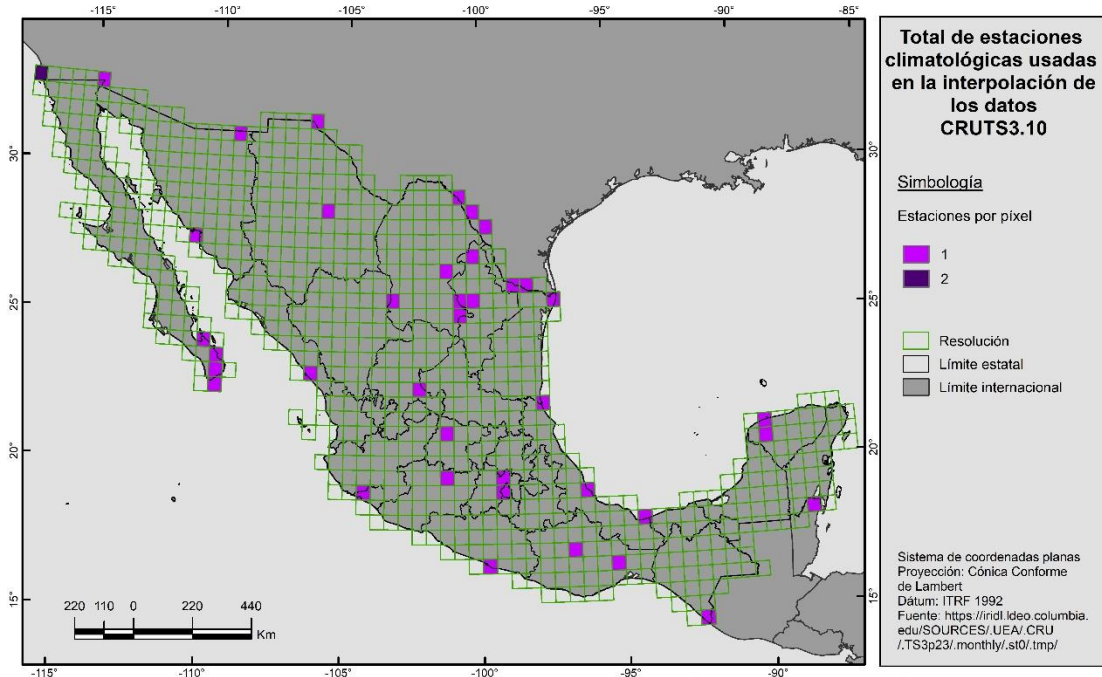


Figura 3.2 Ubicación de las estaciones climatológicas que fueron usadas para la creación de las mallas de CRU. Fuente: Harris *et al.* (2014)

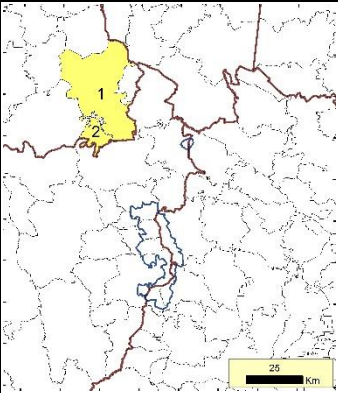
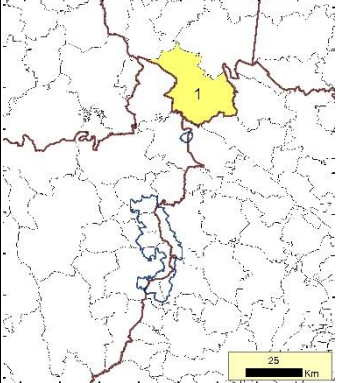


trata de una malla de puntos creada para todo el territorio nacional (un total de 24,984 puntos), la cual posee una resolución espacial de 9 x 9 km. La información climatológica se extrajo de mallas o ráster de temperaturas mensuales, generadas por medio de la interpolación de los valores de la misma variable, observados en las estaciones climatológicas del SMN, además de datos provenientes de satélites y otras estaciones en superficie. Todos estos datos son asimilados e interpolados por modelos específicos que cumplen esa función.

Tabla 3.1 Ubicación de los municipios para la descarga de los nodos de UNIATMOS

Estado	Municipios		Ubicación
Estado de México	1. Acambay 2. Amanalco 3. Atlacomulco 4. Donato Guerra 5. El Oro 6. Ixtapan del Oro 7. San Felipe del Progreso	8. San José del Rincón 9. Santo Tomás 10. Temascalcingo 11. Valle de Bravo 12. Villa de Allende 13. Villa Victoria	
Michoacán	1. Angangueo 2. Contepec 3. Epitacio Huerta 4. Irimbo 5. Juárez 6. Jungapeo 7. Maravatío	8. Ocampo 9. Senguio 10. Susupuato 11. Tlalpujahua 12. Tuxpan 13. Zitácuaro	



<p>Guanajuato</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Jerécuaro 2. Tarandacuao 	
<p>Querétaro</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Amealco 	

Fuente: elaboración propia con base en los datos de los nodos del Servicio Meteorológico Nacional, y con información vectorial del INEGI

En concordancia con la delimitación de la zona de estudio descrita anteriormente, se hizo uso de los nodos correspondientes a los municipios que abarcan esa zona (tabla 3.1). Con esos municipios quedó cubierta toda el área comprendida por la RBMM además de un área buffer (figura 3.3). En total se contó con un registro de 119 nodos tanto para la RBMM como para la zona buffer.

3.1.3 Estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional

Con el propósito de hacer el análisis de las tendencias a escala local, se utilizaron datos de algunas estaciones climatológicas del SMN. Se asumen como la fuente más próxima del comportamiento de la temperatura en la escala local.



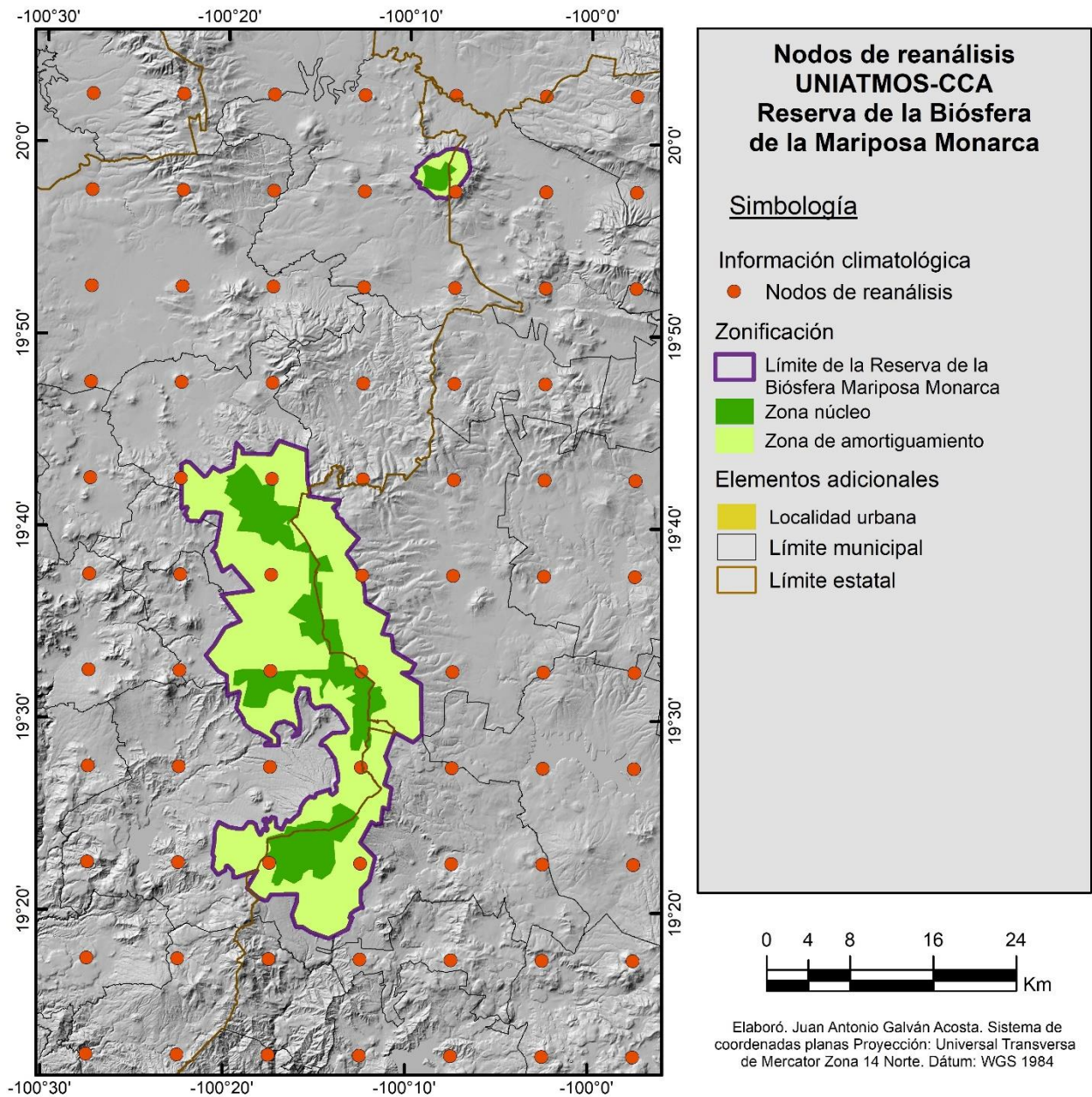


Figura 3.3 Ubicación de los nodos de reanálisis del Centro de Ciencias de la Atmósfera, y su espaciamiento de 9 km entre cada uno.

Se llevó a cabo un proceso de selección de las estaciones bajo criterios específicos de calidad de la información (tabla 3.2). El uso de información sin previa evaluación de su estructura o consistencia incrementa el grado de incertidumbre sobre los resultados obtenidos (Castro y Carvajal, 2010) Al aplicar dichos criterios, solamente fue posible seleccionar dos estaciones: Cuesta del Carmen 15197 y Palizada 15066 (figura 3.4).



Se usaron los datos de temperatura máxima y mínima mensual de la base de datos de CLICOM. Con la base de datos de temperaturas mensuales, se tuvo que eliminar el cálculo de temperaturas anuales proporcionado por el propio SMN, para poder aplicar los criterios de control de calidad: el cálculo de temperaturas anuales no toma en cuenta la cantidad de meses con los que se tenga registro en un año, así sea uno o doce. Por esa razón, solo se tomaron en cuenta valores mensuales y se hizo nuevamente el cálculo con los criterios mostrados en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Criterios usados en la selección de estaciones climatológicas, para el análisis de tendencias de temperatura a escala local.

Criterio	La estación debe cumplir con:
Periodo	Un registro instrumental que abarque por lo menos de 1981 a 2010 para homologar los periodos con las bases de datos anteriores.
Cantidad de meses para tomar en cuenta una temperatura anual	Diez o más meses con datos de temperatura de los doce que conforman una temperatura anual.
Cantidad de meses para tomar en cuenta una temperatura estacional	Dos o más meses de temperatura de los tres que conforman una temperatura estacional (por ejemplo, DEF).
Número de años	Un registro de temperaturas anuales y estacionales de por lo menos 20 años, a lo largo del periodo 1981-2010

Fuente: elaboración propia con base en los datos de los nodos del Servicio Meteorológico Nacional, y con información vectorial del INEGI

En el primer criterio, se verificó que las estaciones contaran con un periodo de registro que iniciara en 1981 y terminara en 2010 para homologarlas con las bases de datos anteriores, o bien, que tuvieran un periodo de registro tal que el periodo 1981-2010



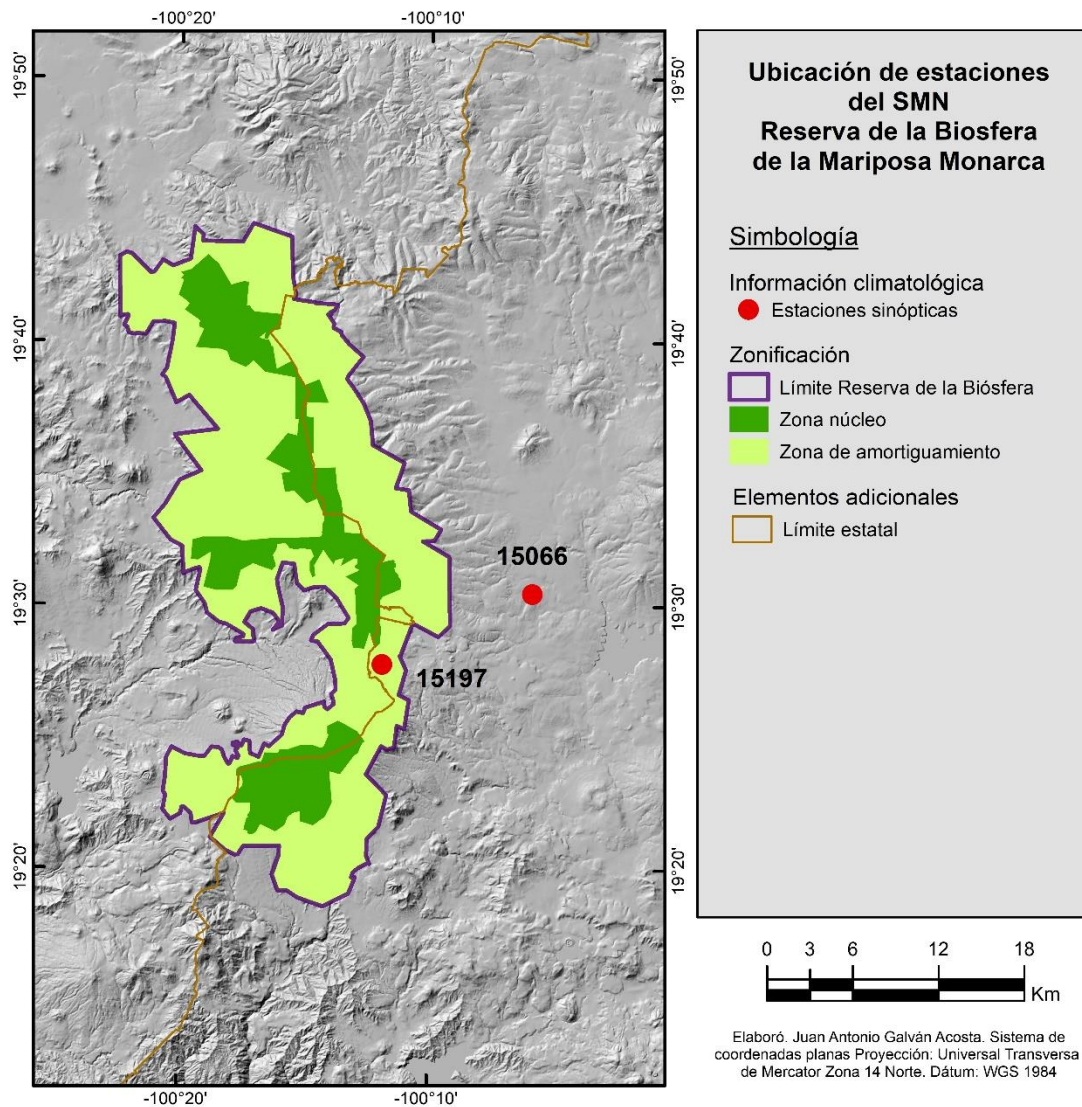


Figura 3.4 Ubicación de las estaciones climatológicas usadas para la estimación de tendencias a escala local

estuviera contenido (por ejemplo, una estación con un periodo de registro 1960-2016 sería válida).

El segundo criterio dicta que se requieren para un solo año, por lo menos, diez meses con algún valor de temperatura, de los doce que son necesarios para calcular una temperatura anual, mientras que el tercer criterio propone que se requieren por lo menos dos meses de los tres que son necesarios para obtener una temperatura estacional (por



ejemplo, para obtener el promedio de Diciembre-Enero-Febrero, bastaría con tener dos de esos tres meses).

El cuarto y último criterio indica que de toda la normal 1981-2010, se requiere tener por lo menos veinte años completos tanto de temperaturas anuales como de temperaturas estacionales. En ocasiones el SMN proporciona la información de una estación que cumple con el periodo 1981-2010, pero que no tiene los treinta años completos.

En el caso de los datos de escala local, adicional a dicho control de calidad, se llevó a cabo un análisis exploratorio de los datos mediante su representación gráfica, misma en la que se detectó una tendencia. Por esta misma razón, no se llevó a cabo una prueba de homogeneidad de datos, puesto que la tendencia es causa de heterogeneidad de los mismos (Castro y Carvajal, 2010).

3.2 Procesamiento estadístico

3.2.1 Método de regresión lineal simple por mínimos cuadrados

La regresión lineal simple es un método estadístico funcional para el estudio de tendencias de fenómenos de diversa índole, incluidos aquellos de carácter climatológico, como son las temperaturas. Algunos trabajos (Herrmann *et al.*, 2005; Barbosa *et al.*, 2015) dan cuenta de la aplicación que este procedimiento estadístico puede tener en los estudios medioambientales.

Estos modelos estadísticos lineales generan funciones lineales que se ajustan a todo un conjunto de puntos distribuidos en un gráfico de dispersión (función 1):

$$(1) \quad y = bx_0 + mx_1$$



donde b y m son los dos parámetros que componen a la función: ordenada al origen y pendiente respectivamente. En palabras de Wackerly, *et al.*, (2008), el método de mínimos cuadrados es “un procedimiento para estimar los parámetros de cualquier modelo lineal”, mismo que genera una recta que se ajusta a todo un conjunto de n puntos distribuidos en un gráfico de dispersión. En este proyecto, los puntos dispersos se forman por la intersección de la variable dependiente ‘ y ’ que son las temperaturas máximas y mínimas anuales y estacionales, y de la variable independiente ‘ x ’ que serán los años de registro de esas temperaturas: en el caso de las temperaturas locales el periodo que comprende desde 1981 hasta 2010, y para las temperaturas locales el periodo que abarca desde 1979 a 2009.

El método de mínimos cuadrados comprende dos ecuaciones para obtener los parámetros de la ecuación de la recta asociada: una para determinar el valor de la ordenada al origen (función 2) y otra para calcular el valor de la pendiente (funciones 3 y 4).

$$(2) \quad b = \bar{y} - m\bar{x}$$

Para efectos de este proyecto, el único parámetro que se obtuvo es el de la pendiente cuyas fórmulas de cálculo se muestran a continuación (ecuaciones 3 y 4), puesto que esta representa el valor de cambio en la variable ‘ y ’ por unidad de la variable ‘ x ’, que, en el caso de los datos trabajados, se interpretaría como el cambio promedio de temperatura en °C al año (°C/año).

$$(3) \quad m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$



O de forma simplificada:

$$(4) \quad m = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Dicha fórmula puede aplicarse para las series de tiempo de variables climatológicas por ejemplo, en la que sus datos al ser representados en un gráfico de dispersión, se pueda apreciar la dirección que siguen los puntos en su conjunto, y con ello poder estimar una tendencia: con este proyecto, se plantea aplicar el método de mínimos cuadrados en la estimación de la pendiente pero no solo para una serie histórica de datos, sino para varias de ellas al mismo tiempo, de tal forma que esas tendencias se representen de manera cartográfica a diferentes escalas de análisis.

El método de mínimos cuadrados es una prueba estadística del tipo paramétrica, que para poder ser aplicada requiere que los datos de la muestra bajo el experimento cumplan con dos características (Espinosa, 2013):

1. Deben ser datos cuya distribución de probabilidad sea de tipo normal
2. Los datos de las variables deben medirse en escalas de intervalos, es decir, entre valor y valor de la muestra se puede tener una distancia numérica.

Para fines de este proyecto, se aplicó este procedimiento para conocer las tendencias solo a escala global y escala regional porque se cumple con la normalidad en la distribución de los datos de temperatura.

Cuando se crea este tipo de información tipo reanálisis que involucra la asimilación de datos por sistemas o modelos especializados, se pasa también por un proceso de homogenización. De acuerdo con Ribeiro *et al.*, (2015) la homogeneización de series de



datos en climatología consiste en la “detección, verificación, y posible corrección de *outliers*, elaboración de pruebas estadísticas de homogeneidad y estimación de datos faltantes”. Por esa razón se asume que estas bases de datos han sido corregidas de cualquier valor anómalo que pudiera haberse detectado en las fuentes de información: tanto las mallas como los nodos se encuentran homogeneizados. Así mismo, es esa la razón por la que se usó un método estadístico lineal para estimar las tendencias en ambas escalas.

3.2.2 Prueba no paramétrica de Mann-Kendall

La prueba de Mann-Kendall es un test estadístico usado para comprobar la existencia de tendencias en series históricas. A diferencia del método de mínimos cuadrados descrito anteriormente, esta prueba forma parte de las pruebas estadísticas del tipo no paramétricas o de distribución libre, las cuales no requieren de una distribución de probabilidad específica en los datos de la muestra para ser aplicada.

Se ha demostrado que esta prueba es una valiosa herramienta para la detección de tendencias, y por tener la ventaja de no requerir una forma específica de distribución de los datos (Ribeiro *et al.*, 2015), además de contar con referencias en su aplicación para datos de temperatura (Espín, 2005; Jain y Kumar, 2012).

Si bien se sabe que la prueba de Mann Kendall no es el único método para evaluar el comportamiento de una variable climatológica, si representa la posibilidad de observar la conducta de una y solo una serie histórica en conjunto, a diferencia de otras pruebas que requieren, por lo menos, dos muestras. En este estudio se aplicó únicamente a las dos estaciones climatológicas.



3.3 Estimación de tendencias por escala

3.3.1 Estimación de tendencias a escala nacional

Para obtener el valor de cambio promedio anual para las temperaturas máximas, medias y mínimas anuales y estacionales a escala nacional, se propuso un procedimiento cartográfico en el que la fórmula de la estimación de la pendiente del modelo de mínimos cuadrados, se efectuara en un SIG con las mallas de temperatura. De hecho, esta última es una de las propuestas de este proyecto: trabajar tendencias de temperatura o de cualquier variable representada en un archivo de información tipo ráster que forme una serie de tiempo, pero con una herramienta en SIG para obtener un resultado espacial y en diversas escalas.

Bajo el procedimiento anterior, las series de tiempo que podrían ser representadas en un gráfico de dispersión corresponden a los valores transversales que tiene un solo píxel verticalmente en las 30 mallas de temperatura correspondientes a una climatología (30 años). Cualquier otro píxel de la malla podrá formar una serie histórica distinta.

Bajo el entendido de que cada píxel de la malla contiene un valor de temperatura distinto que el resto de los píxeles, y que por ello al generar su serie histórica de cada uno también deberá tener un comportamiento distinto en el tiempo, necesariamente la tendencia a futuro deberá ser distinta entre píxeles. Es por ello que para calcular la tendencia de forma automática de los 840 píxeles que abarca el ráster de temperaturas en todo el territorio nacional dicha fórmula debió aplicarse en un Sistema de Información Geográfica (ArcMap 10.5) con una herramienta conocida como álgebra de mapas (Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator), la cual permite llevar a cabo operaciones



matemáticas con este tipo de archivos. De esa forma, se estableció que la variable ‘x’ corresponde al tiempo (en años) y la variable ‘y’ a la temperatura media anual.

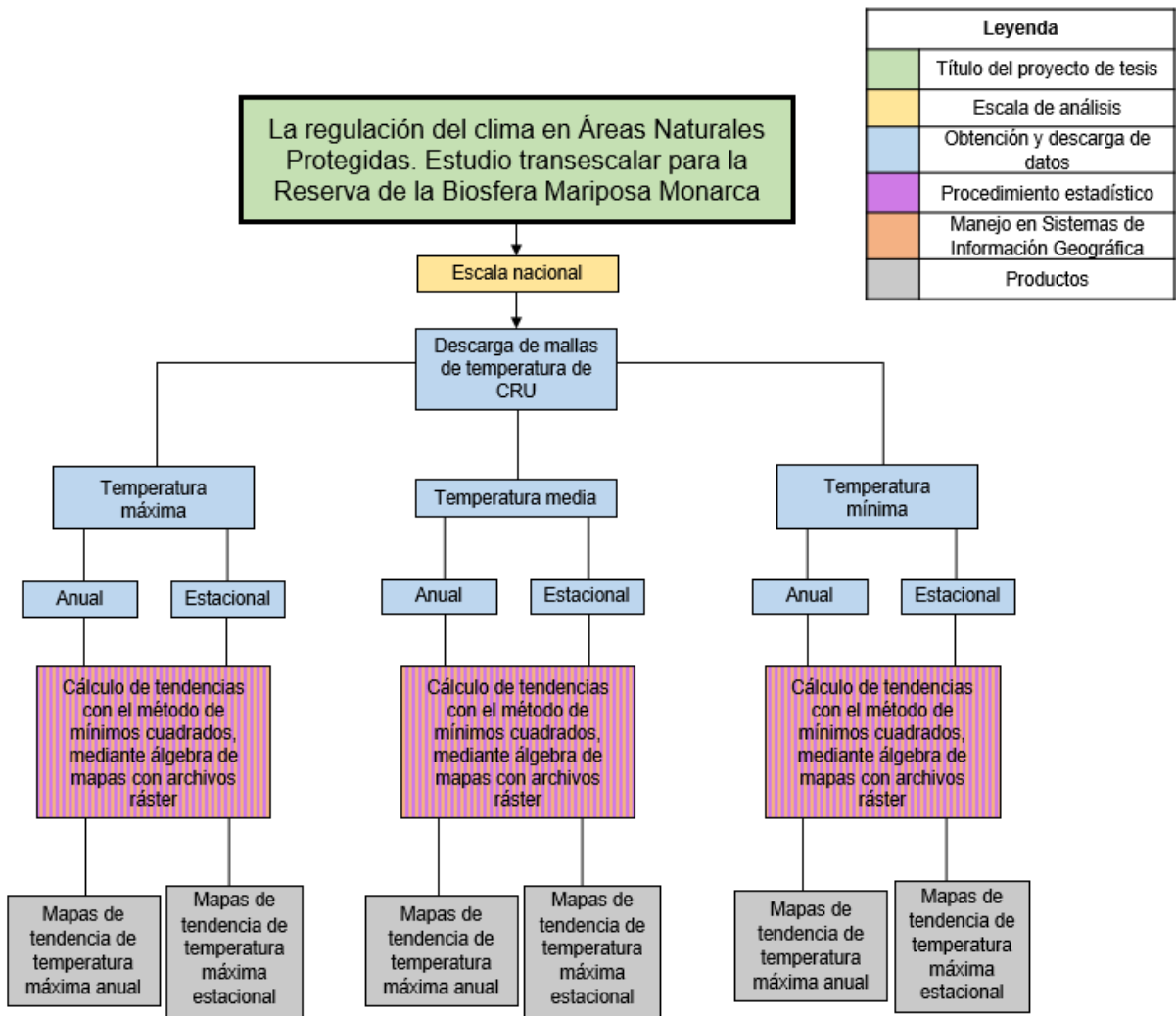


Figura 3.5 Esquema metodológico para la estimación de tendencias a escala nacional

La figura 3.5 muestra el esquema metodológico que se siguió para estimar las tendencias a escala nacional. Básicamente consta de tres partes: la obtención y descarga de los datos, el procedimiento estadístico y el manejo en Sistemas de Información Geográfica. Adicionalmente se muestran los productos obtenidos de cada uno de los pasos



La tabla 3.3 resume el procedimiento que se llevó a cabo para cada uno de los miembros que integran la fórmula. En dicho cuadro se puede apreciar que para iniciar a estimar la tendencia es necesario contar con las 30 mallas de datos, una por año, ya sea anual o estacional, para que al final se genere una sola, la de las tendencias

3.3.2 Estimación de tendencias a escala regional

La figura 3.6 muestra el esquema metodológico para el cálculo de las tendencias a escala regional. Como se podrá observar en él, a partir de la información de la temperatura mensual contenida en cada nodo se calculó el valor de temperatura anual para cada uno de ellos, tanto para las temperaturas máximas y mínimas, por medio de una hoja de cálculo en Excel. Con ello, se construyó una nueva base de datos únicamente con los 30 valores de temperatura (desde 1979-2009). Posteriormente, se calculó la pendiente por medio del método de mínimos cuadrados de la serie de datos de cada uno de los 119 nodos.

Posteriormente se seleccionaron únicamente de los valores estacionales. Se eligieron de cada nodo y de cada año, los valores correspondientes a los tres meses, según la estación. Con ello se efectuó de nueva cuenta la estimación de valor medio y posteriormente el valor de la pendiente.

Al obtener los valores de tendencia tanto de temperaturas anuales como estacionales, se elaboró un nuevo archivo en Excel en donde se obtuvieran las coordenadas de los nodos y las tendencias. Con ello, se hizo una exportación de los datos a una capa vectorial de puntos, misma que tuviera en su tabla de atributos los valores de tendencia obtenidos. Para generar la cartografía de tendencia por cada variable, se llevó a cabo una



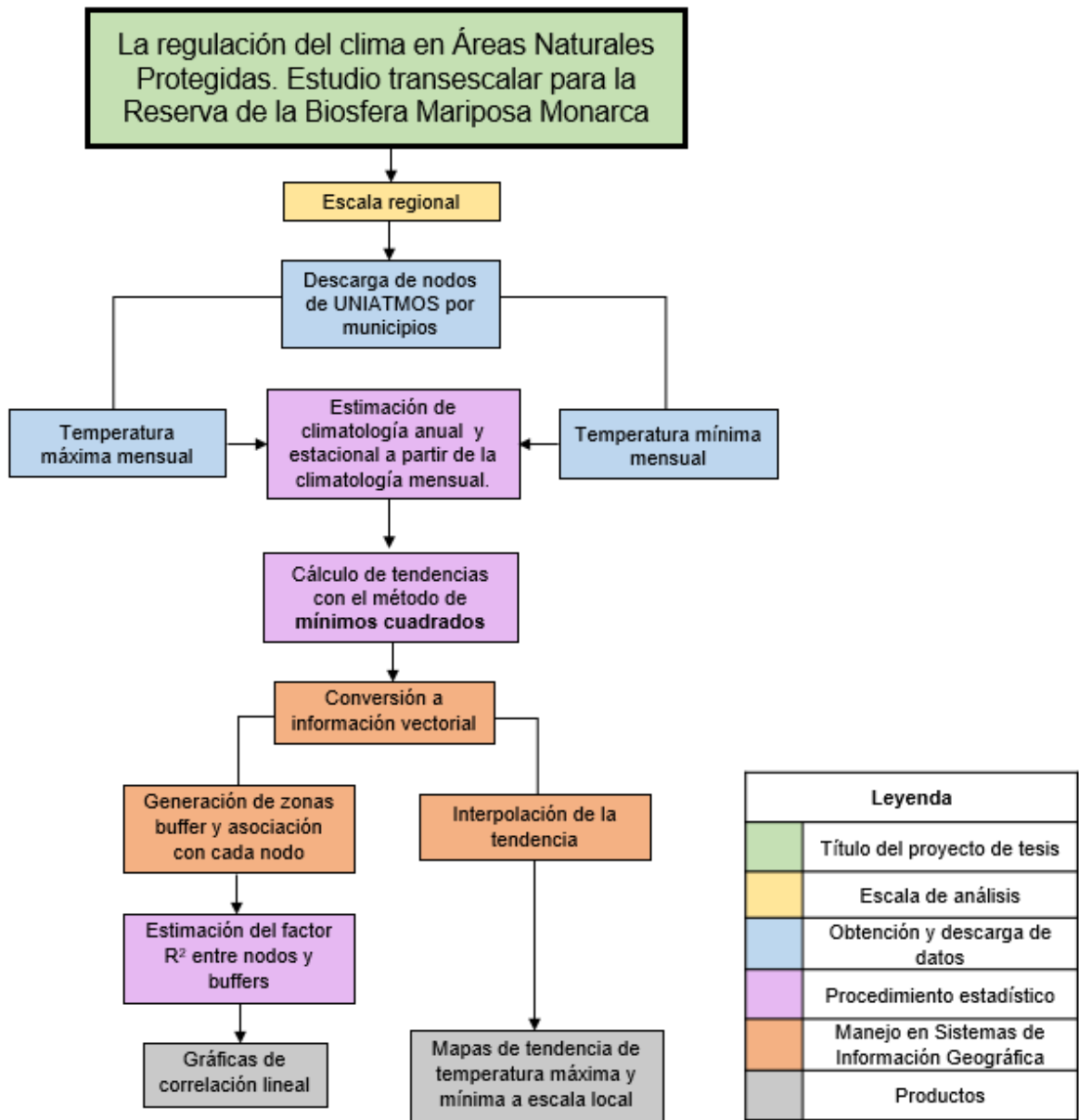


Figura 3.6 Esquema metodológico para la estimación de tendencias a escala regional

interpolación con un método Spline (Spatial Analyst Tools > Interpolation > Spline) para predecir los valores de cambio en las superficies que no tienen nodo. La interpolación se llevó a cabo con la capa de puntos de nodos y sus valores contenidos en la tabla de atributos. Se colocó dentro de los parámetros de la interpolación una máscara, la cual fue la delimitación de la zona de estudio para que el Spline se extendiera hasta esa zona.



Tabla 3.3 Síntesis de la fórmula de mínimos cuadrados para la obtención del valor de cambio, con el manejo de archivos ráster

Término	Descripción general	Cantidad de ráster iniciales	Cantidad de ráster finales
$\sum_{i=1}^n X_i Y_i$	Es la suma del producto de la variable X y la variable Y. Cada uno de los ráster se multiplicó por su año correspondiente (p.e. el ráster de temperatura de 1981 se multiplicó por 1981, y se generó un ráster nuevo). Se llevó a cabo el proceso 30 veces (porque son 30 años) y una vez teniendo los 30 ráster nuevos, se sumaron hasta obtener un primer ráster final (a)	30	1
$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i$	Es el producto de la suma de la variable X y de la variable Y, dividida entre la muestra. Por un lado, en el álgebra de mapas, se sumaron los 30 ráster iniciales, desde 1981 hasta el 2010 y se generó uno nuevo. Por otro lado, se sumaron todos los años, desde 1981 hasta 2010 (p.e. 1981+1982+1983+...+2010) en Excel, y se obtuvo un valor. Posteriormente, en el álgebra de mapas se multiplicó el ráster obtenido por la suma de los años, y se dividió entre 30. Con ello se obtuvo un segundo ráster final (b)	30	1
$\sum_{i=1}^n X_i^2$	Es la suma de los cuadrados de la variable X. En una hoja de cálculo en Excel se elevó al cuadrado cada uno de los años, y se obtuvo un valor (p.e. 1981 ² +1982 ² +1983 ² +...+2010 ²). Se obtuvo una primera cifra final (c)	0	0
$\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n X_i)^2$	Es la suma de la variable X elevada al cuadrado, y dividida entre la muestra. Se sumaron cada uno de los años, desde 1981 hasta 2010, y la suma total se elevó al cuadrado (p.e. [1981+1982+1983+...+2010] ²) Esa cifra resultante fue dividida entre 30, y se obtuvo una segunda cifra final (d)	0	0
Fórmula completa	En el álgebra de mapas, se ejecutó la fórmula final: el primer ráster menos el segundo, entre la primera cifra menos la segunda. Con ello se obtuvo un ráster final y definitivo, mostrando el valor de la pendiente de la recta, o bien, el valor de cambio anual promedio de temperatura por unidad de tiempo $\frac{a - b}{c - d}$	2	0



3.3.3 Análisis de proximidad y estimación de correlación estadística

Para conocer si existía alguna diferencia entre los valores de tendencia al interior y al exterior de la RBMM, se efectuó un análisis de correlación entre cada nodo dentro de la ANP y en la zona buffer. Cabe mencionar que este análisis estaba planeado para las tres

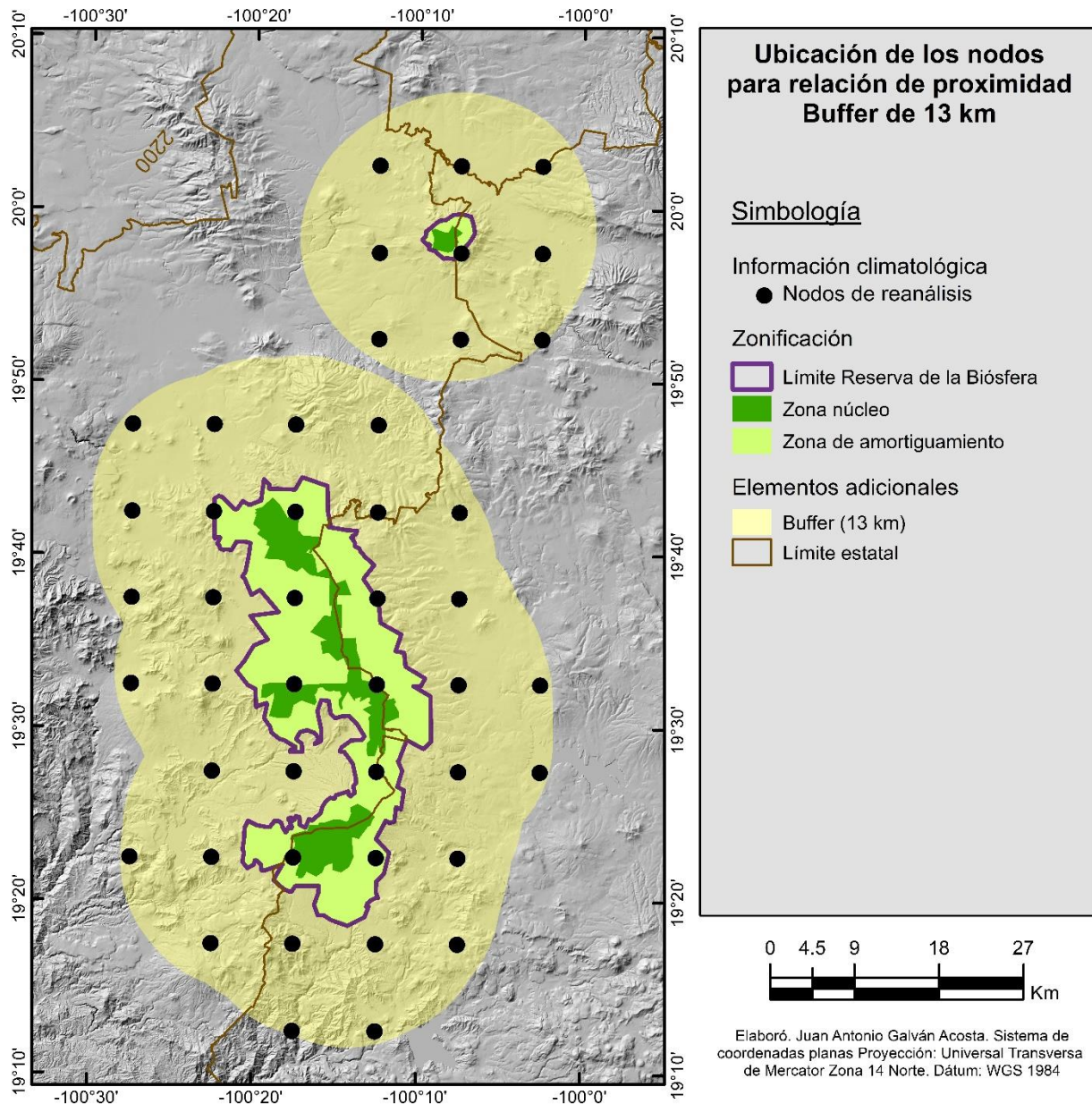


Figura 3.7 Distribución de los nodos usados para la relación de proximidad, en un área buffer de 13 km (n=45)



escalas, sin embargo, existieron para la escala nacional y la escala local, limitaciones que impidieron extender el análisis hacia dichas escalas: la resolución y la cantidad de estaciones, respectivamente.

Con el uso del SIG, se aplicó una herramienta para conocer la distancia que existe entre los límites de la RBMM y cada nodo hacia afuera y hacia adentro (Analysis tools > Proximity > Generate Near Table). Se tomó como muestra todos los nodos que se encontraran al interior de un buffer de 11 km a la redonda de los dos polígonos que integran la RBMM (n= 45; figura 3.7). Con esos datos de proximidad se elaboraron gráficos de dispersión que mostraran la relación distancia-tendencia y se estimó una correlación estadística R^2 . Este procedimiento permitió conocer si la RBMM tiene influencia en las tendencias de temperatura en el sitio de estudio.

3.3.4 Estimación de tendencias a escala local

Como los datos de las estaciones climatológicas son información que no ha sido procesada ni homogeneizada, se optó por usar un método diferente para estimar tendencias en esa escala local. Las mallas de alta resolución y los nodos de las escalas ya descritas pasaron por un proceso de homogenización y ponderación de datos, que las vuelve menos heterogéneas y cuya distribución de probabilidad fácilmente se distingue como de tipo normal. No así los datos de estaciones climatológicas, en los que no se tiene certeza sobre el tipo de distribución que forman.

En el paquete estadístico XLSTAT (<https://www.xlstat.com/es/>) se aplicó la prueba de Mann-Kendall a las series históricas de temperatura máxima y mínima de ambas estaciones, para determinar tres valores importantes: el valor del estadístico τ de



Kendall, la pendiente de Sen y el valor-p. Con esta prueba estadística se contrastó la hipótesis H_0 “No existe tendencia en la serie de tiempo bajo estudio” contra la hipótesis H_a “Existe una tendencia en la serie de tiempo bajo estudio”.



4. Resultados

En este capítulo se muestran los resultados correspondientes a las tendencias de escala nacional, regional y local, mostradas en ese orden, así como el análisis de proximidad efectuado para las tendencias de escala regional.

4.1 Tendencias a escala nacional

Se calcularon las tendencias para todo el país con el objetivo de tener una primera aproximación en la gran escala, sobre papel que tienen las Áreas Naturales Protegidas en la regulación climática, en particular la RBMM. Si bien la resolución espacial es poca, se espera conocer con estos datos si puede observarse una diferencia entre las tendencias dentro y fuera de la RBMM. Por esa razón, la siguiente secuencia de mapas (figuras 4.1 a 4.15) muestra la distribución de tendencias de temperaturas medias, mínimas y máximas, tanto anuales como estacionales a escala nacional, construidas con base en los datos del periodo 1981-2010.

4.1.1 Temperatura media anual

La figura 4.1 muestra la distribución de las tendencias de temperatura media anual para todo el país. De manera general, se observa que, para la temperatura media anual, la mayor parte del territorio nacional tiende al calentamiento. Existen dos únicas zonas de enfriamiento: el noreste de la Península de Baja California, justo en el triángulo que forman el Río Colorado, Tijuana y Ensenada y el centro-noreste del país, en la convergencia de los estados de Nuevo León, Coahuila, Zacatecas y San Luís Potosí. En



ambas zonas, la tasa de cambio anual es la que tiene mayor valor en esta variable, pues alcanza los $-0.07^{\circ}\text{C}/\text{año}$. Esta tasa de cambio negativa significaría a lo largo de un periodo de 30 años (bajo el cual está elaborada esta cartografía) un cambio total de -2.1°C desde 1981 hasta 2010.

Así mismo, se reconocen dos zonas en donde existen las tendencias positivas con los valores más altos: el centro de los estados de Sonora y Chihuahua, y el sur de Chiapas. En ambos casos, la tendencia alcanza un valor de 0.07°C , lo que en un periodo de 30 años significaría un incremento a la temperatura de hasta 2.1°C (figura 4.1)

Es importante señalar aquellas zonas en las que la tendencia es poco significativa o inexistente, aquellas en donde la temperatura no ha tenido cambios importantes en los

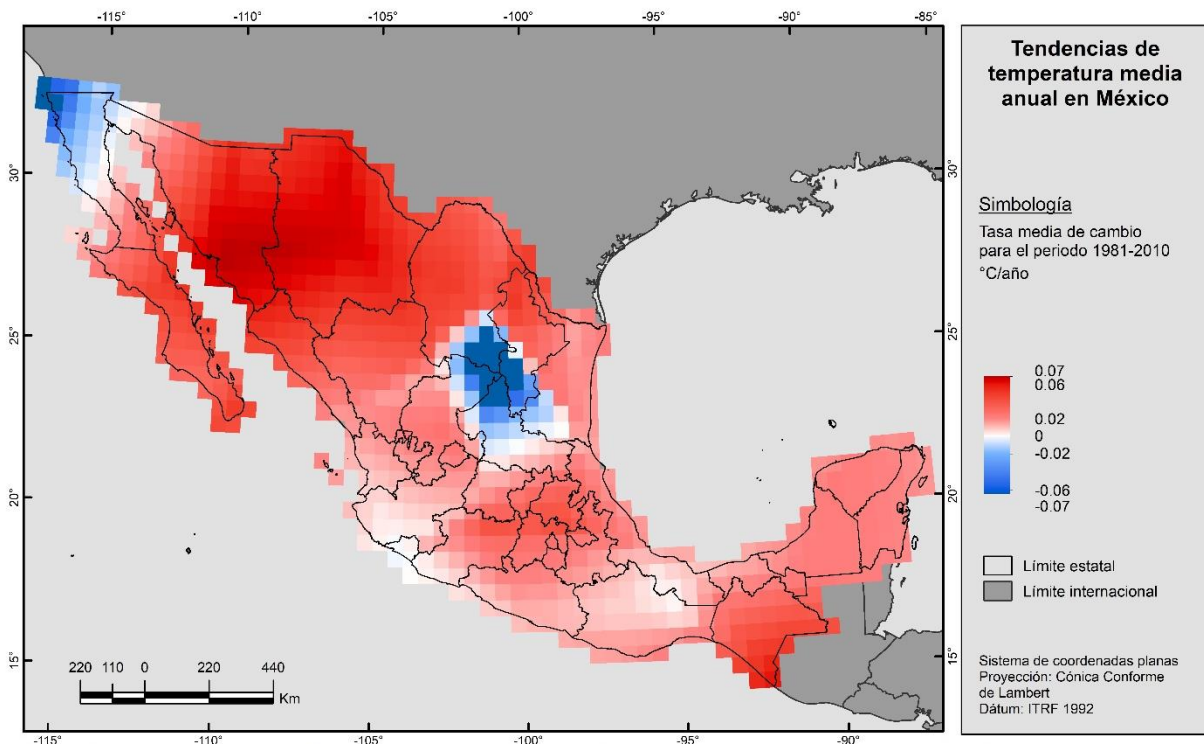


Figura 4.1 Tendencias de temperatura media anual a escala nacional.



últimos 30 años: el Istmo de Tehuantepec entre Oaxaca y Veracruz, y el estado de Colima, son dos ejemplos de dichas zonas. Existen dos zonas más que no presentaron tendencia: centro de San Luís Potosí y sur de Tamaulipas, y centro de la Península de Baja California, aunque en estos dos últimos casos esa tendencia nula es una transición entre el enfriamiento y el calentamiento (figura 4.1)

4.1.2 Temperatura media estacional

Las siguientes figuras (figuras 4.2 a 4.5) muestran cuatro mapas que ilustran el comportamiento de la tendencia de la temperatura media, pero estacional: periodo invernal (diciembre a febrero, DEF) el primaveral (marzo a mayo, MAM), el de verano (junio a agosto, JJA), y el de otoño (septiembre a noviembre, SON). En todos los casos, puede notarse que el patrón espacial de cambio de la temperatura replica el patrón de cambio de la temperatura media anual, descrita anteriormente: las zonas de enfriamiento y de calentamiento para la temperatura media anual tienen el mismo comportamiento que en la temperatura media estacional, a reserva de algunas diferencias que serán descritas en los siguientes párrafos.

La figura 4.4 muestra la distribución de tendencias para el verano (JJA). Esta es la estación del año cuyas tendencias son similares a las tendencias de la temperatura media anual, inclusive en los valores de cambio que oscilan entre -0.07 y 0.07°C/año (2.1 y $-2.1^{\circ}\text{C}/30$ años, respectivamente). Además, se conservan las zonas de enfriamiento y de calentamiento con respecto a la tendencia en la temperatura media anual, salvo la aparición de un enfriamiento en el Istmo de Tehuantepec.



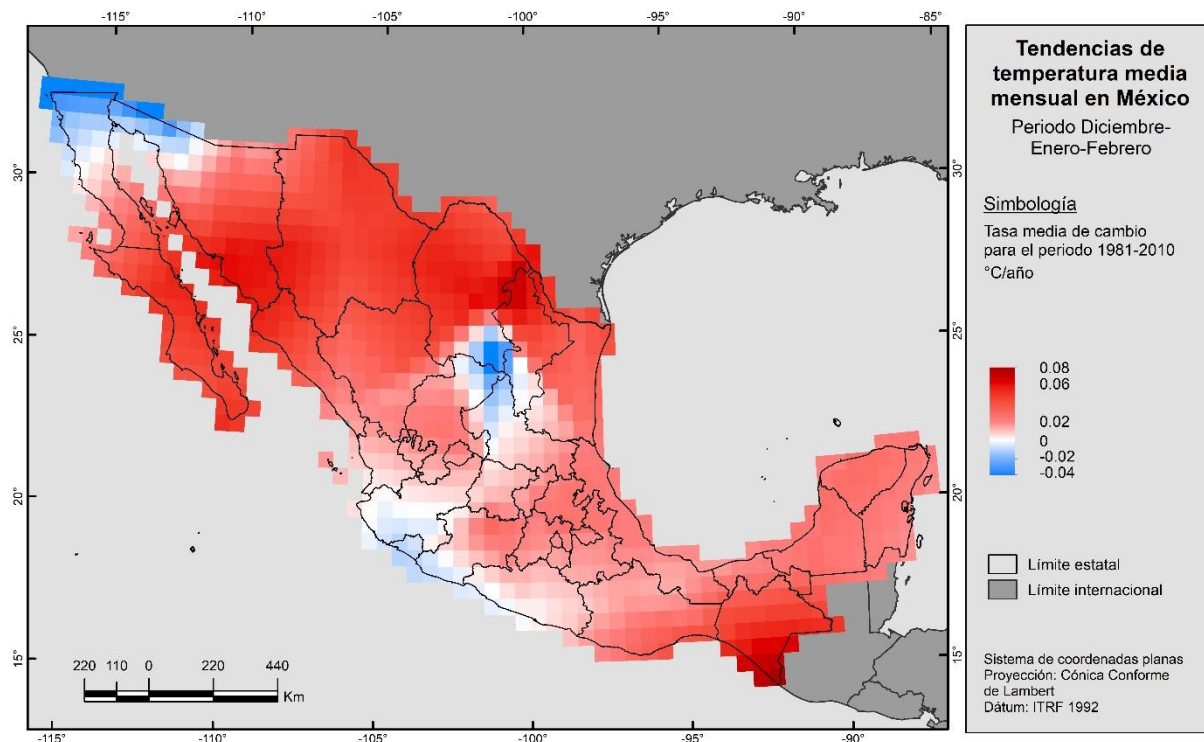


Figura 4.2 Distribución de tendencias de temperatura media mensual en México para el periodo invernal

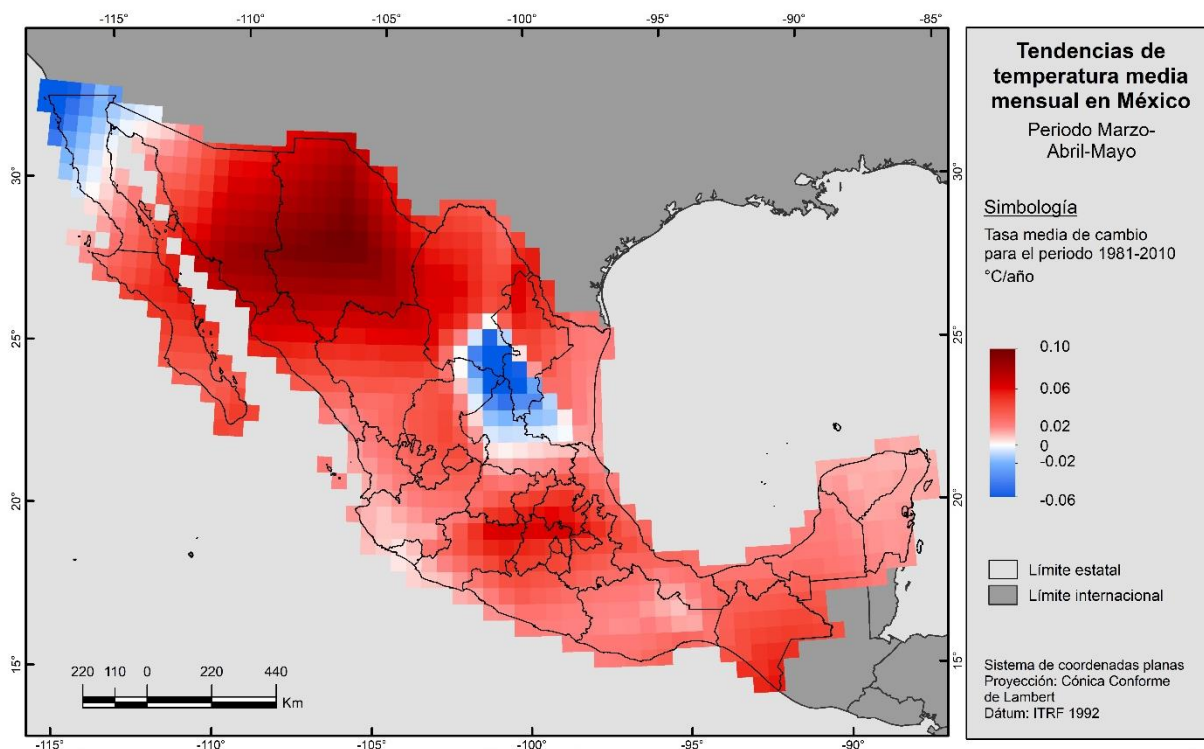


Figura 4.3 Distribución de tendencias de temperatura media mensual en México para el periodo primaveral



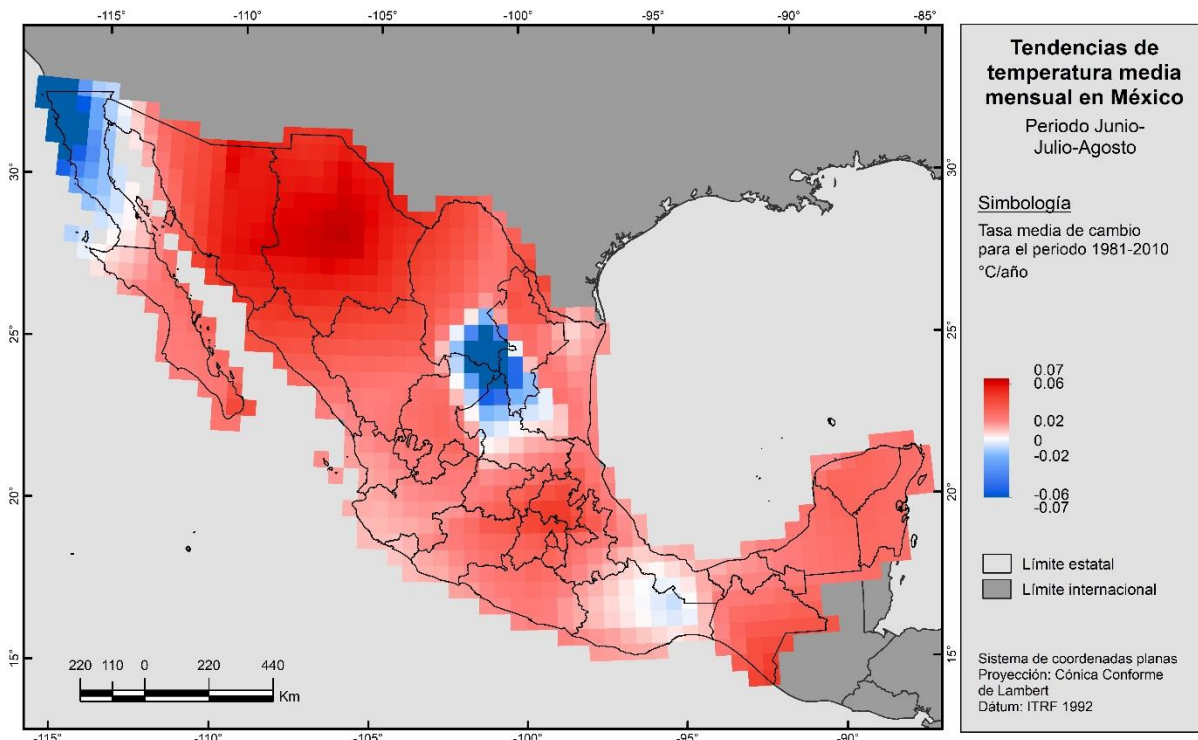


Figura 4.4 Distribución de tendencias de temperatura media mensual en México para el periodo veraniego

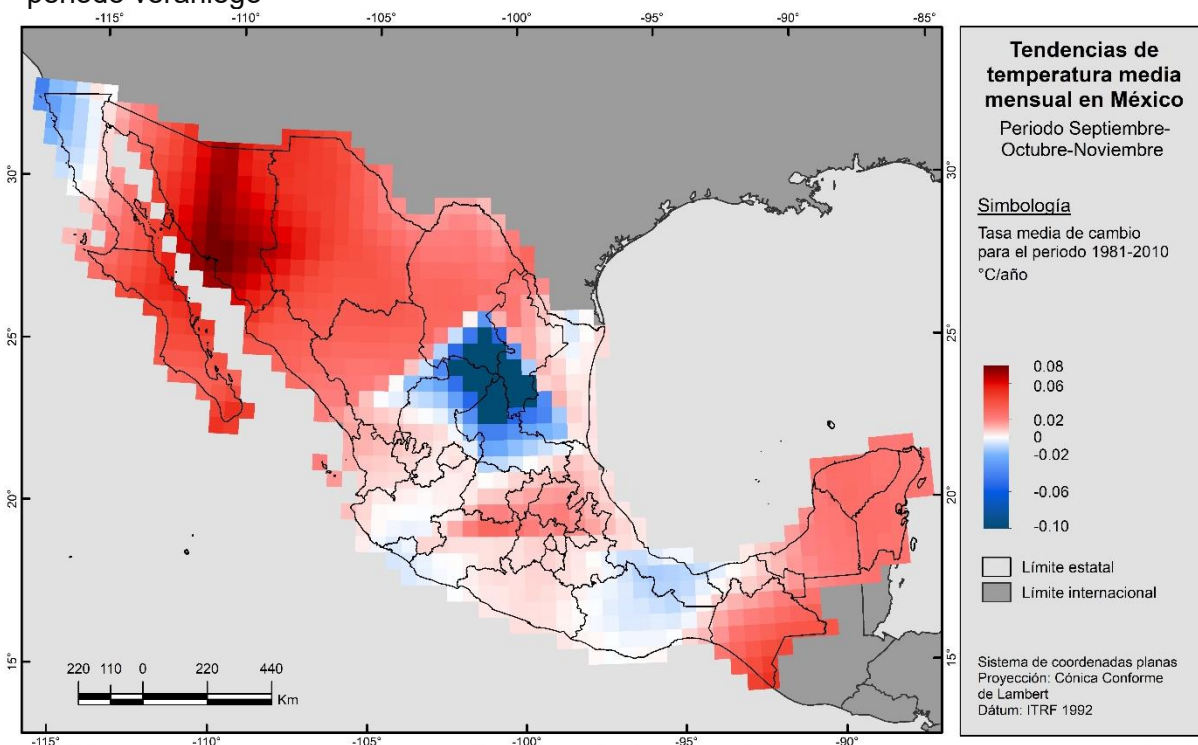


Figura 4.5 Distribución de tendencias de temperatura media mensual en México para el periodo otoñal



Las tendencias del periodo septiembre-octubre-noviembre (SON) se muestran en la figura 4.5. Se trata del escenario más severo en cuanto a tendencias negativas se refiere, puesto que los enfriamientos aumentan su cubrimiento espacial, de modo que en algunos sitios se alcanza el valor más bajo: -0.1°C/año ($-3^{\circ}\text{C}/30$ años) en el sur de Coahuila y norte de San Luís Potosí. De hecho, este es el único periodo de las temperaturas medias en el que se alcanzan los valores más bajos de tendencia negativa ($< -0.01^{\circ}\text{C/año}$). Se destacan zonas de enfriamiento que en el resto del año presentan una tendencia positiva: son los casos del norte de Tamaulipas, el sur de Jalisco, el oeste de Tabasco y todo el estado de Oaxaca.

La figura 4.3 muestra la distribución de tendencias de temperatura media primaveral (MAM). En él se puede observar que las tendencias con los valores más grandes ($> 0.1^{\circ}\text{C/año}$ o bien $>3^{\circ}\text{C}/30$ años) se presentan en esta estación del año en el centro de Sonora-Chihuahua,

4.1.3 Temperatura mínima anual

La figura 4.6 muestra la distribución de las tendencias para la temperatura mínima anual en todo el país. Se alcanzan en este caso tendencias entre $-0.08^{\circ}\text{C/año}$ ($-2.4^{\circ}\text{C}/30$ años) y hasta de 0.1°C/año ($3^{\circ}\text{C}/30$ años).

Con respecto a la temperatura media anual (figura 4.1) se mantienen los sitios en donde la tendencia de temperatura es más alta: centro de Sonora-Chihuahua y sur de Chiapas, si bien en este caso destaca Baja California Sur como un sitio con tendencias de hasta



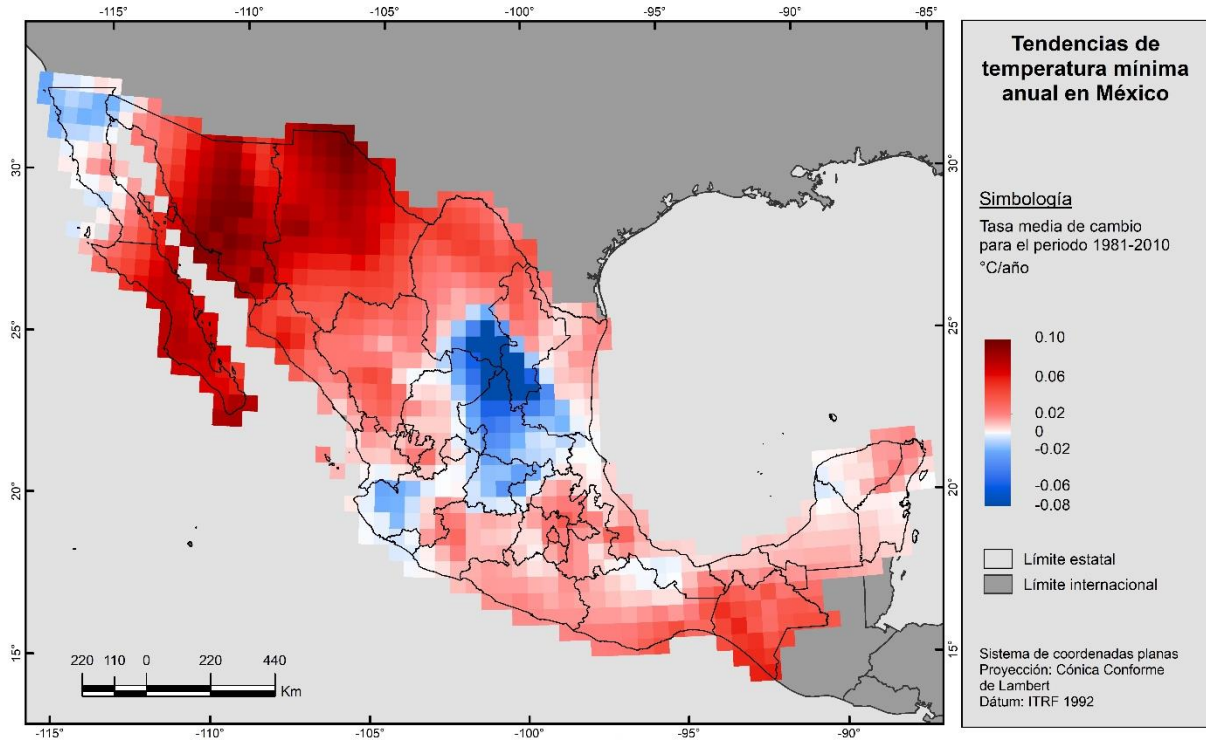


Figura 4.6 Distribución de tendencias de temperatura mínima anual.

0.1°C/año (3°C/30 años), mismo que en las temperaturas medias registraba incrementos moderados (figuras 4.1 a 4.5).

Así mismo, con respecto a las tendencias de temperatura media, en la temperatura mínima anual se mantienen los sitios cuya tendencia es negativa (figura 4.6): el extremo noroeste, y una parte del noreste del país. En este último, la tendencia al enfriamiento se extiende hasta el sur de Tamaulipas, por un lado, y por el otro hasta la región del Bajío. Otro sitio de enfriamiento que se destaca es el localizado en el occidente del estado de Jalisco. Es notable además algunas zonas en las que la temperatura no tiene una tendencia significativa: norte de Veracruz y este de Jalisco.

4.1.4 Temperaturas mínima estacional



Las tendencias de temperaturas mínimas estacionales se muestran en los cuatro mapas siguientes (figuras 4.7 a 4.10) Cabe resaltar que en estas cuatro estaciones se alcanzan valores de tendencia altos en comparación a los valores de las tendencias de temperaturas medias estacionales.

La figura 4.7 muestra el comportamiento de la tendencia para el periodo invernal (DEF). En ella, se puede observar que el sitio de enfriamiento localizado en el noreste del país, aumenta su superficie con respecto a lo visto en las tendencias de temperatura media (figuras 4.1 a 4.5): por un lado, cubre la totalidad del estado de Jalisco y sur de Nayarit y por el otro, alcanza el Estado de México. No obstante, es de resaltar que si bien la zona es mayor, los valores de cambio son menores con respecto a los registrados en temperaturas medias, puesto que el valor más bajo corresponde a $-0.06^{\circ}\text{C}/\text{año}$ ($1.80^{\circ}\text{C}/30$ años).

La figura 4.8 muestra el comportamiento de las tendencias para el periodo primaveral (MAM). En ella se puede observar que el centro de Sonora-Chihuahua apunta a un calentamiento severo con valores de tendencia de hasta $0.11^{\circ}\text{C}/\text{año}$ ($3.3^{\circ}\text{C}/30$ años), una tendencia que se observa también en el verano (JJA; figura 4.9).

Para las tendencias de la temperatura en el periodo otoñal (SON) ilustrado en la figura 4.10 es el estado de Sonora en donde los valores de tendencia son más altos: $0.1^{\circ}\text{C}/\text{año}$ ($3^{\circ}\text{C}/30$ años). En la parte sur y sureste del territorio la tendencia dominante es al calentamiento, aunque con valores que oscilan entre los 0.02°C y $0.06^{\circ}\text{C}/\text{año}$. En esta zona, se destaca al Istmo de Tehuantepec como una zona de enfriamiento para las cuatro estaciones del año.



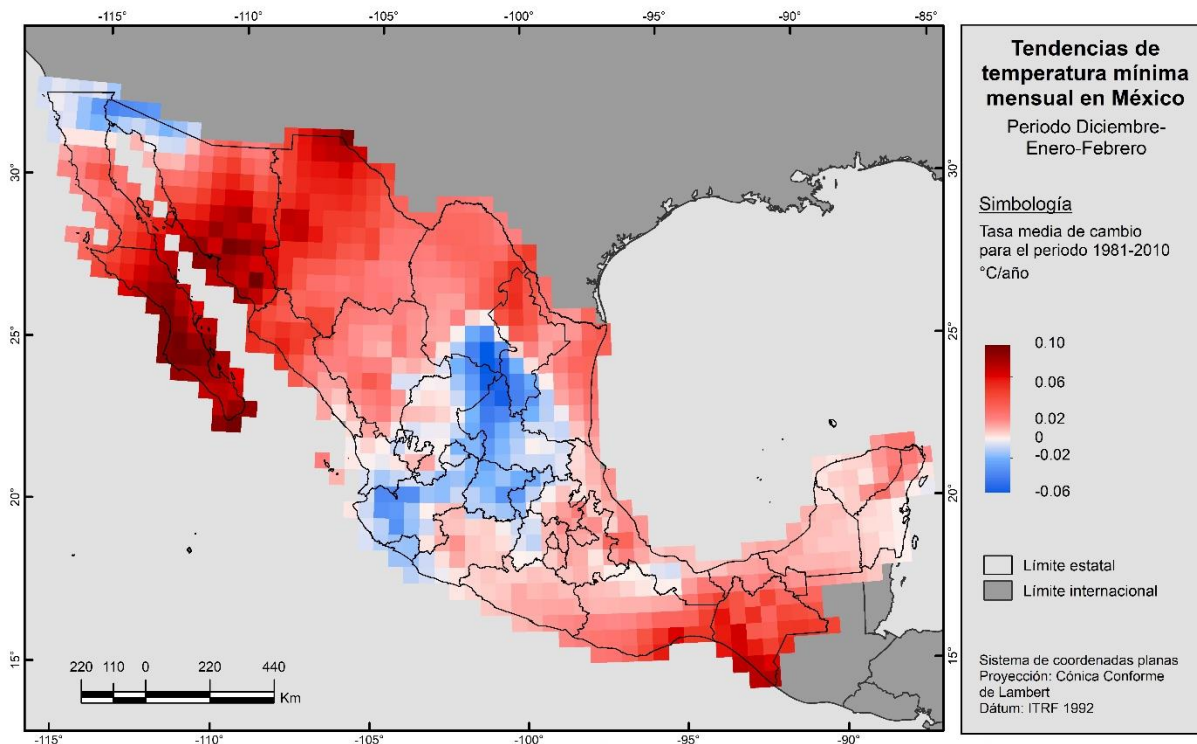


Figura 4.7 Distribución de tendencias de temperatura mínima mensual en México para el periodo invernal

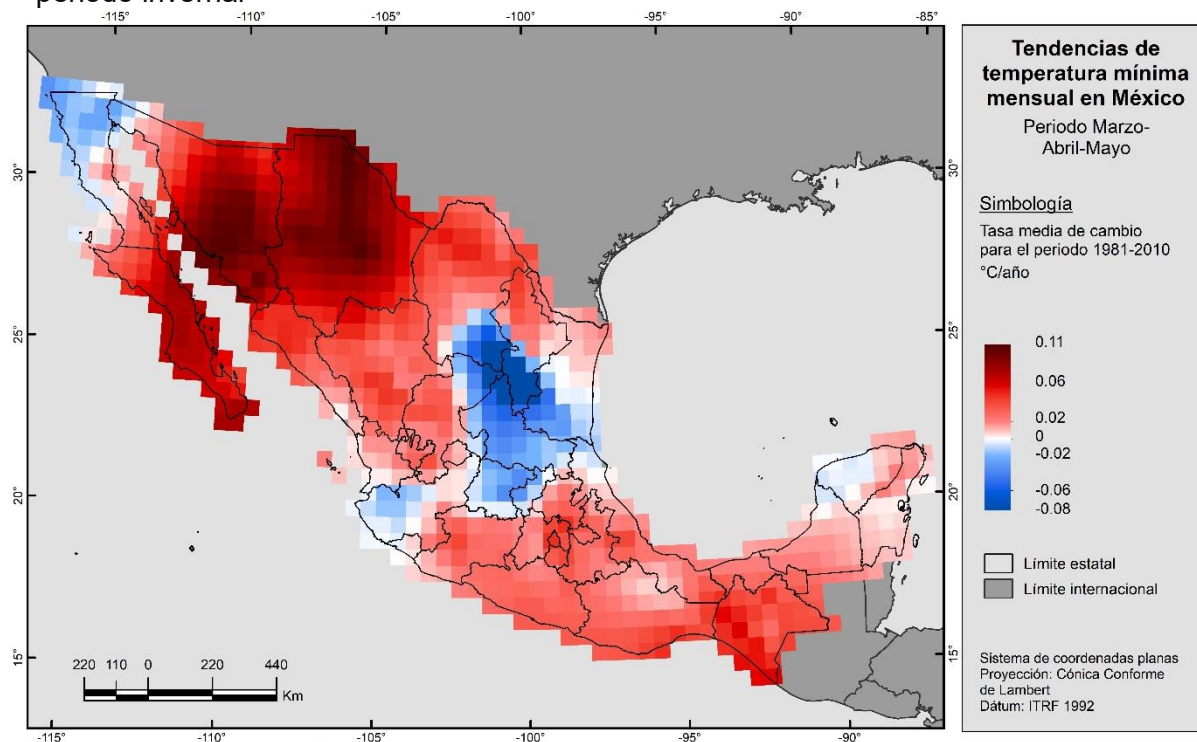


Figura 4.8 Distribución de tendencias de temperatura mínima mensual en México para el periodo primaveral



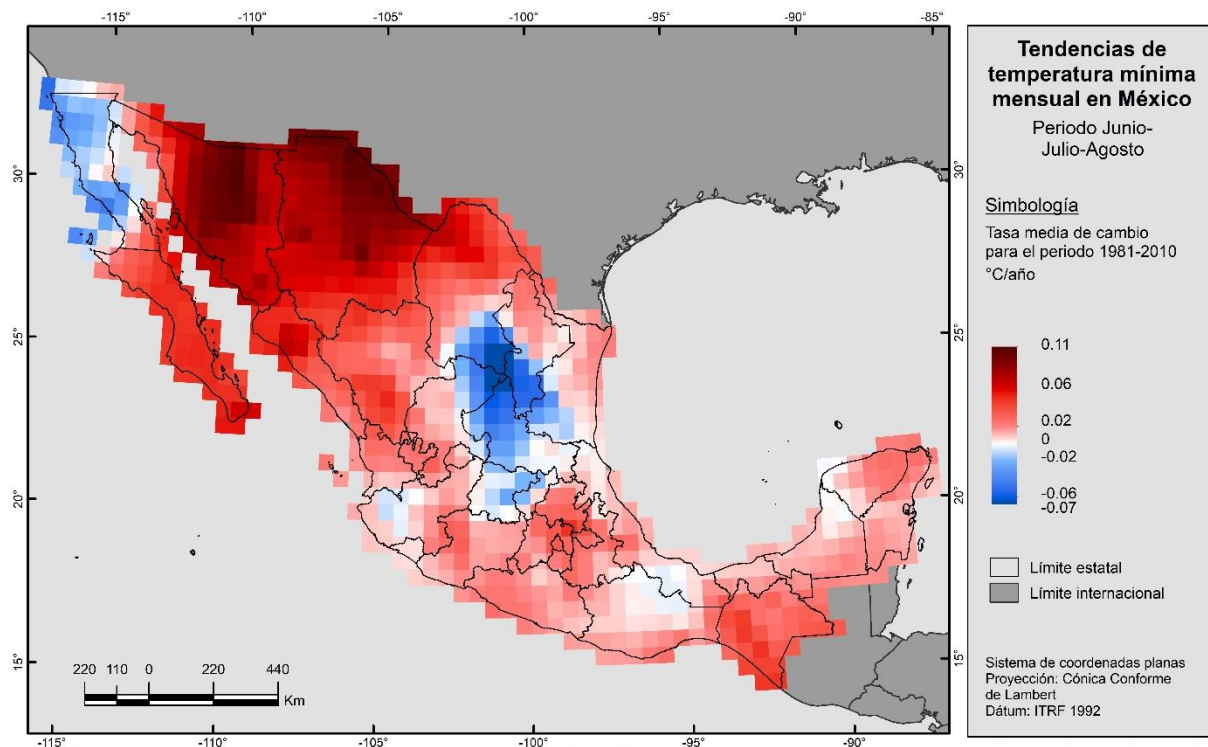


Figura 4.9 Distribución de tendencias de temperatura mínima mensual en México para el periodo veraniego

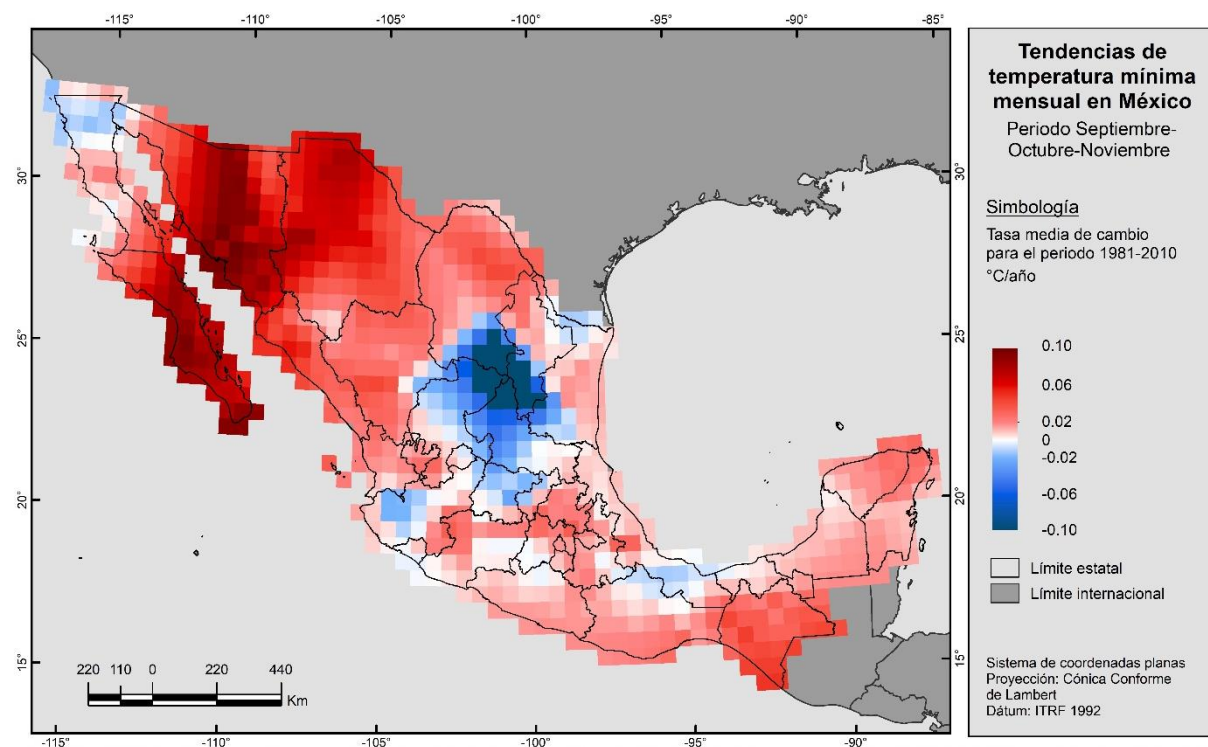


Figura 4.10 Distribución de tendencias de temperatura mínima mensual en México para el periodo otoñal



4.1.5 Temperatura máxima anual

La figura 4.11 muestra el comportamiento de las tendencias para la temperatura máxima anual en el país. En primer lugar, se destaca que es la estación del año en donde las tendencias hacia el calentamiento dominan en todo el país por sobre las de enfriamiento, con valores de cambio por encima de los 0.05°C/año (1.5°C/30 años): solo una porción del sur de México es la que se observa con una tendencia neutra o al enfriamiento.

La zona de enfriamiento localizada en el noreste del país, disminuye considerablemente su extensión en comparación a la mostrada en las tendencias de temperatura media y máxima anual, puesto que se restringe únicamente a la intersección de los estados de San Luís Potosí, Nuevo León, Coahuila y Zacatecas. Además, algunas zonas en las que

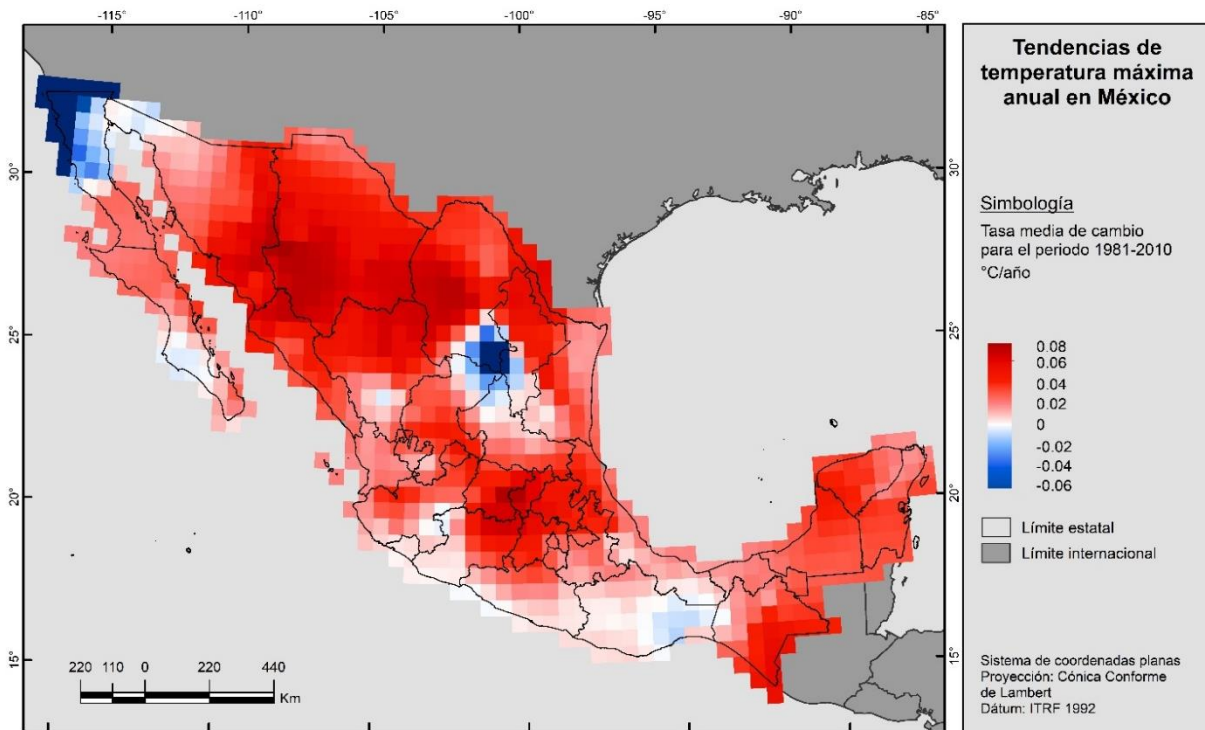


Figura 4.11 Distribución de tendencias de temperatura máxima anual en México



las temperaturas media o mínima apuntan a un enfriamiento (Jalisco, el Bajío o Estado de México; figuras 4.7 a 4.9) en las temperaturas máximas muestran una tendencia al calentamiento (figura 4.1)

4.1.6 Temperatura máxima estacional

Las figuras 4.12 a 4.15, muestran el comportamiento de las tendencias de la temperatura máxima estacional. Cabe señalar, que dichas tendencias estacionales replican el patrón de distribución espacial de las tendencias anuales, descrito anteriormente.

En la figura 4.13 se muestra el comportamiento de las tendencias para el periodo primaveral (MAM). Se resalta que en este periodo, el valor de la tendencia positiva es el más alto de todos los periodos (incluidos los de temperatura media y mínima), puesto que alcanza los 1.2°C/año ($3.6^{\circ}\text{C}/30$ años). Los sitios en donde se localizan dichas tendencias, son el centro de Sonora-Chihuahua, y el centro del país.

En cuanto a las zonas de tendencia negativa, la porción noroeste del territorio nacional se mantiene como una zona característica de enfriamiento, si bien para temperatura máxima disminuye considerablemente su extensión en tres periodos (DEF, MAM y JJA; figuras 4.12, 4.13 y 4.14). El periodo otoñal (SON; figura 4.15) muestra una distribución opuesta, dado que el enfriamiento del noreste aumenta su extensión territorial; de hecho, algunas zonas que durante el resto del año mantienen una tendencia hacia el calentamiento, para este periodo la mantienen hacia el enfriamiento: son los casos del sur de Durango, sur de Veracruz y todo el estado de Oaxaca, con valores que alcanzan los -0.1°C/año ($-3^{\circ}\text{C}/30$ años).



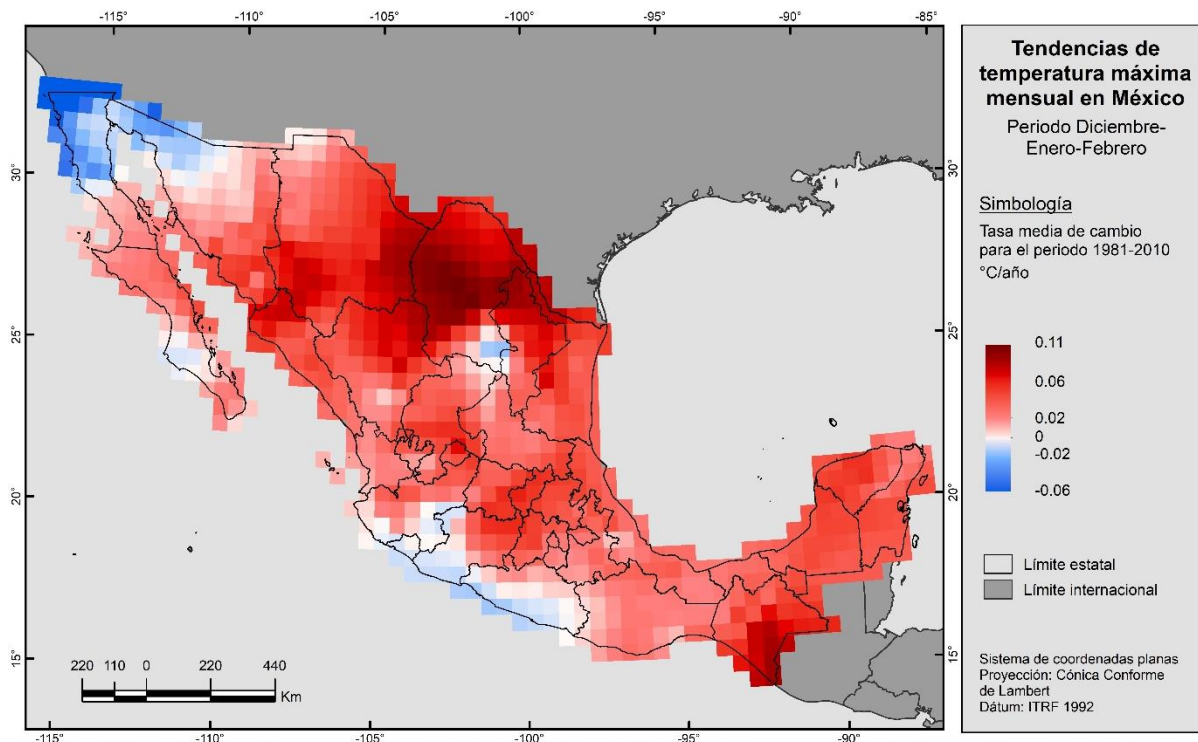


Figura 4.12 Distribución de tendencias de temperatura máxima mensual en México para el periodo invernal

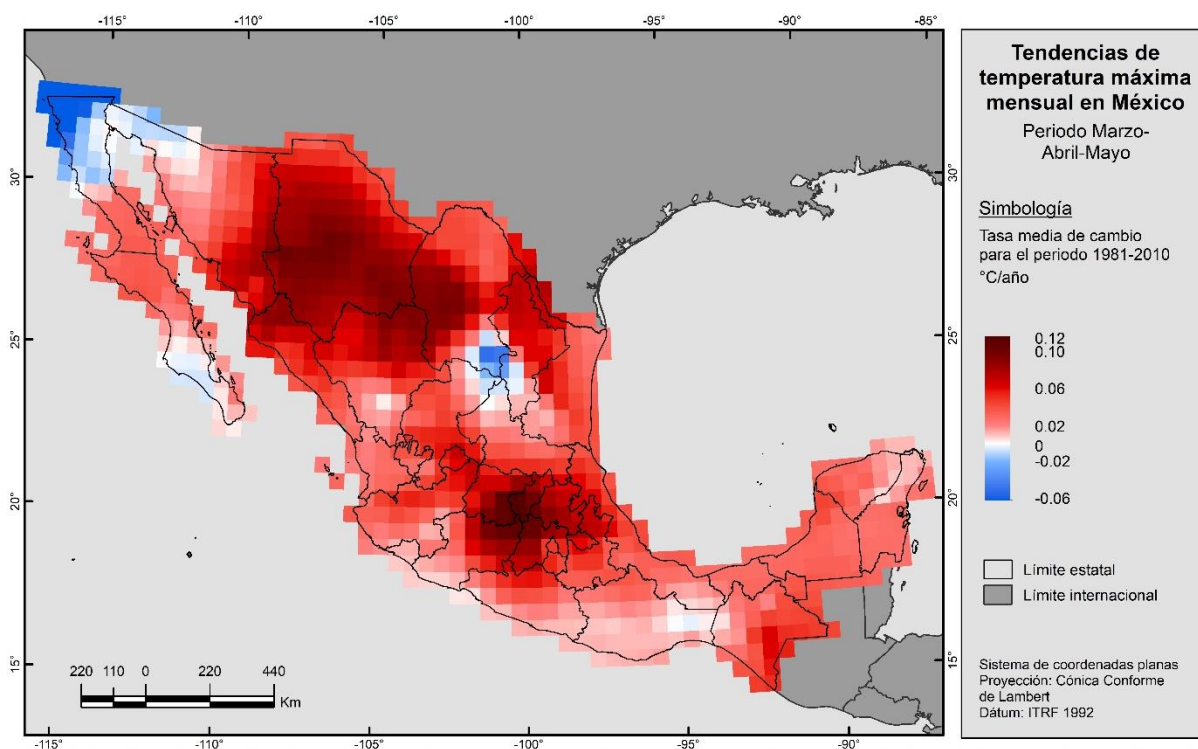


Figura 4.13 Distribución de tendencias de temperatura máxima mensual en México para el periodo primaveral



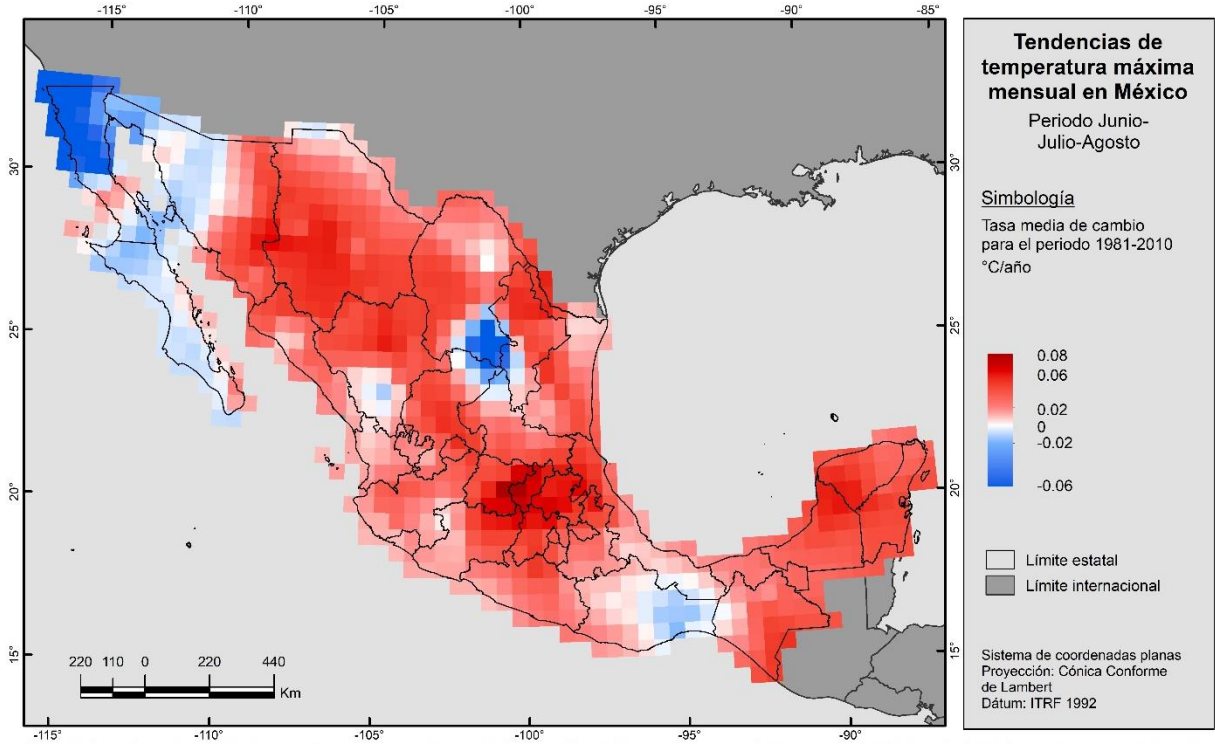


Figura 4.14 Distribución de tendencias de temperatura máxima mensual en México para el periodo otoñal

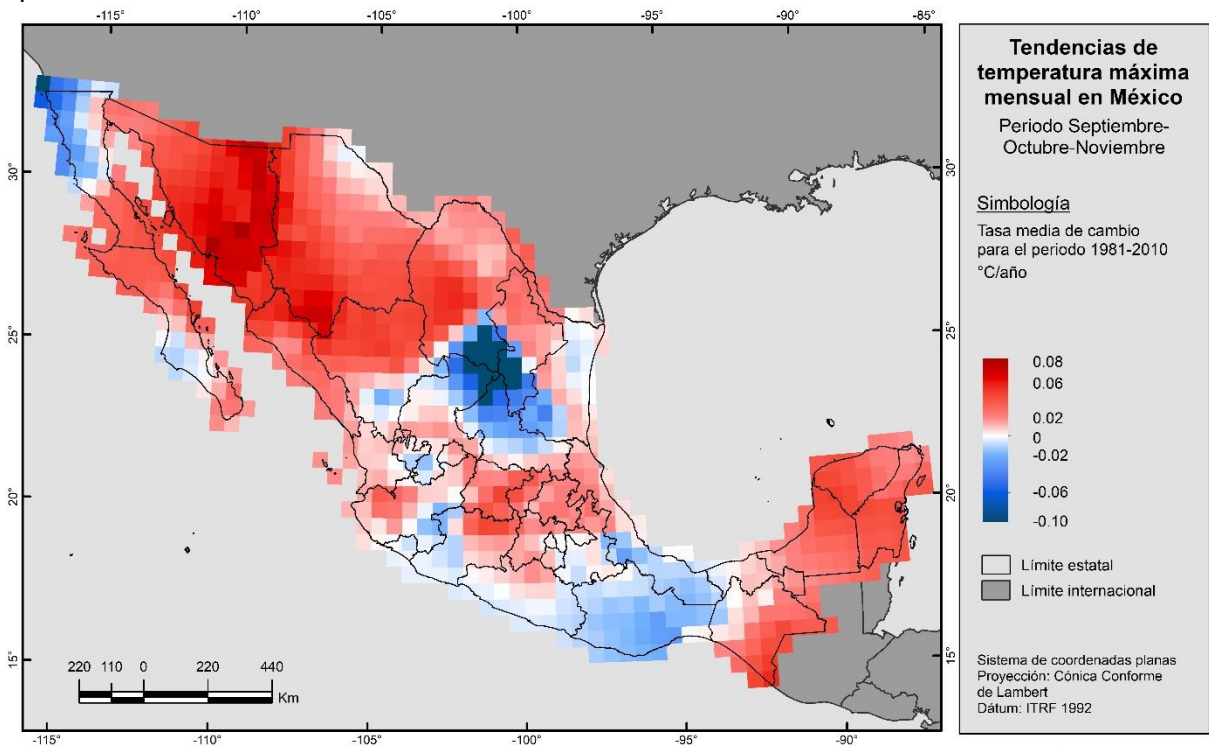


Figura 4.15 Distribución de tendencias de temperatura máxima mensual en México para el periodo veraniego



4.2 Tendencias a escala regional

A continuación, se muestra la distribución espacial que tienen las tendencias a escala regional, únicamente para temperaturas máximas y mínimas tanto anuales como estacionales, obtenidas a partir de los valores registrados en los nodos de reanálisis del Centro de Ciencias de la Atmósfera (Figura 3.3)

4.2.1 Temperatura máxima anual

Los valores de cambio más altos alcanzan hasta 0.07°C/año ($2.1^{\circ}\text{C}/30$ años) en el caso del incremento, los cuales se extienden desde la parte centro de la RBMM hacia afuera de ella, principalmente en dirección este (figura 4.16). Por otro lado, los valores más altos, pero de decremento de la temperatura alcanzan los $-0.07^{\circ}\text{C/año}$ ($-2.1^{\circ}\text{C}/30$ años) y se pueden encontrar fundamentalmente en el sur de la zona de estudio. Existe un gradiente latitudinal que se extiende desde la zona centro de la RBMM, hasta la porción que se está volviendo más fría en el sur de la misma, y cuya distancia en línea recta es de aproximadamente 40 km; partiendo de la zona centro con tendencias positivas, existe también un gradiente hacia la porción norte pero que tiene menor intensidad puesto que la distancia entre isolíneas es comparativamente mayor, y que en la zona fría no alcanza los valores máximos de cambio que se alcanzan en el sur (solo llega hasta $-0.02^{\circ}\text{C/año}$; $-0.6^{\circ}\text{C}/30$ años). De manera general domina una tendencia al calentamiento incluso dentro de la propia RBMM, aún con los lugares donde hay enfriamiento o donde la tendencia es nula. Este último caso se presenta en dos sitios: una muy delgada franja ubicada en el límite sur de la RBMM y un área circular en el norte, ubicada entre los dos polígonos que conforman a la reserva.



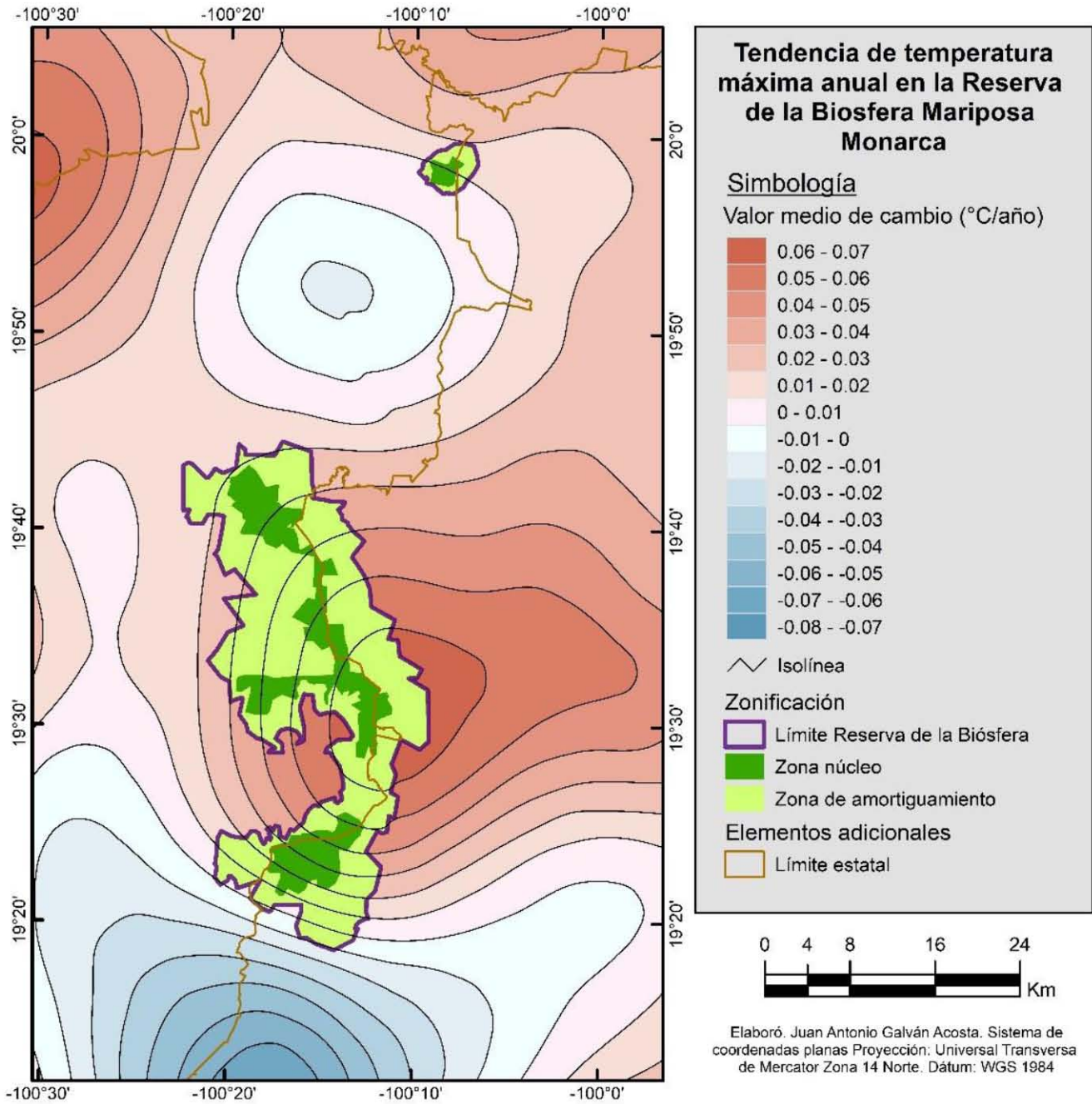


Figura 4.16 Tendencias de temperatura máxima anual a escala regional.



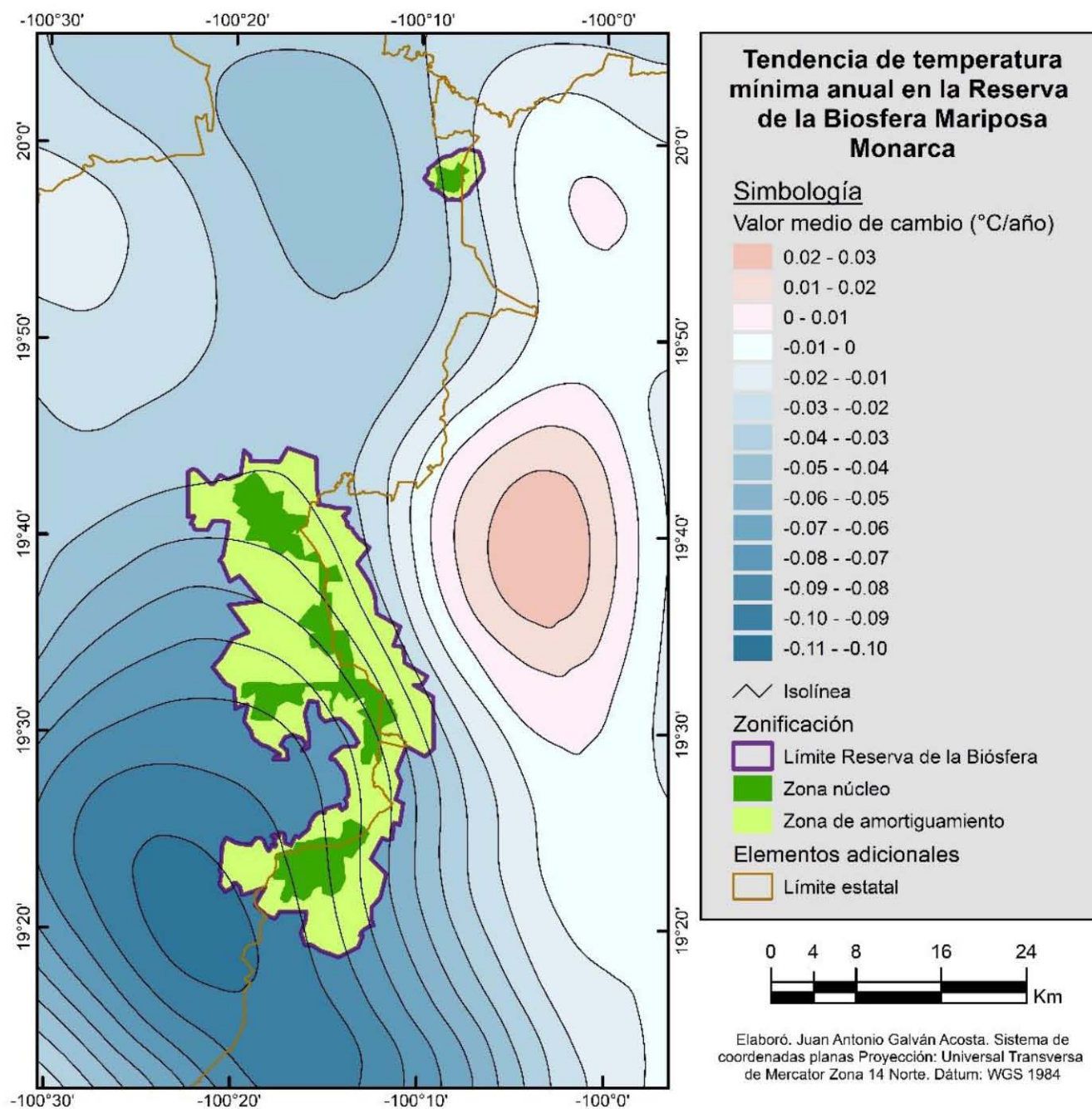


Figura 4.17 Tendencias de temperatura mínima anual a escala regional.



4.2.2 Temperatura mínima anual

A diferencia de lo que se observó en la tendencia de la temperatura máxima anual (figura 4.16), en este caso dominan en la mayor parte de la zona de estudio la tendencia al enfriamiento y en segundo plano la ausencia de tendencia (figura 4.17). El único lugar con tendencia al calentamiento se ubica en la parte centro-este de la zona de estudio, y en donde se estiman tasas de cambio de solo 0.03°C/año ($0.9^{\circ}\text{C}/30$ años) como máximo, una zona que además es coincidente con la zona de calentamiento de la temperatura máxima anual (figura 4.16). Así mismo, en esta variable se distingue claramente un gradiente en dirección NE-SW el cual se desplaza desde la zona de calentamiento localizada al noreste de la RBMM hacia la zona de enfriamiento en el suroeste de la misma, y donde las isólineas cruzan a la RBMM sin distorsionar su trayectoria. En esa zona donde la tendencia se dirige al enfriamiento, se alcanzan valores de cambio de hasta $-0.10^{\circ}\text{C/año}$, lo que sugiere un enfriamiento cercano a los 3°C a lo largo de 30 años.

4.2.3 Tendencias estacionales

Las figuras 4.18 a 4.21 muestran el comportamiento de la tendencia de la temperatura máxima estacional. En los cuatro mapas mostrados, la tendencia predominante es al calentamiento, con valores máximos de hasta 0.1°C/año ($3^{\circ}\text{C}/30$ años en el caso de DEF y MAM, figuras 4.18 y 4.19), y en segundo plano el enfriamiento con valores de tendencia máximos de hasta $-0.09^{\circ}\text{C/año}$ ($-2.7^{\circ}\text{C}/30$ años en el caso de DEF, figura 4.18).

En particular, si se observa el comportamiento para las tendencias de la temperatura máxima en invierno (DEF, figura 4.18), se podrá notar que es la variable en donde la



tendencia al calentamiento ocupa una superficie mucho más amplia que el resto de las estaciones del año, puesto que prácticamente toda la zona centro y norte se ven afectadas por tendencias positivas.

Cabe resaltar que las tendencias de las temperaturas máximas estacionales replican de forma general los patrones de distribución espacial que se observaban en las tendencias de temperatura máxima anual (figura 4.16). Las zonas que apuntan al calentamiento se localizan en una amplia zona dentro de la RBMM que se extiende en dirección este, y los valores más altos se encuentran generalmente en la parte centro de la misma, lo que a su vez genera gradientes hacia el norte y hacia el sur: en ambas direcciones el valor de la tendencia comienza a disminuir, partiendo de valores de cambio de hasta $0.1^{\circ}\text{C}/\text{año}$ ($3^{\circ}\text{C}/30$ años) en el caso de la tendencia en el periodo invernal, no obstante en la porción norte se mantienen tendencias positivas de manera uniforme aunque con tasas de cambio comparativamente menores (hasta de $0.01^{\circ}\text{C}/\text{año}$ por ejemplo en JJA, figura 4.20). Mientras que en la porción sur ocurre una inversión de la tendencia a tal punto que los valores se dirigen hacia temperaturas más frías.

Las figuras 4.22 a 4.25 muestran la distribución espacial de las tendencias para las temperaturas mínimas estacionales. Similar a los casos anteriores, las tendencias de las temperaturas mínimas estacionales replican también el patrón de distribución espacial de la temperatura mínima anual (figura 4.17), de modo que en todas las estaciones del año la tendencia dominante siempre es al enfriamiento localizado principalmente al sur de la zona de estudio, y en donde se alcanzan tendencias de hasta -0.13°C ($-3.9^{\circ}\text{C}/30$ años)



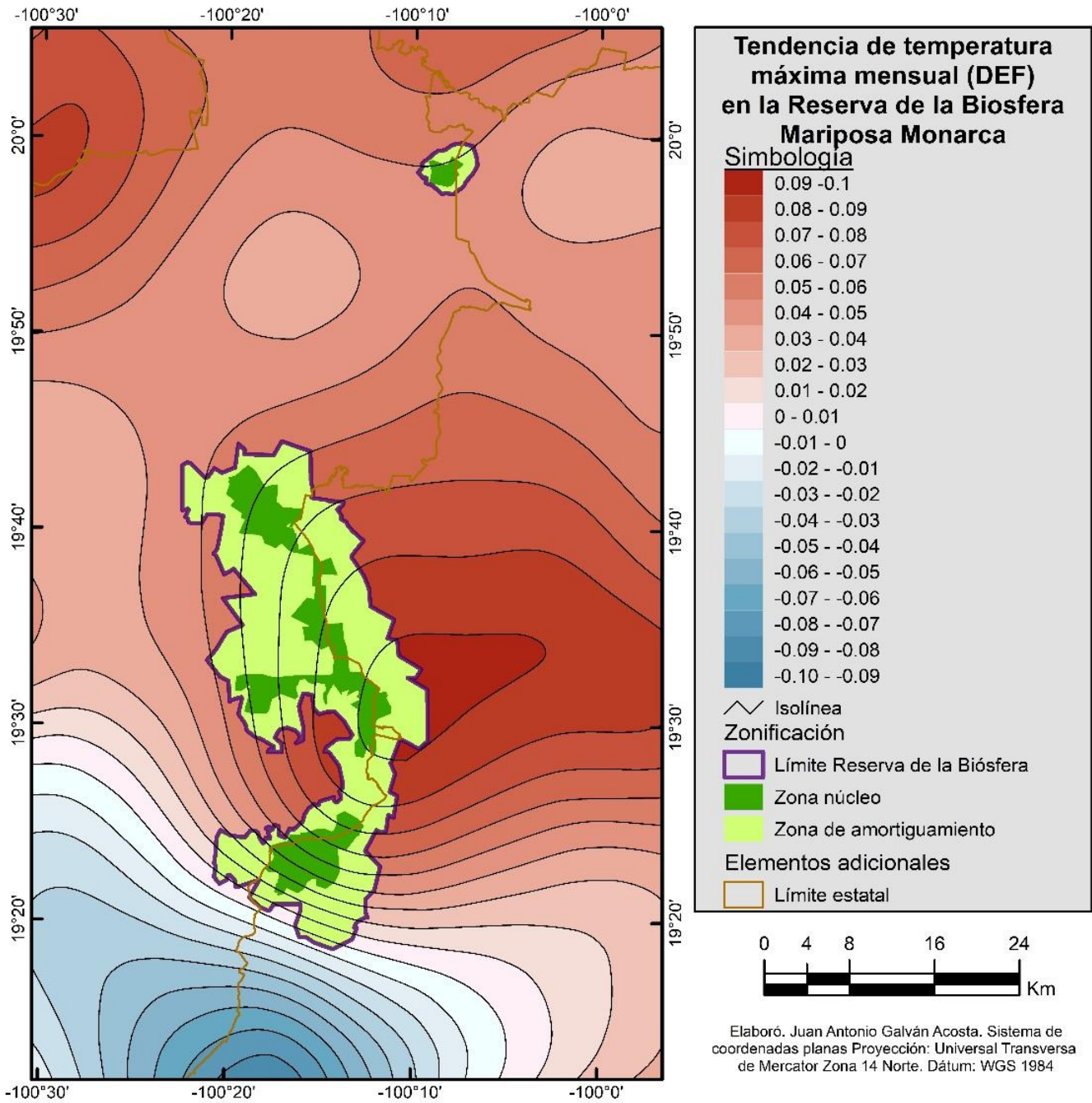


Figura 4.18 Tendencias de temperatura máxima mensual a escala regional para el periodo invernal.



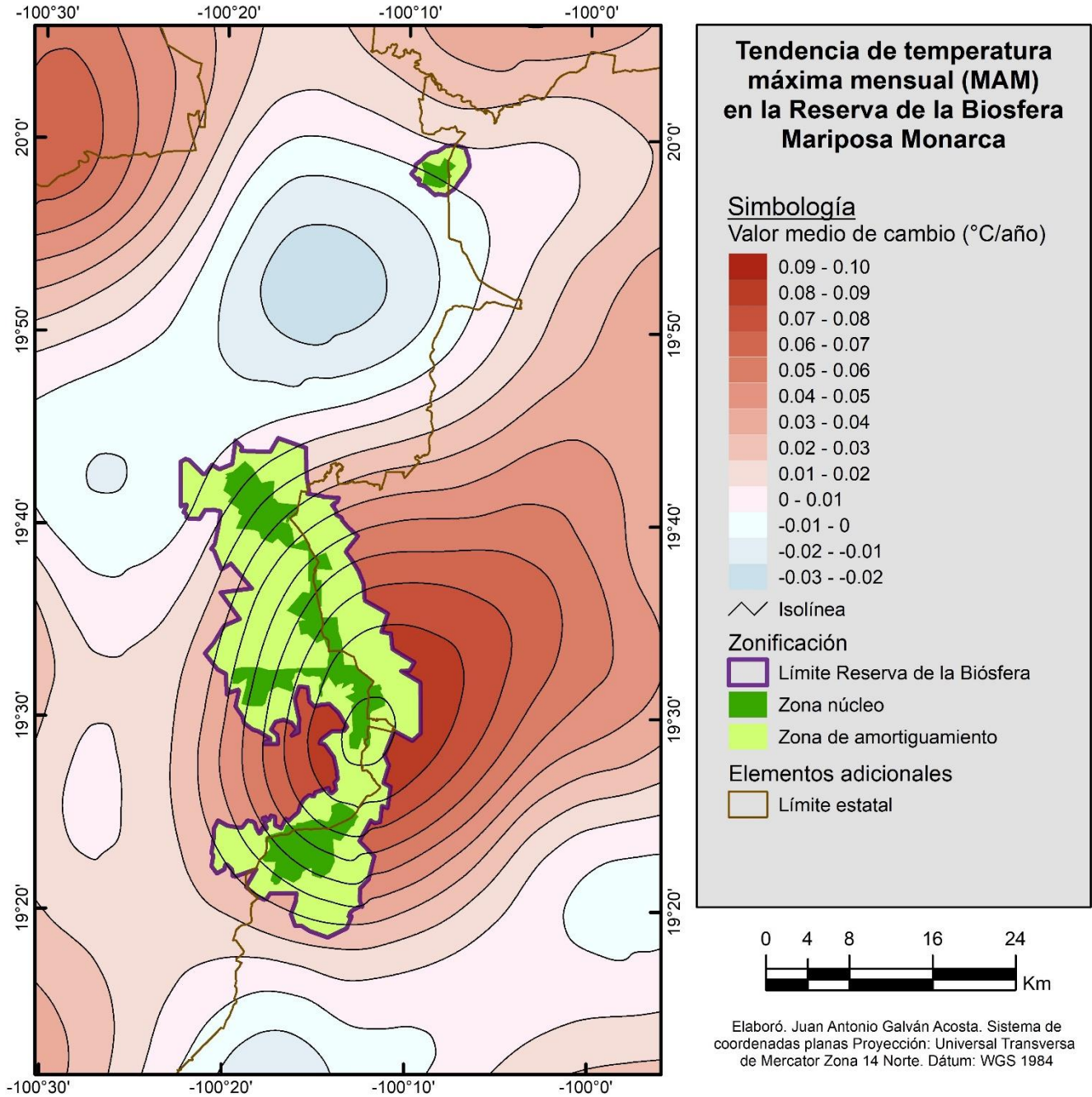


Figura 4.19 Tendencias de temperatura máxima mensual a escala regional para el periodo primaveral.



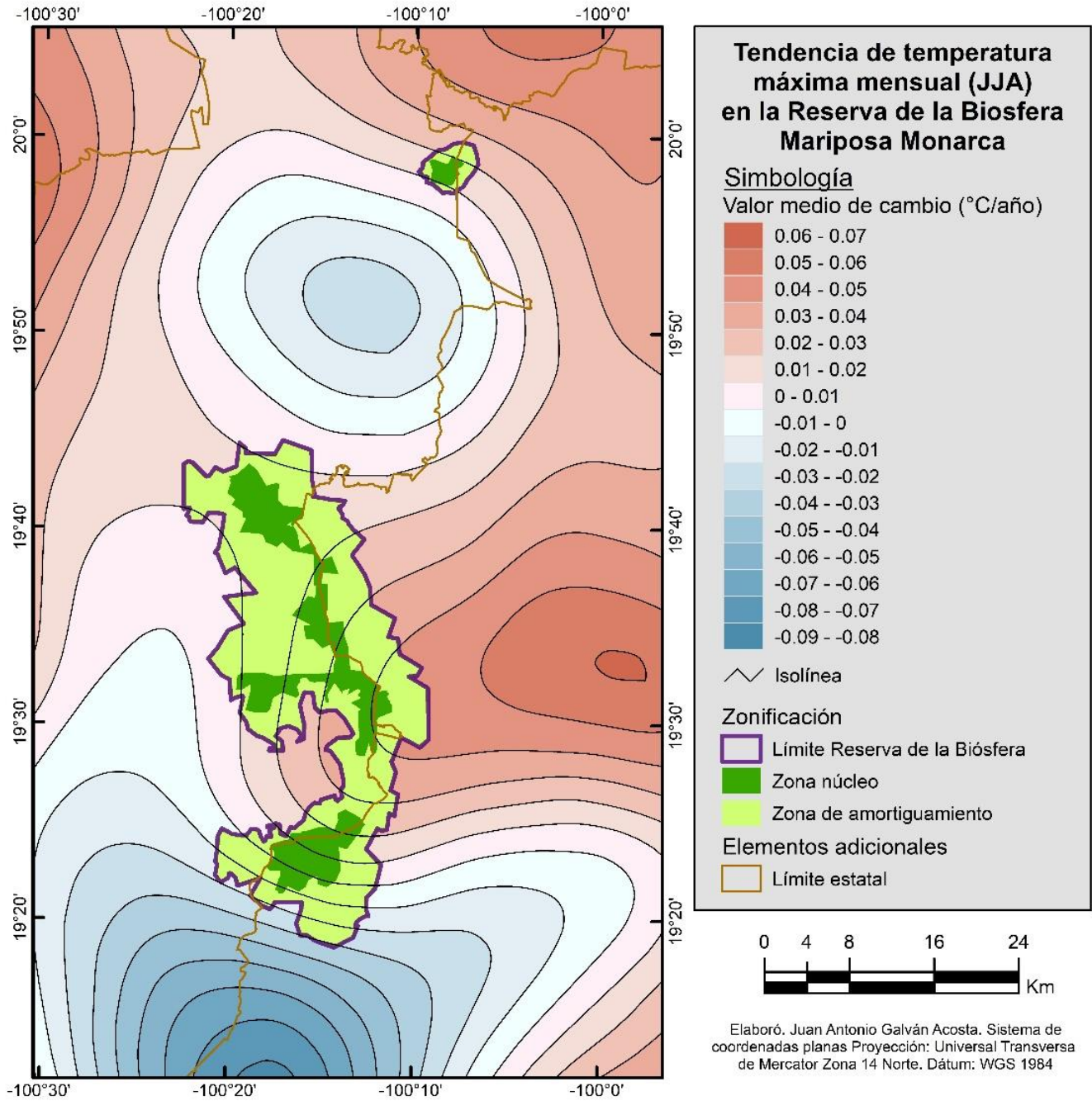


Figura 4.20 Tendencias de temperatura máxima mensual a escala regional para el periodo veraniego



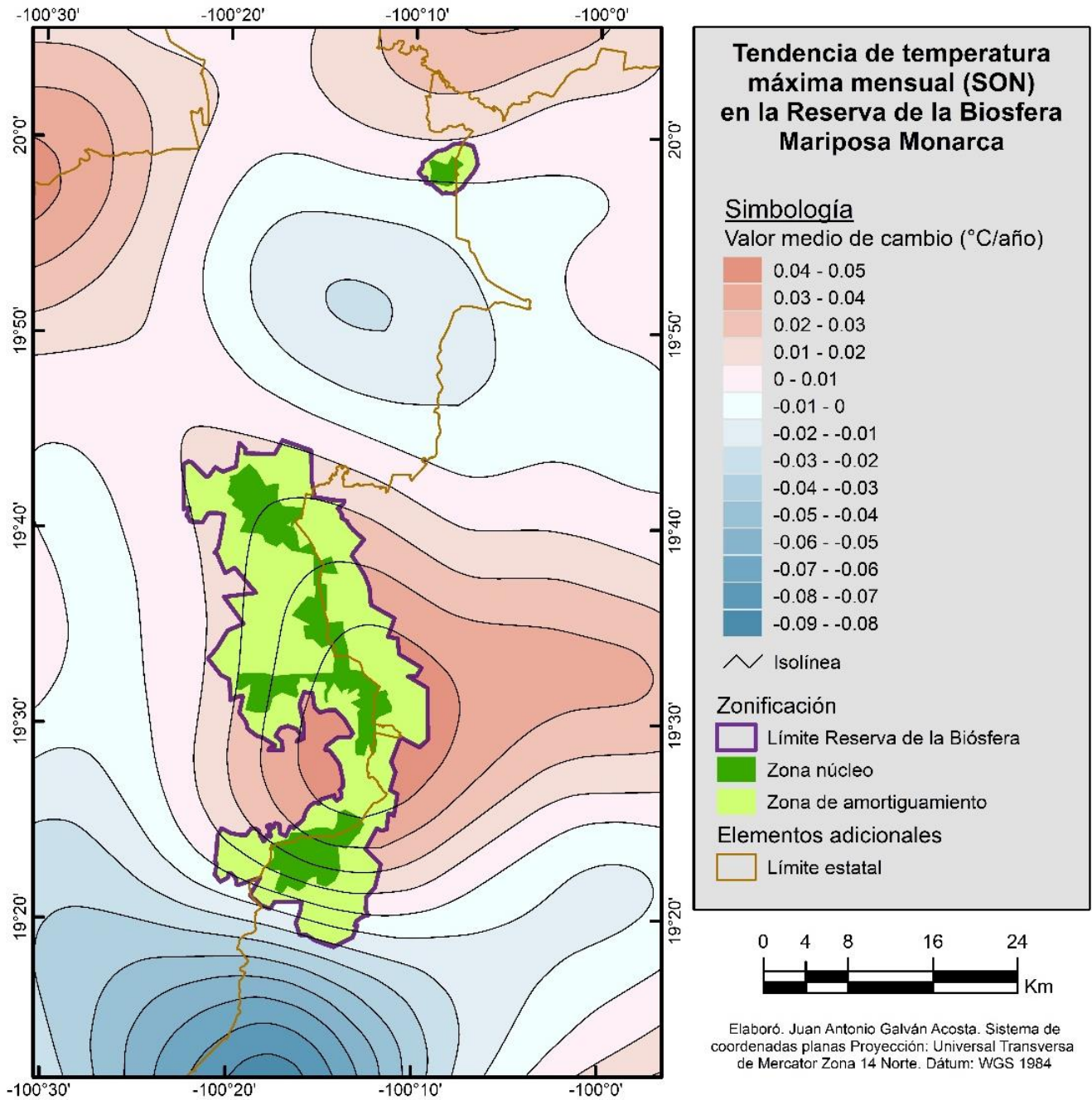


Figura 4.21 Tendencias de temperatura máxima mensual a escala regional para el periodo otoñal



en el caso de la temperatura primaveral (MAM, figura 4.23). El caso de la tendencia de la temperatura de invierno (DEF; figura 4.22) es el único en el que se presenta una zona muy clara con tendencia al calentamiento: localizada al este de la RBMM, llega a alcanzar valores de hasta 0.07°C/año ($2.1^{\circ}\text{C}/30$ años), mientras que es en la tendencia de la temperatura de verano (JJA, figura 4.24) en donde prácticamente la tendencia al frío domina toda la zona de estudio, presentando una franja con ausencia de tendencia (de 0.01 a $-0.01^{\circ}\text{C/año}$). Al igual que lo observado en las temperaturas máximas, en las temperaturas mínimas la zona sur-suroeste de la RBMM figura como un lugar en el que el enfriamiento es persistente, y en este caso refleja los valores de cambio más fríos. Cabe destacar que, a diferencia de lo observado en la temperatura máxima, en este caso se preserva un gradiente con dirección noreste-suroeste, en donde las tendencias positivas se localizan en el noreste y paulatinamente cambian, atravesando la RBMM, en el suroeste y con un desplazamiento de lo caliente hacia lo frío.

Hasta este punto se puede observar que las isolíneas de tendencia atraviesan la zona núcleo y la zona de amortiguamiento de la RBMM. Además, las zonas de tendencia nula se encuentran fuera de los límites de la misma, lo que sugiere que la RBMM no tiene una influencia significativa en las tendencias de la temperatura en esta escala. Los mapas anteriores demuestran que no existe un patrón claro en el comportamiento de las tendencias de temperatura, en el que se observe, por ejemplo que la RBMM condicione el comportamiento de las mismas. O bien, en el que se vea que la RBMM ejerce una influencia y marque una diferencia entre las tendencias dentro y fuera. Como se explicó en la metodología, para abordar ese punto se llevaron a cabo una serie de diagramas de



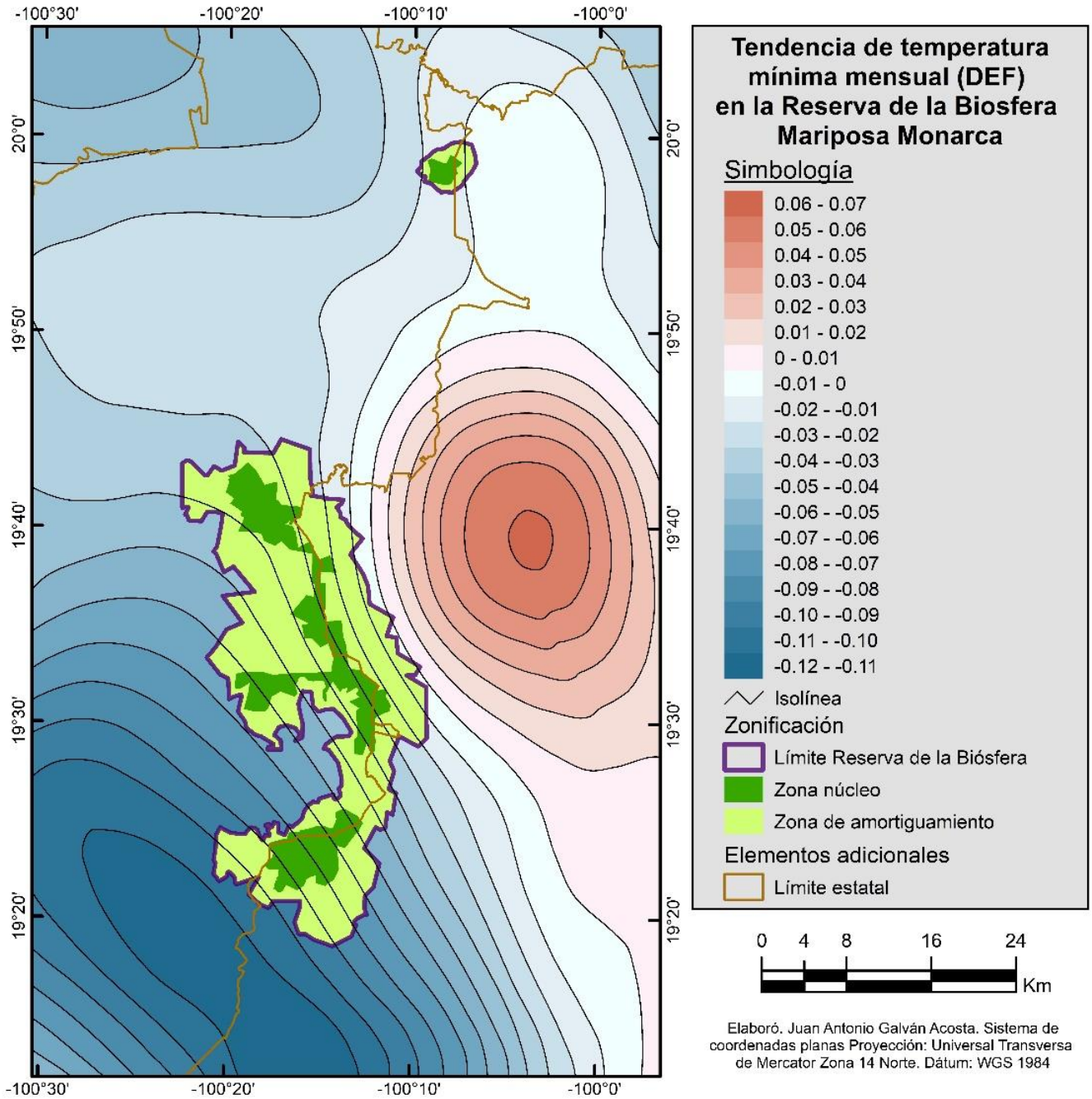


Figura 4.22 Tendencias de temperatura mínima mensual a escala regional para el periodo invernal.



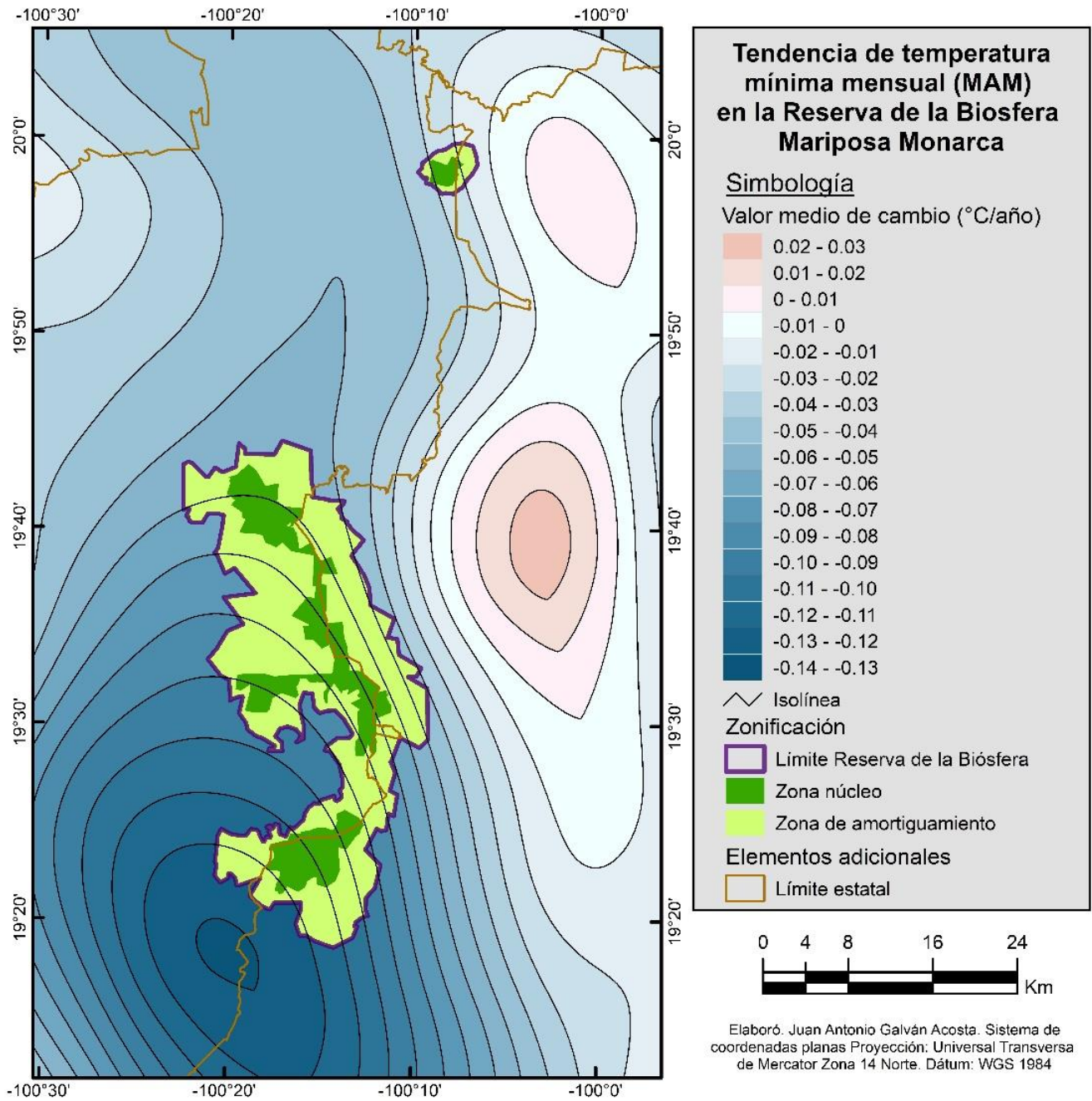


Figura 4.23 Tendencias de temperatura mínima mensual a escala regional para el periodo primaveral.



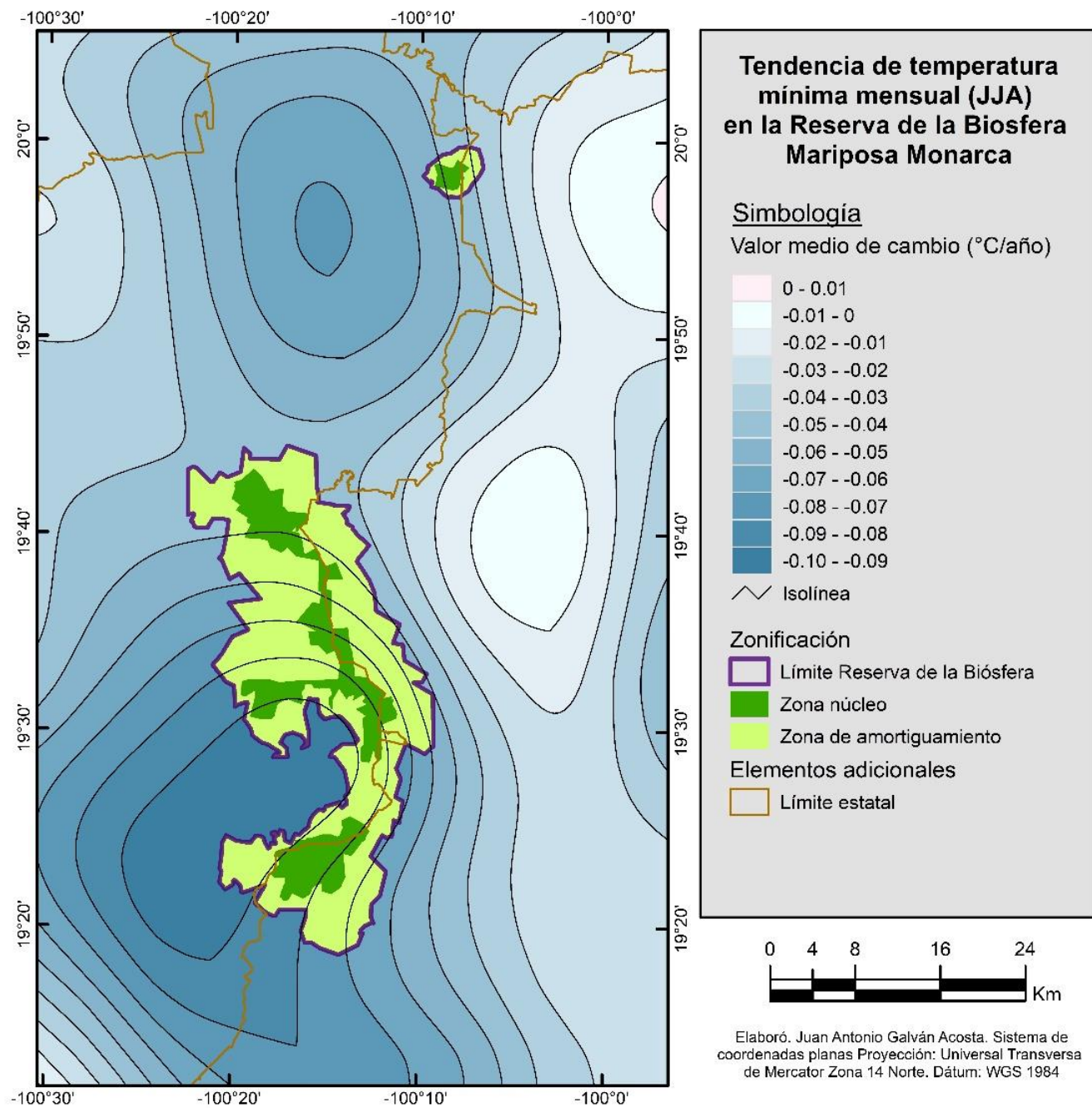


Figura 4.24 Tendencias de temperatura mínima mensual a escala regional para el periodo veraniego.



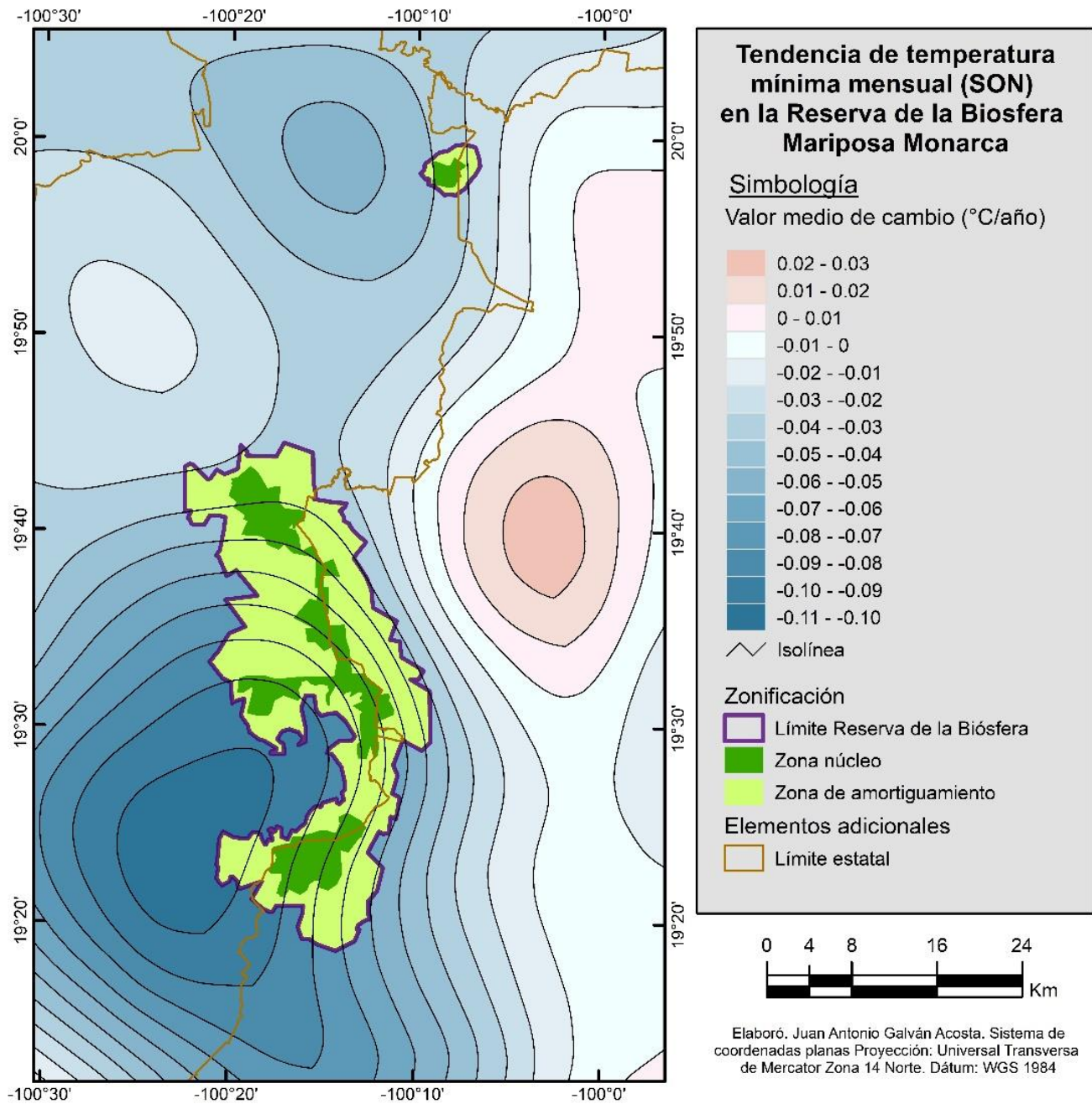


Figura 4.25 Tendencias de temperatura mínima mensual a escala regional para el periodo otoñal.



dispersión (uno para cada variable) en los que se mostrara mediante un análisis de proximidad, la relación existente entre la distancia que hay entre cada nodo y los límites de la RBMM (eje horizontal) con la tendencia que cada uno registra (eje vertical), con el objetivo de tener una prueba gráfica y estadística al respecto.

4.2.4 Análisis de proximidad

En los siguientes gráficos (figuras 4.26 a 4.29) el eje horizontal representa la distancia a la que un nodo se encuentra con respecto a la RBMM, siendo la abscisa la representación del límite de esta. Por ende, los números negativos en el eje horizontal ilustran aquellos nodos que se ubican al interior de la RBMM, mientras que los números positivos indican aquellos nodos que se ubican fuera de esta, por lo que, conforme un punto se desplaza hacia la derecha de la gráfica, la distancia que guarda con respecto a la RBMM es mayor.

Existe una correspondencia entre lo observado en los mapas y lo observado en los gráficos: en el caso de las tendencias de la temperatura mínima (figura 4.27 y 4.29), la mayoría de los nodos dentro y fuera de la RBMM se localiza en cifras negativas, puesto que en la mayor parte de la zona de estudio la tendencia apunta al enfriamiento. Se observa además que, en las tendencias de temperatura mínima, todos los nodos que están dentro de la RBMM mantienen valores de cambio negativos (enfriamiento), mientras que, para las tendencias de las temperaturas máximas (figuras 4.26 y 4.28), los nodos presentan en su mayoría tendencias hacia el calentamiento. Es de destacar que todos los nodos que se ubican dentro de la RBMM mantienen una tendencia en la temperatura (es decir, su tendencia es diferente de cero), y no existe diferencia significativa con respecto a su zona de influencia.



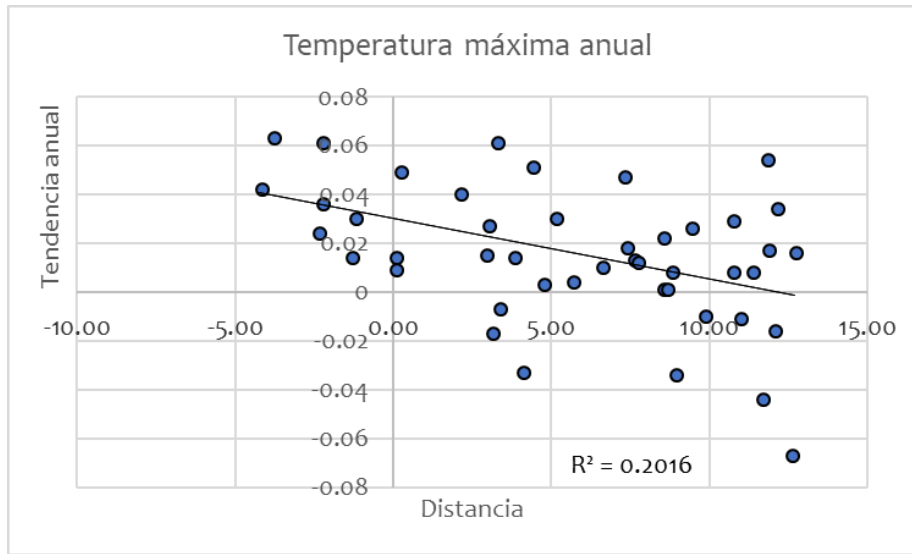


Figura 4.26 Comparativo de tendencias dentro y fuera de la RBMM para temperatura máxima anual. Se observa que, con una baja correlación estadística, las tendencias dentro de la Reserva tienden al calentamiento, contrastando la hipótesis de este trabajo. Y hacia afuera, las tendencias tienden a tener valores menores o no tendencia. Fuente: elaborado con base en el mapa de la figura 3.16

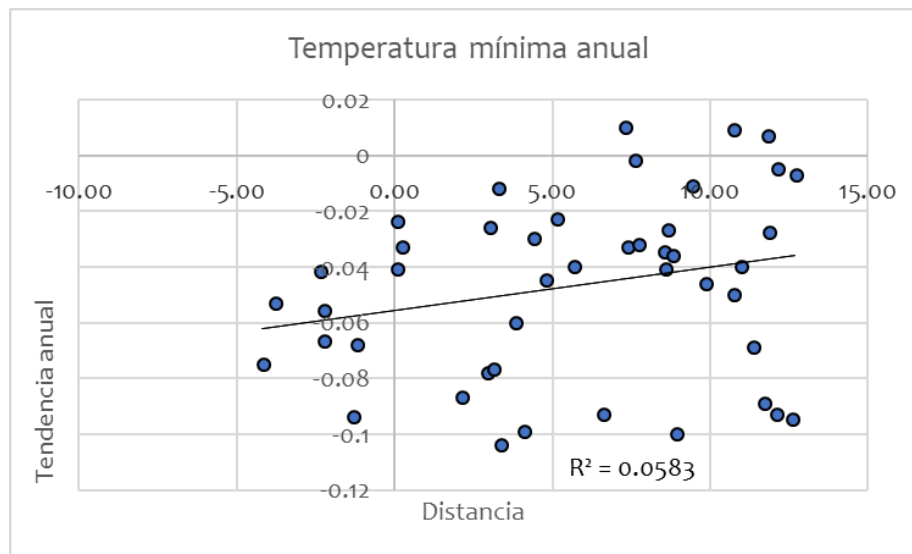


Figura 4.27 Comparativo de tendencias dentro y fuera de la RBMM para temperatura mínima anual. Se observa que, con una baja correlación estadística, las tendencias dentro de la Reserva son más frías, mientras que hacia afuera existen tendencias tanto frías como nodos sin tendencia. Fuente: elaborado con base en el mapa de la figura 3.17



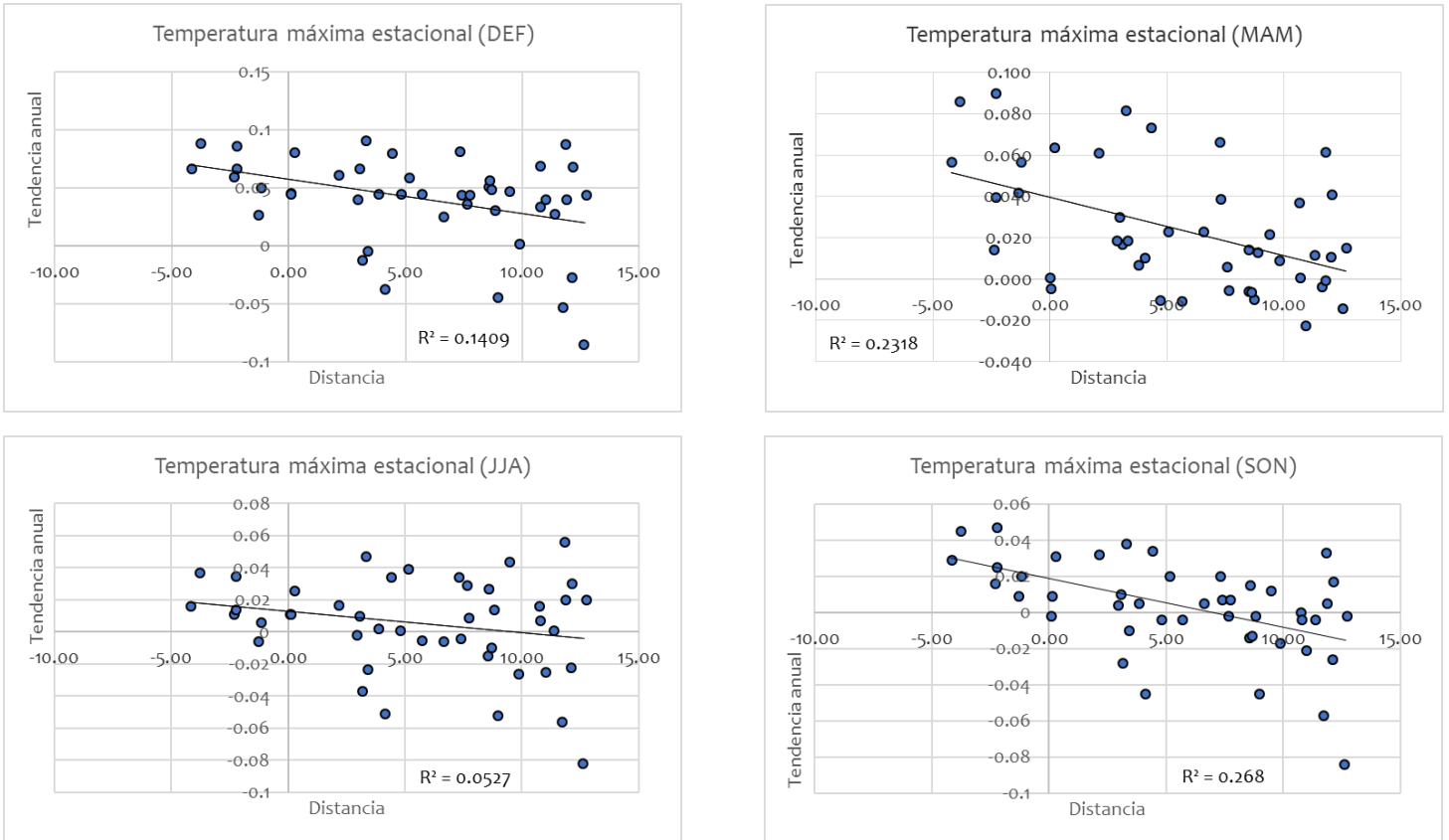


Figura 4.28 Comparativo de tendencias dentro y fuera de la RBMM para temperaturas máximas estacionales ($R^2 < 0.3$). Se observa que en ningún caso existe una asociación estadística significativa en la que se vea que las tendencias al interior de la Reserva son menores que al exterior. Fuente: elaborado con base en los mapas de las figuras 3.18 a 3.21

Si se observan los gráficos de tendencias tanto de temperatura máxima como de temperatura mínima, se podrá notar que los nodos que se encuentran dentro de la RBMM permanecen agrupados o menos dispersos, en comparación con los nodos de la zona exterior, los cuales comienzan a separarse y a desplazarse en todas direcciones sin tener una tendencia representativa.

En cada una de las gráficas mostradas se coloca la línea de tendencia general de los datos, y también un coeficiente de correlación R^2 que demuestra la asociación que hay entre el valor de la tendencia de cada nodo y la distancia que existe entre cada uno de ellos y la RBMM. Atendiendo al coeficiente de correlación, se observa que, en el caso de



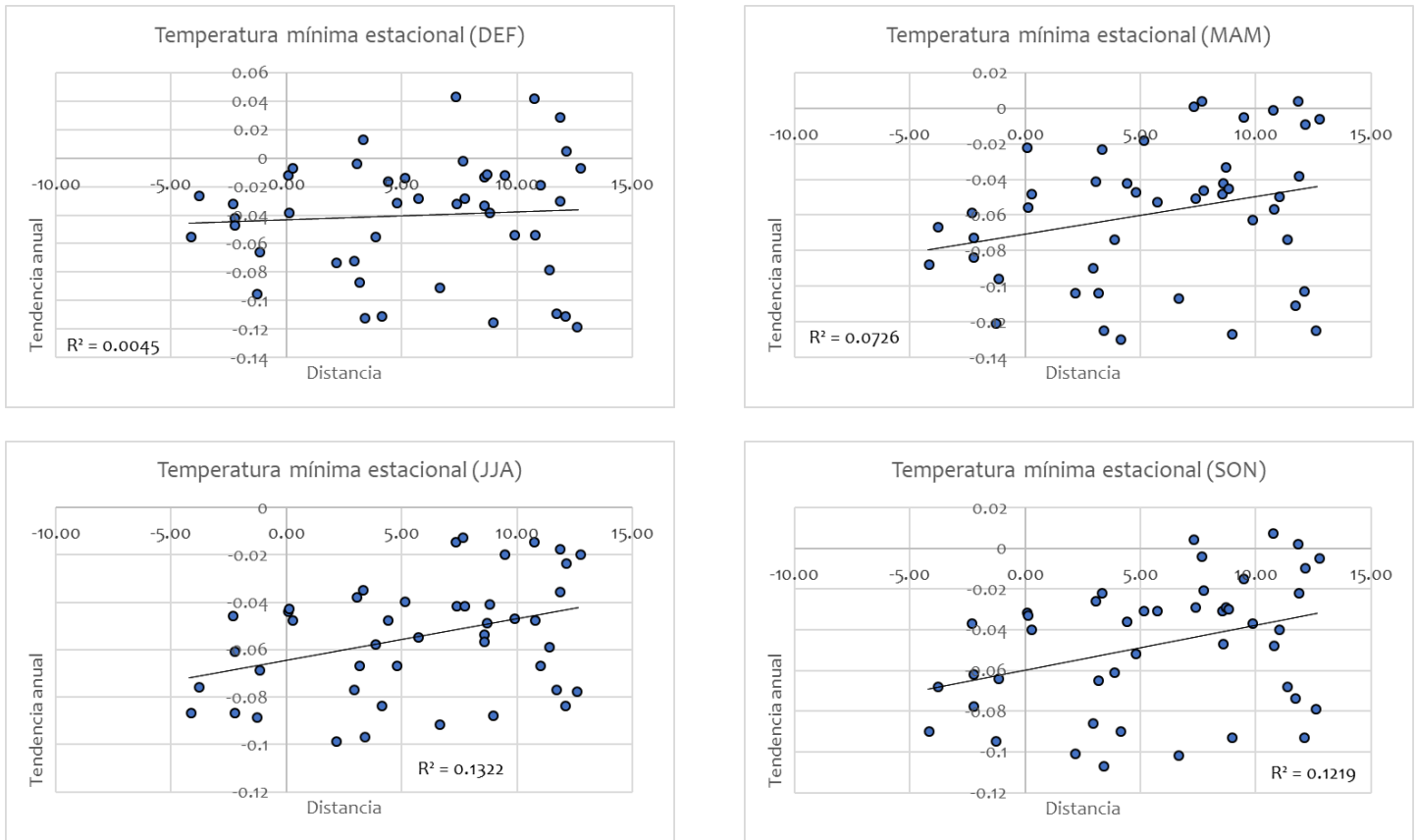


Figura 4.29 Comparativo de tendencias dentro y fuera de la RBMM para temperaturas mínimas estacionales ($R^2 < 0.2$). Se puede observar que, en la mayoría de los casos, las tendencias al interior de la Reserva son más frías, pero con una correlación estadística muy baja si se comparan con las tendencias fuera de la misma. Fuente: elaborado con base en los mapas de las figuras 4.22 a 4.25

las tendencias de temperatura mínima (figura 4.27 y 4.29), todas las gráficas presentan una correlación positiva, lo que indica que conforme un nodo se aleja de la RBMM y se posiciona fuera de ella, estos presentan una variación o dispersión en sus valores mucho menor con respecto a los un nodo dentro de la misma, su tendencia tiende desde los valores negativos hacia los valores de no tendencia, mientras que en las tendencias de temperatura máxima (figuras 4.26 y 4.28) predomina una tendencia negativa, lo que indica que conforme un nodo se aleja de la RBMM, su tendencia disminuye. No obstante, no se puede aseverar de manera total que así ocurra, puesto que, si se presta atención al coeficiente de correlación R^2 , puede apreciarse que ninguna gráfica supera el valor de



0.3, mientras que, en el caso de las tendencias mínimas, presentan una correlación todavía menor que las tendencias máximas.

4.3 Tendencias a escala local

Con la finalidad de identificar las tendencias históricas de la temperatura en aquellas estaciones climatológicas con mayor cantidad de datos, se aplicaron pruebas de hipótesis no paramétricas de Mann-Kendall a dos de ellas, como un reflejo del comportamiento del clima en la escala local (estaciones Palizada 15066 y Cuesta de Carmen 15197) y cuya ubicación se muestra en el mapa de la figura 3.4. Los resultados de estas pruebas se ilustran en las siguientes tablas (tablas 4.1 a 4.4)

Para llevar a cabo la interpretación de los resultados de las pruebas estadísticas, fue necesario el uso del siguiente juego de hipótesis.

H_0 : No existe tendencia

H_a : Si existe tendencia

Con un nivel de confianza del 90% ($\alpha=0.10$) se rechazó H_0 en favor de H_a en 8 de las 10 variables bajo estudio en la estación Palizada 15066 (tablas 4.1 y 4.2). Puede observarse que, en los valores tanto de temperatura máxima como de temperatura mínima, existen tendencias estadísticamente significativas ($p<0.10$), las cuales en la mayoría de los casos apuntan al calentamiento. Solo en los casos de las temperaturas máxima estacional de MAM y mínima estacional de JJA, la evidencia no permitió rechazar H_0 en favor de H_a , puesto que la prueba arrojó que no existe una tendencia con una significancia estadística suficiente ($p=0.802$ para el caso de la temperatura máxima estacional de MAM y $p=0.895$



para la temperatura mínima estacional de JJA; tablas 4.1 y 4.2). De hecho, en esos dos últimos casos, la pendiente de Sen dicta que el cambio promedio anual, en caso de asumir alguno, es prácticamente inexistente e imperceptible: 0.24°C/30 años para la máxima de MAM y de -0.12°C/30 años para la mínima de JJA (tablas 4.1 y 4.2).

Tabla 4.1 Resultados de la prueba de Mann-Kendall para la estación 15066, temperaturas anuales y estacionales máximas

Variable	Anual	DEF	MAM	JJA	SO
T	0.673	0.561	0.521	-0.022	0.460
p-valor	<0.0001	<0.0001	0.0001	0.895	0.001
Pendiente de Sen °C/30 años	3.6	8.61	4.98	-0.12	3.99
Comportamiento	Incremento	Incremento	Incremento	No existe tendencia	Incremento

Fuente: elaborada con base en los resultados de la prueba Mann Kendall para temperaturas máximas en la estación 15066

Tabla 4.2 Resultados de la prueba de Mann-Kendall para la estación 15066, temperaturas anuales y estacionales mínimas

Variable	Anual	DEF	MAM	JJA	SON
T	0.575	0.613	0.037	0.428	0.378
p-valor	0.0001	<0.0001	0.802	0.002	0.007
Pendiente de Sen °C/30 años	2.13	3.33	0.24	2.49	1.95
Comportamiento	Incremento	Incremento	No existe tendencia	Incremento	Incremento

Fuente: elaborada con base en los resultados de la prueba Mann Kendall para temperaturas mínimas en la estación 15066

Con un nivel de confianza del 90% ($\alpha=0.10$) se rechazó H_0 en favor de H_a en las 10 variables bajo estudio en la estación Cuesta del Carmen 15197 (tablas 4.3 y 4.4). Tanto las temperaturas máximas como las temperaturas mínimas presentan una tendencia estadísticamente significativa ($p<0.10$): en el caso de las máximas tanto la anual como las estacionales apuntan siempre al calentamiento, mientras que las mínimas tanto la anual como las estacionales, apuntan siempre al enfriamiento.



Como se observó en el mapa de figura 3.4, la estación Cuesta del Carmen 15197 se encuentra dentro de la zona de amortiguamiento de la RBMM, muy cerca de la zona núcleo, mientras que la estación Palizada 15066 se encuentra fuera de la RBMM, ambas en el Estado de México. Es importante mencionar lo anterior, puesto que cuando se comparan los valores medios de cambio que arrojan las estaciones (escala local) con aquellos que se mostraron en los mapas de tendencias a escala regional, se pueden encontrar más correlaciones que divergencias.

Cabe resaltar que la estación 15066 tiene una tendencia mucho más marcada que se refleja en los valores p calculados, los cuales son considerablemente menores que los

Tabla 4.3 Resultados de la prueba de Mann-Kendall para la estación 15197, temperaturas anuales y estacionales máximas

Variable	Anual	DEF	MAM	JJA	SON
T	0.517	0.471	0.446	0.469	0.536
p-valor	0.001	0.001	0.004	0.003	0.0002
Pendiente de Sen °C/30 años	14.34	13.83	14.58	17.31	15.21
Comportamiento	Incremento	Incremento	Incremento	Incremento	Incremento

Fuente: elaborada con base en los resultados de la prueba Mann Kendall para temperaturas máximas en la estación 15197

Tabla 4.4 Resultados de la prueba de Mann-Kendall para la estación 15197, temperaturas anuales y estacionales mínimas

Variable	Anual	DEF	MAM	JJA	SON
T	-0.602	-0.442	-0.564	-0.301	-0.493
p-valor	0.0001	0.003	0.0002	0.061	0.001
Pendiente de Sen °C/30 años	-3.3	-3.12	-3.33	-5.43	-4.08
Comportamiento	Decremento	Decremento	Decremento	Decremento	Decremento

Fuente: elaborada con base en los resultados de la prueba Mann Kendall para temperaturas mínimas en la estación 15197



valores p de la estación 15197. De ese modo, se afirma que existe menos incertidumbre en la primera estación con respecto a los cambios en los valores de temperatura que ha experimentado.

Con el propósito de conocer cuál es la asociación que existe entre la escala local y la escala regional, se llevó a cabo un comparativo entre los valores de tendencias de ambas escalas, mismo que se muestra en las tablas 4.5 y 4.6. En el caso de la estación Cuesta del Carmen 15197, las tendencias tanto de temperatura máxima anual como de temperatura mínima anual en la escala local, coinciden someramente con las tendencias mostradas para la escala regional (tabla 4.5). Una primera similitud es que, en ambas escalas, la temperatura máxima se vuelve más cálida y la temperatura mínima se torna más fría. Sin embargo, hay una diferencia entre los valores de tendencia entre ambas escalas (tabla 4.5), puesto que mientras en la escala local la temperatura máxima presenta una tasa de cambio de $0.478^{\circ}/\text{año}$ ($14.34^{\circ}\text{C}/30$ años), en la escala regional es de 0.065°C ($1.95^{\circ}\text{C}/30$ años). De la misma forma, para la temperatura mínima anual la estación apunta a decrementos de $-0.11^{\circ}\text{C}/\text{año}$ ($-3.3^{\circ}\text{C}/30$ años) y a escala regional registra decrementos de $-0.065^{\circ}\text{C}/\text{año}$ ($-1.95^{\circ}\text{C}/30$ años).

Al observar el comparativo de tendencias en la estación 15066 (tabla 4.6) la temperatura máxima anual, tiene la mejor coincidencia entre la tendencia de la escala local y la escala regional: mientras que en la escala local, hay un cambio de $0.071^{\circ}\text{C}/\text{año}$ ($2.13^{\circ}\text{C}/30$ años), en la escala regional se estima un cambio de hasta $0.055^{\circ}\text{C}/\text{año}$ ($1.65^{\circ}\text{C}/30$ años), una diferencia mínima entre ambas tendencias. En cuanto a la temperatura mínima anual ya no se tiene una coincidencia aceptable (tabla 4.6), puesto que en la escala local se



muestra una tendencia de 0.120°C/año (3.6°C/30 años) y en la escala regional se obtiene un valor de 0°C/año (no hay tendencia) lo que implica una diferencia considerable.

La mayor diferencia entre ambas escalas se observa al comparar la concordancia que existe entre los valores de la estación 15066 y los valores de la escala regional para las temperaturas estacionales (tabla 4.6): mientras que en la escala regional la temperatura máxima se vuelve más cálida y la temperatura se vuelve más fría, en la escala local ambas se vuelven más cálidas.

Tabla 4.5 Comparativo del valor de las tendencias estimadas para la estación climatológica 15197 (las columnas máxima y mínima de la columna Local) y el valor de las tendencias que se estimaron a escala regional para el sitio en el que se ubica dicha estación (columnas máxima y mínima de la columna Regional)

	Local		Regional	
	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima
Anual	0.478	-0.11	0.065	-0.065
DEF	0.461	-0.104	0.085	-0.035
MAM	0.486	-0.11	-0.075	-0.065
JJA	0.577	-0.181	0.045	-0.075
SON	0.507	-0.136	0.045	-0.065

Fuente: elaborada con base en el comparativo de tendencias de escala regional y escala local (estación 15197)

Tabla 4.6 Comparativo del valor de las tendencias estimadas para la estación climatológica 15066 (las columnas máxima y mínima de la columna Local) y el valor de las tendencias que se estimaron a escala regional para el sitio en el que se ubica dicha estación (columnas máxima y mínima de la columna Regional)

	Local		Regional	
	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima
Anual	0.071	0.12	0.055	0
DEF	0.111	0.287	0.085	0
MAM	0.008	0.166	-0.015	-0.015
JJA	0.083	-0.004	0.045	-0.025
SON	0.065	0.133	0.035	-0.015

Fuente: elaborada con base en el comparativo de tendencias de escala regional y escala local (estación 15066)



De igual forma para la estación 15066 (tabla 4.6), en las temperaturas máximas estacionales se observa una buena concordancia entre los valores de la escala local y los de escala regional. En el caso de los meses DEF, JJA y SON en ambas escalas las temperaturas se dirigen a un calentamiento. La mayor similitud se encuentra en el invierno (DEF) puesto que a escala local se estima un valor de cambio anual de 0.111°C ($3.33^{\circ}\text{C}/30$ años), mientras que, a escala regional, un valor de 0.085°C ($2.55^{\circ}\text{C}/30$ años). Incluso en los meses MAM, en ambas escalas no existe una tendencia estadísticamente significativa ($p>0.10$).

Las siguientes gráficas (figuras 4.30 a 4.33) muestran el comportamiento y la relación que existe entre los valores de tendencias registrados por la escala local y los valores que se obtuvieron para la escala regional en el sitio donde se localiza cada una de las estaciones.

Si se observan las cuatro gráficas, se puede apreciar que las tendencias de la escala regional siempre están por debajo de las tendencias de la escala local, lo que implica que la información climática de escala regional está subestimada. Tomando en cuenta las gráficas de la estación 15197 (figuras 4.30 y 4.31), se puede notar que existe una correspondencia de baja a regular entre las líneas de escala local y de escala regional. En cuanto a las temperaturas máximas estacionales (figura 4.30) la mayor similitud se encuentra en los periodos de JJA y SON aunque con la sub estimación de la tendencia ya mencionada. En cuanto a las temperaturas máximas estacionales (figura 4.31) se puede observar que la asociación entre ambas escalas también es regular, sobre todo



en los meses de MAM, JJA y SON. Si se observan los gráficos comparativos para la estación 15066 (figuras 4.32 y 4.33) se podrá notar que la asociación entre las tendencias de la escala regional y la escala local es baja en las temperaturas mínimas (figura 4.33) pero aceptable en las temperaturas máximas (figura 4.32).

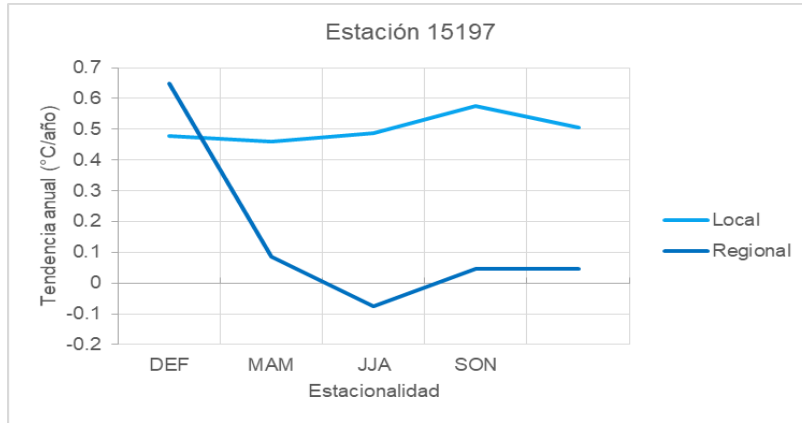


Figura 4.30 Gráfica comparativa elaborada con base en la tabla 4.5, la cual muestra la relación existente entre las tendencias de temperaturas máximas estacionales, tanto a escala local medida con los datos de la estación climatológica 15197 y las tendencias estimadas a escala regional en el sitio de la estación. Se trata de una gráfica cuya asociación es media: coinciden parcialmente las tendencias de ambas escalas. Fuente: elaborado con base en la tabla 4.5.

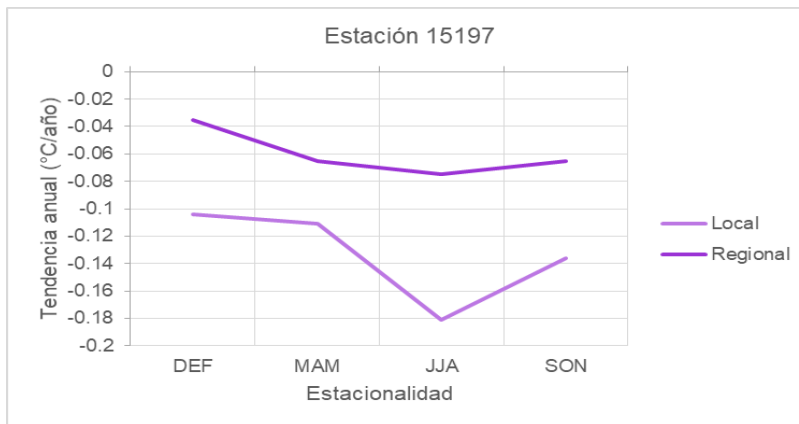


Figura 4.31 Gráfica comparativa elaborada con base en la tabla 4.5, la cual muestra la relación existente entre las tendencias de temperaturas mínimas estacionales, tanto a escala local medida con los datos de la estación climatológica 15197 y las tendencias estimadas a escala regional en el sitio de la estación. Se trata de un gráfico que muestra una asociación regular entre ambas variables, ya que, si bien se comportan de forma similar según la estación del año, la intensidad con que lo hacen no es igual, ni tampoco los valores que cada escala tiene. Fuente: elaborado con base en la tabla 4.5.



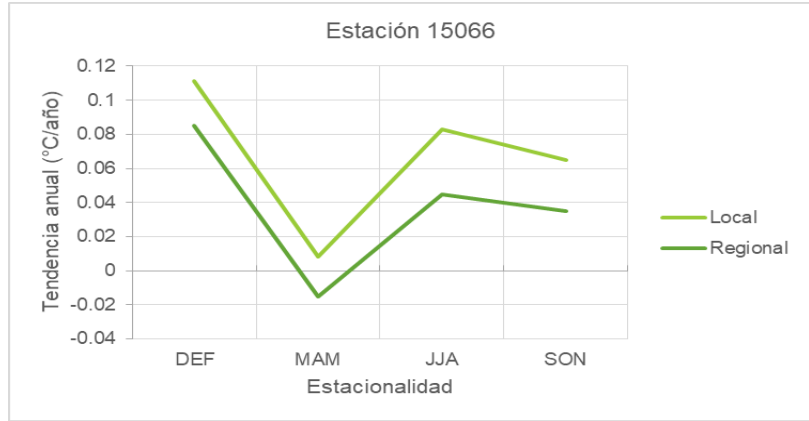


Figura 4.32 Gráfica comparativa elaborada con base en la tabla 4.6, la cual muestra la relación existente entre las tendencias de temperaturas máximas estacionales, tanto a escala local medida con los datos de la estación climatológica 15066 y la tendencia que se estima a escala regional en el sitio de la estación. Se trata de las tendencias que mejor asociación tienen, puesto que, con un ligero sesgo, todas las estaciones tienen un comportamiento similar. Fuente: elaborado con base en la tabla 4.6.

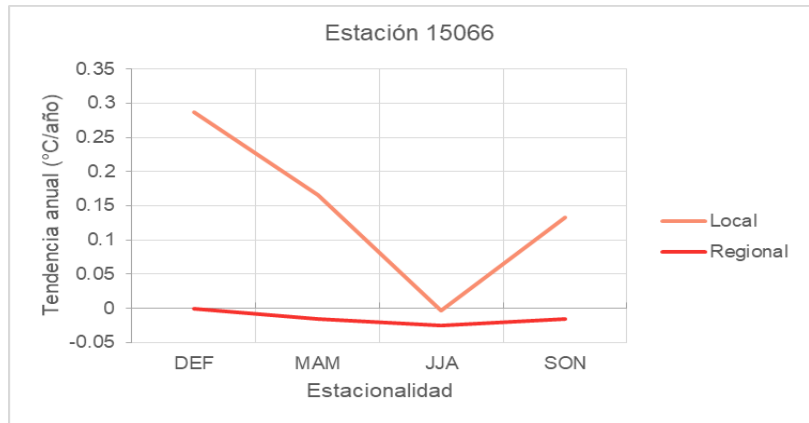


Figura 4.33 Gráfica comparativa elaborada con base en la tabla 4.6, la cual muestra la relación existente entre las tendencias de temperaturas mínimas estacionales, tanto a escala local medida con datos de la estación climatológica 15066 y la tendencia que se estima a escala regional en el sitio de la estación. Se trata de un gráfico que muestra una asociación prácticamente nula, puesto que la única similitud en ambas tendencias es el valor más bajo durante JJA, sin embargo, los cambios que ocurren entre estaciones y entre las dos escalas no son de la misma magnitud. Fuente: elaborado con base en la tabla 4.6.

No obstante, aún con las buenas o medianas correlaciones entre las dos escalas, existe una evidente diferencia en el valor de la tendencia de cada una. Esto es, si se observa la tendencia de cualquier periodo del año, las magnitudes de ambas escalas distan mucho



entre sí: en el caso de las máximas hay incrementos en la escala local de hasta 0.5°C al año ($15^{\circ}\text{C}/30$ años, por ejemplo, en JJA), cuando a escala regional ninguna zona sobrepasa los $0.1^{\circ}\text{C}/\text{año}$ ($3^{\circ}\text{C}/30$ años). Un valor de cambio como lo es $0.5^{\circ}\text{C}/\text{año}$ para la estación 15197 en temperatura máxima representa un aumento muy por encima del incremento medio global proyectado al 2100, el cual es estimado entre 1.4 y 5.8°C (Sánchez *et al.*, 2011). En cuanto a temperaturas mínimas, los valores de cambio en la escala local son menores, pero notablemente distintos a lo proyectado en la escala regional, puesto que en la estación se obtienen cambios de -0.1°C anual ($-3^{\circ}\text{C}/30$ años) para las temperaturas mínimas, mientras que en los nodos esas temperaturas solo se alcanzan en la porción suroeste, fuera de la RBMM, donde ocurren enfriamientos de esa magnitud, en la zona donde se encuentra la estación, en ningún grupo de mes se enfrían más allá de $-0.08^{\circ}\text{C}/\text{año}$ ($-2.4^{\circ}\text{C}/30$ años)

De manera general, un diagnóstico de la situación de las temperaturas en el sitio arroja que, con el paso del tiempo, dentro de la RBMM la oscilación térmica se está amplificando, puesto que las temperaturas máximas se están volviendo más cálidas, mientras que las temperaturas mínimas se están volviendo más frías (tablas 4.3, 4.4 y 4.5). Por ende, los valores de las temperaturas diarias se estarán moviendo en un futuro en un rango de valores cada vez mayor.

El siguiente mapa (figura 4.34) ilustra cuál es el uso de suelo actual sobre el que se encuentran las dos estaciones anteriores. Analizar el uso de suelo permite tener una idea de la forma en la que éste ha evolucionado en toda una región, y al relacionarlo con los datos de las estaciones climatológicas se puede explicar cuál es su papel en la confección de las medias o de las tendencias en las variables climatológicas a escala local.



En concordancia con lo anterior, y para fines de este proyecto, conocer la cobertura en la que se encuentran las estaciones tratadas en este apartado es de utilidad para explicar, primero, por qué existe una diferencia o desfase entre los valores de cambio de las escalas regional y local, y segundo, por qué mientras en una escala más grande se estima una tendencia negativa, en ese mismo sitio a una escala menor se estima una tendencia positiva, como es el caso de las tendencias en las temperaturas mínimas de la estación 15066.

Entre ambas estaciones existe una distancia que ronda los 11 kilómetros en línea recta. La estación Cuesta del Carmen 15197 se ubica dentro de la RBMM, aproximadamente a 1 kilómetro de la zona núcleo y localizada en una cobertura forestal. Por el contrario, la estación Palizada 15066 se encuentra fuera de los límites de la RBMM, al interior de un asentamiento humano, que a su vez está bordeado de una amplia zona agrícola y algunos fragmentos de bosque.

No es, por tanto, difícil darse cuenta de la evolución del contexto medioambiental en la ubicación de ambas estaciones en la RBMM: la estación 15197 se localiza en una zona donde las actividades humanas están limitadas o restringidas, con el objetivo de favorecer la conservación, y si bien se observa en la imagen de satélite que hay usos de suelo agrícola o zonas deforestadas, en general es predominante la extensión de cobertura forestal natural, sobre todo en la zona núcleo (figura 4.34, izquierda). Por otra parte, la estación 15066 se ubica fuera de la RBMM, fuera a su vez de cualquier decreto de protección al medio natural, por lo que las actividades humanas se hacen presentes de forma extensiva (figura 4.34, derecha).



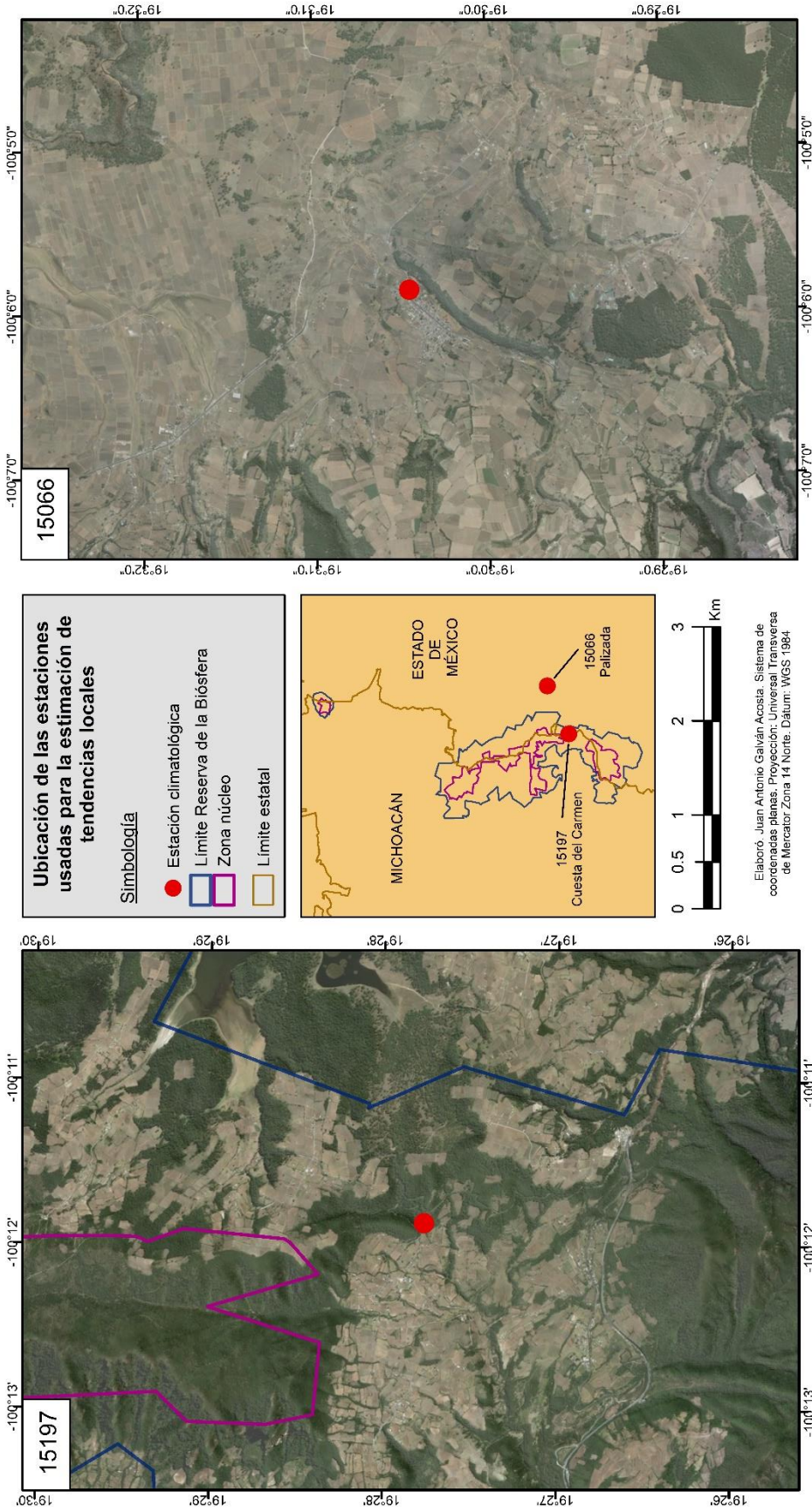


Figura 4.34 Contexto ambiental de la ubicación de las estaciones 15066 y 15197 usadas para la estimación de tendencias en la escala local. En el caso de la estación 15066 fuera de la RBMM, el evidente cambio de cobertura natural a usos agrícola y urbano explica por qué los cambios tanto en la temperatura máxima ($p < 0.01$ y $R^2 > 0.6$) como en la temperatura mínima ($p < 0.01$ y $R^2 > 0.6$) tienden, en la mayoría de los periodos del año, al calentamiento. Fuente: Información vectorial de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y del Servicio Meteorológico Nacional.



Si se retoman los resultados vistos anteriormente solo para la estación 15066, el uso de suelo agrícola explicaría por qué se observa un incremento tanto en la temperatura máxima como en la temperatura mínima, aunque a escala regional la máxima aumente y la mínima disminuya (tabla 4.6). Si bien en la escala regional el clima se comporta de esa manera, existe una modificación al medio natural en la escala local cuyo efecto es que la tendencia de la temperatura mínima local aumente también, provocando un desfase entre las dos escalas mencionadas.

Los cambios de uso de suelo que transforman coberturas forestales naturales a usos agrícolas, urbanos, o simplemente a suelos desprovistos de cualquier vegetación, tienden a incrementar la temperatura dado que se convierten en zonas con mayor exposición a la insolación en comparación a la recibida con la cobertura anterior, además de reducir el efecto sombra y el frescor que los árboles proporcionan. Por eso se puede entender por qué aunque la escala regional dicte una tendencia, a escala local se manifiesta una diferente. Este cambio de uso de suelo funge como un proceso de atribución dentro de la escala local, que se añade a los cambios en la temperatura dictados por escalas de carácter global y regional, y que, dada la resolución de los datos, no se aprecia en dichas escalas. Este efecto de atribución tiene un comportamiento similar a una isla de calor en un medio urbano: de un calentamiento preexistente de escala global, se suma el calentamiento efectuado por la isla de calor en cuestión.

Por el contrario, si se retoman los resultados para la estación 15197, el uso de suelo forestal sobre el que se localiza, explicaría por qué se observa un acoplamiento entre las tendencias de la escala local y la escala regional: al localizarse en una zona con una



cobertura natural, se carece del efecto de atribución anteriormente descrito, por lo que existe una mayor concordancia entre ambas escalas de análisis.

Como tal, esto evidencia que la cobertura del suelo tiene un efecto en el comportamiento de las tendencias que se expresan desde la escala regional o la gran escala. En cuanto a la estación 15066 no hay mucho que decir, es mucho más evidente que las temperaturas locales estén definidas por un cambio de uso de suelo local. Pero la estación 15197 aunque se encuentra en o muy cercana a una cobertura forestal natural, que registra tendencias muy diferentes a la estación 15066 aun con la poca distancia a la que se encuentra una de la otra, y que replica el comportamiento de la escala regional, también es muestra del efecto de la cobertura natural en las tendencias de la temperatura porque se carece de un efecto de atribución como el anteriormente descrito. Pero la ausencia de dicho efecto de atribución no es reflejo del efecto de regulación climática de la RBMM, dado que, si fuera así, las tendencias presentarían un cambio diminuto o nulo al menos en la escala local, cosa que no ocurre puesto que la estación registra tendencias claras al calentamiento y al enfriamiento.



5. Discusión de los resultados

5.1 La aproximación multiescalar en el estudio del clima

Con los resultados arrojados a partir de la modelación estadística de las series históricas de las temperaturas en las tres escalas de análisis, se pueden derivar las siguientes discusiones:

Primero, para la escala nacional existe una clara distribución de los cambios de temperatura en el país: se distinguen zonas que en cualquier estación del año y en cualquier variable de temperatura, presentan incrementos (centro de Sonora-Chihuahua y sur de Chiapas), o bien presentan decrementos (sur de Nuevo León y norte de San Luís Potosí, extremo noroeste de México).

Segundo, de manera general existe un dominio del calentamiento del clima sobre el enfriamiento, tanto en temperatura máxima, media y mínima, así como en sus formas anuales y estacionales. No obstante, en el caso de las temperaturas mínimas si bien sigue existiendo un dominio del calentamiento, las superficies de las zonas de enfriamiento aumentan mucho más con respecto a las superficies de esas mismas zonas, pero en temperaturas máximas.

En general, existen tres tipos de comportamiento para la temperatura en el país: aquellos en donde la temperatura máxima y la temperatura mínima aumentan, aquellos en donde



la máxima aumenta y la mínima disminuye, y por último los lugares en los que tanto temperatura máxima como mínima disminuyen.

Sin embargo, independientemente de los cambios de temperatura que pudieran existir en el territorio nacional y sus múltiples causas, el objetivo de modelar el comportamiento de temperatura en la escala nacional es que se trata de una primera aproximación al efecto en la regulación climática de las Áreas Naturales Protegidas de todo el país. Ninguna zona sobre la que se encuentre un ANP, más allá de su extensión superficial, evidencia un proceso de regulación climática (en donde la tendencia sea igual o cercana a 0°C).

A dicha escala, si se considera únicamente el cambio de la temperatura dentro y fuera de la RBMM, se puede argumentar lo siguiente: si bien se reconoce que la resolución de los datos es una restricción para el análisis comparativo, si se puede notar que el píxel en el que se encuentra la RBMM no es diferente de los píxeles aledaños, aun cuando la RBMM ocupa una buena parte del área del píxel, por lo que en esta primera aproximación se deduce que la RBMM no tiene efecto de regulación a esa escala. De tenerlo, se esperaría que el píxel sobre el que se encuentra la RBMM tuviera, al menos, un valor de tendencia distinto al de los demás.

La escala nacional provee información sobre la regulación climática, pero teniendo como principal restricción a la resolución de los datos. Por ello, analizar esta escala por si sola puede representar una limitante para la comprensión de la regulación, sobre todo cuando se sabe que el clima es un fenómeno cuyo comportamiento se expresa por medio de una jerarquía de escalas (Easterling y Polsky, 2004, en Sheppard y McMaster, 2004).



La jerarquía de escalas es una perspectiva interdisciplinaria, la cual es funcional para la comprensión de una vasta cantidad de fenómenos geográficos, tanto humanos como físicos (Sheppard y McMaster, 2004). Desde esta visión, se busca facilitar la comprensión de los fenómenos, si se analizan no solo aquella escala considerada operacional (la que mejor sirve para explicar el fenómeno), sino una escala por arriba y una escala por debajo.

Con base en lo anterior, es posible que la regulación climática no sea visible en la escala nacional pero sí en otras escalas. Por ello, analizar una escala por debajo de la escala nacional permitirá observar un comportamiento más específico de la temperatura que a escala nacional no se ve. Es decir, mientras que a escala nacional implicaría observar únicamente procesos sinópticos o globales, en la escala regional podrían observarse procesos más específicos sumados a los anteriores.

La modelación de las temperaturas en la escala regional permitió observar un patrón de distribución de temperaturas que en la escala nacional no podía ser visto, además de efectuar de mejor forma el análisis comparativo dentro-fuera de la RBMM.

La discusión más importante que se desprende de analizar la escala regional, es que en esta tampoco se observa un efecto de regulación climática en la RBMM. Lo anterior resulta de mayor interés puesto que, a diferencia de la escala nacional en donde la resolución representaba una limitante para el análisis de las tendencias, a escala regional aumenta la resolución de los datos y favorece el comparar dentro y fuera de la RBMM las tendencias de temperatura, además de observar patrones de distribución de las mismas que a escalas mayores no se apreciaban.



De esta forma, se observa que, en la temperatura máxima, los mayores cambios se localizan dentro de la RBMM, mientras que las zonas de no tendencia se encuentran fuera de la misma. Por su parte, las tendencias de temperatura mínima muestran un enfriamiento generalizado cuyos valores de cambio más altos se localizan al suroeste de la zona de estudio, y cuya extensión afecta también a la RBMM. Así mismo, se observa en cada una de las interpolaciones de esta escala, que ninguna isolínea se ve afectada por la presencia de la RBMM. Además, los análisis de proximidad efectuados con los diagramas de dispersión, muestran que tampoco existe una asociación entre el valor de cambio de la temperatura y su relación dentro-fuera de la RBMM, sino que las tendencias dentro de la RBMM son muy similares a las tendencias fuera de ella, y en algunos casos superiores.

Por lo anterior y en contraposición a lo que plantea la hipótesis de este proyecto, se afirma que en la escala regional tampoco existe un efecto de regulación por parte de la RBMM. De existir dicho efecto, se observarían tendencias cercanas a 0°C dentro de la RBMM, lo que a su vez se vería reflejado en los análisis de proximidad, o bien, una modificación en el trazo de las isolíneas en los mapas.

Siguiendo el modelo de jerarquía de las escalas descrito anteriormente, fue necesario hacer la prueba en una escala adicional, menor, para conocer si en ella si existe un efecto de regulación.

Los resultados que se obtienen de la escala local, apuntan a que tampoco se ve reflejado un efecto de regulación climática a este nivel de análisis. Cabe mencionar que, para esta escala, una de las limitantes en la interpretación de los resultados es la cantidad de



estaciones utilizadas. Si bien era deseable usar la mayor cantidad de ellas para hacer un mejor análisis comparativo, dada la cantidad y calidad de la información solo fue posible usar un total de dos.

Los resultados muestran que, si bien las tendencias a escala local son diferentes dentro y fuera de la RBMM, esa diferencia no es suficiente para aceptar que existe una regulación. Por un lado, se mostró que una estación que está dentro de una zona conservada o poco alterada (estación 15197), replica en buena medida las tendencias arrojadas por escalas mayores, dado que no existe un proceso de escala local que las modifique. Por otro lado, la estación que se localiza fuera de la RBMM (estación 15066) se encuentra en un área que se ha transformado desde una cobertura natural hasta un área agrícola. Ese cambio de uso de suelo se puede asumir como la causante del porqué en dicha estación, tanto las temperaturas máximas como las temperaturas mínimas tienen una tendencia positiva. Por otra parte, la estación localizada dentro de la RBMM, replica el patrón de la escala regional, en el que la temperatura mínima se vuelve más fría, mientras que la temperatura máxima se torna más cálida.

En términos estadísticos, podría hablarse de regulación climática si los valores de la Pendiente de Sen obtenida en el estadístico Mann-Kendall de las estaciones estuvieran muy próximos a cero, aun refutando la hipótesis H_0 “no existe tendencia”, o bien, cuando se hubiera aceptado H_0 sobre H_a “existe una tendencia”. Pero no es ninguno de los casos: las estaciones que representan la escala local tienen un comportamiento distinto, pero que en ambos casos tiene una tendencia estadísticamente significativa, por lo que la RBMM no cumple su papel como regulador de la temperatura.



Partiendo de lo anterior, la explicación que se ofrece en este proyecto a los repuntes de la temperatura en la escala local, propiamente para la estación 15066, tiene relación parcial con lo que Miró *et al.* (2016) argumentan sobre tendencias de temperatura en núcleos urbanos de la Comunidad Valenciana, en España: en ese caso, se hace un diagnóstico de tendencias para identificar el calentamiento en esas zonas, y se efectúa una reducción de escala para verificar hasta qué punto el efecto de isla de calor es responsable del calentamiento de la temperatura. Se llega a la conclusión de que si bien si existe una influencia de la isla de calor en la tendencia de la mancha urbana (y que se demuestra además al comparar con las tendencias de estaciones en zonas rurales) se reconoce que existe un cambio climático primario, de modo que al cambio climático “original” se le sobrepone el calentamiento por isla de calor.

En este estudio sucede algo similar, pero no en un núcleo urbano sino en una zona que ha sido deforestada para uso agrícola y que sus temperaturas han tendido a un calentamiento: la tendencia al calentamiento causada por de la deforestación se sobrepuso a la tendencia al calentamiento ya de por sí dictado por la escala global, en otras palabras, el comportamiento de una escala global es modificado por una condición local, pero ambas en concordancia. De acuerdo con Arriola (2018) se espera que en una zona en la que ocurre un cambio de uso forestal a agrícola, la temperatura aumente, como se observa en este proyecto. Las superficies agrícolas y de pastizales provocan un incremento del albedo, lo que propicia menos radiación solar para aumentar la temperatura. No obstante, los bosques mantienen una mayor humedad en el suelo, superficie foliar y rugosidad, condiciones que favorecen menores temperaturas, rebasando el efecto del menor coeficiente de albedo.



Lo anterior dicho demuestra que la RBMM tampoco regula el clima en la escala local, puesto que las temperaturas dentro de ella tienen una tendencia que dista los 0°C. De la misma forma, se deduce que, la RBMM al conservar su cobertura natural, no regula el clima, pero si garantiza que no tenga injerencia algún otro proceso de escala local que amplifique o revierta las tendencias de temperatura (un proceso de atribución), como si ocurre con el cambio de uso de suelo en la estación que se encuentra fuera.

Entender la forma en que las escalas del clima interactúan y se acoplan es un proceso complejo. La escala es la resolución espacial a la cual se puede estudiar un proceso o una variable climatológica y que permite comprender de qué forma actúa y qué elementos intervienen en su comportamiento. En Climatología, la escala se entiende como la ocupación horizontal de los fenómenos atmosféricos (Arriola, 2018). Por ejemplo, el fenómeno de El Niño es un evento climatológico-oceanográfico de la gran escala, puesto que en él intervienen procesos que abarcan una extensión global; no así el incremento de la temperatura que registra el termómetro de una estación climatológica como consecuencia de la disminución de la cobertura vegetal en la zona, que representa un evento a una escala local comparativamente muy reducida.

La forma en que las escalas se acoplan inicia en la gran escala, que será la que dicte, por ejemplo, la tendencia que seguirá una variable como la temperatura. No obstante, ese comportamiento “inicial” de la gran escala comenzará a cambiar de manera gradual según se encuentre con elementos que de forma muy localizada puedan modificar o incluso revertir el comportamiento inicial de la escala inicial, la gran escala, pero siempre siguiendo esa lógica en donde el comportamiento que dicte la escala local estará influenciada por una escala global como trasfondo.



Para fines de este proyecto, una tendencia de temperatura de muy grande escala puede ser modificada en magnitud y/o dirección en la pequeña escala, pero sin dejar de comprender que esos cambios están dictados en principio por la gran escala, puesto que si la tendencia fuera diferente, diferentes serían también las modificaciones locales.

La gran escala puede entenderse como el comportamiento generalizado del clima, el proceso dominante para una amplia zona de la superficie, obtenido por una aglomeración de datos provenientes de diversas fuentes, para alguna variable en específico, como puede ser la temperatura o la precipitación. Y al tratarse de un comportamiento generalizado, se expresa en una resolución mucho menor que la que tendría una escala local, por ejemplo. Es por esa misma razón que a una escala global no puede detectarse el efecto de isla de calor de un núcleo urbano, o el incremento de temperatura que ocasionó la apertura de una hectárea de bosque para el uso agrícola.

El reconocimiento de que el clima está cambiando ha generado una continua demanda de escenarios o proyecciones de cambio climático en escalas regional y local para evaluaciones de cambio climático en diferentes sectores de la sociedad y para la toma de decisiones (Sánchez, *et al.*, 2011). Se considera entonces que uno de los principales aportes de este trabajo es conocer cuál es el comportamiento del clima (por lo menos de la temperatura) desde diferentes escalas por medio de un diagnóstico de lo ya ocurrido: un término medio entre lo que se considera “climatología base” y “escenario de cambio climático”, un diagnóstico de lo que está ocurriendo.

En donde se tiene muy claro la interacción existente entre escalas espaciales, es en el proceso de reducción de escala (*downscaling*). La reducción de escala es un ejemplo de



cómo pueden interactuar dos escalas al mismo tiempo: se define como la serie de técnicas que relacionan variables atmosféricas medidas a gran escala con variables de escala regional o local (Sánchez *et al.*, 2011).

En relación a lo dicho anteriormente, algunas investigaciones que se han efectuado en torno a la distribución potencial bajo escenarios de cambio climático para la mariposa monarca (Barve *et al.*, 2012; Islas, *et al.*, 2015) respaldan los resultados obtenidos en este proyecto. En citados trabajos, se ha modelado la posible distribución de la mariposa monarca dentro de la RBMM bajo cambios de temperatura. El resultado es similar en los dos: el área de distribución potencial de la mariposa monarca se reduce considerablemente en toda la zona circundante a la RBMM, tanto dentro como fuera de ella. Si bien se debe considerar que estos escenarios de distribución potencial se construyen re-escalando el escenario de temperaturas generado por un Modelo de Circulación General, y los valores de temperatura local, y que por ello contienen un cierto grado de incertidumbre, finalmente se construyen tomando en cuenta condiciones existentes (la condición inicial), por lo que, si el efecto de regulación climática en la RBMM existiera, debería estar presente en dichos escenarios.

En el trabajo de Barve *et al.* (2012) se demuestra que el área de distribución potencial de la mariposa monarca, se reduce drásticamente en la RBMM bajo diferentes escenarios de emisiones, lo que implica que, de existir un efecto de regulación climática, éste se vería reflejado en escenarios futuros. A su vez, de reflejarse un efecto de regulación en escenarios futuros, se observaría también un menor cambio en la distribución potencial de la mariposa monarca dentro de la RBMM que fuera de ella, algo que tampoco ocurre. Con todo lo anterior, se espera que, en un futuro, los cambios en la temperatura en la



zona de estudio se den en múltiples direcciones, independientemente de la presencia de la RBMM.

5.2 La conservación como estrategia para la reducción de la vulnerabilidad de la mariposa monarca.

Los resultados arrojados por esta investigación demuestran que los cambios de temperatura a lo largo de los 30 años de estudio han sido constantes y mantienen claras tendencias, al enfriamiento o al calentamiento. Estos cambios son el resultado de un proceso mucho más grande que excede a la extensión de la RBMM para regular el clima, en este caso las temperaturas máximas y mínimas. Los cambios de temperatura apuntan a que el clima continuará incrementando las temperaturas al menos en el corto y mediano plazo, lo que sugiere que los esfuerzos que se han efectuado para mitigar estas tendencias han sido poco o nada eficientes, y se prevé que difícilmente lo sean en un futuro próximo. Si se asume que los cambios en la temperatura son irreversibles, que estos cambios se dirigen a generar condiciones cada vez más adversas para la hibernación de la especie dentro de la RBMM, y que escapan a cualquier política pública regional o local que se efectúe para mitigarlos, cabe la pregunta ¿qué propuestas se pueden plantear para contribuir a la conservación de la mariposa monarca? La propuesta de este trabajo al demostrar que existe un cambio en las temperaturas en la RBMM, y que generará condiciones más adversas para la mariposa monarca, es que los esfuerzos de conservación de la especie se centren fundamentalmente en la restauración del medio natural en la RBMM con miras a reducir su vulnerabilidad y favorecer su adaptación a los cambios de temperatura.



Se asume a la adaptación al cambio climático como lo define el IPCC (2001) “un ajuste en los sistemas ecológicos, sociales o económicos en función de lo observado y/o lo esperado en cuanto al cambio climático con el objetivo de aliviar o disminuir los impactos negativos, o bien, poder tomar ventaja de los mismos”, pero también tomando a la adaptación como lo desglosan Neil *et al.* (2005) al señalar que “la adaptación es un continuo flujo de actividades, acciones, decisiones y actitudes que nutren la toma de decisiones en diferentes aspectos de la vida”. Bajo esa premisa, a continuación, se hace una reflexión de las posibles acciones a ejecutar con el objetivo de reducir los impactos negativos en la mariposa monarca como consecuencia de la disminución de la temperatura.

Con base en lo descrito en el apartado 5.1, se puede tener una aproximación a cuál es el escenario futuro para la permanencia de la mariposa monarca durante en la RBMM. Para ello, solo se deben analizar las tendencias correspondientes a los meses de invierno, que son aquellos cuando la mariposa hiberna en la RBMM. En ese caso, y partiendo de los modelos fisiológicos de supervivencia de la especie (Barve *et al.*, 2012) los incrementos de la temperatura máxima no representan un problema para la permanencia de la especie, puesto que, en primer lugar, la razón de su migración es esa: la búsqueda de temperaturas más cálidas durante los inviernos crudos de América del Norte que les resulten más favorables. En segundo lugar, porque en dicho modelo fisiológico no se observa que temperaturas por encima de los 0°C representen una amenaza a la vida de la especie, como si se observa para aquellas inferiores a -4.2°C. Es esta última la que se considera la temperatura umbral y en la cual la mortalidad de mariposas monarca puede ocurrir de manera significativa (sin considerar la precipitación



o el viento, los cuales tienen un papel importante en la mortalidad de la especie en la RBMM). Los datos de la estación climatológica 15197 muestran que el valor medio de temperatura mínima de DEF es de 3.8°C durante 30 años de registro (81-10), pero de 2.34°C en los últimos cinco años de registro (06-10). Si se asumen las tendencias mostradas para la escala local, las cuales fueron para el periodo de invierno de -0.104 °C/año (-3°C/30 años; tabla 3.4), entonces se podrá observar que, de continuar esa tendencia, aproximadamente en menos de 30 años el valor medio de las temperaturas mínimas estará por debajo de 0°C, acercándose cada vez más al valor umbral de la especie.

Las poblaciones de la mariposa monarca en sus sitios de hibernación están disminuyendo, así lo demuestran diversos estudios (Brower *et al.*, 2012; Thogmartin *et al.*, 2017a; Thogmartin *et al.*, 2017b; Rendón y Vidal, 2014). Según Brower *et al.* (2011) la extensión media ocupada por la mariposa monarca en el centro de México durante la hibernación, (siendo esta un indicador indirecto de la población total de mariposas) estimada para un periodo de 17 años (1994–2010) es de 7.24 ha. De esos años, los últimos 7 han estado siempre por debajo de la media. La estimación de la superficie media ocupada por la mariposa monarca hecha por Rendón y Vidal (2014) para un periodo de 21 años (1993-2013) arroja un valor de 6.30 ha (menor que el anterior mencionado) y del cual los últimos 7 años se encuentran por debajo de ese valor. Una tercera estimación la hacen Hansen y Sato (2018, Universidad de Columbia, comunicación por correo, 12 de septiembre de 2018) en un periodo de 25 años (1993-2017). El valor de extensión media de ocupación de la mariposa monarca se estima en 5.74 ha (de nueva cuenta, menor que el anterior). Considerando ese valor medio, los



últimos 12 años han estado por debajo de la media. Con ello se observa que conforme el periodo de medición aumenta, la media se hace cada vez menor y que el número de años que presentan una anomalía negativa son siempre los últimos, lo que indica una clara tendencia a la disminución de superficie ocupada por la mariposa monarca en la RBMM o cerca de ella.

A su vez, en estos mismos trabajos han reconocido como principales causantes de la disminución de la población de mariposas monarcas a la disminución en la densidad de asclepias (*Asclepias spp.*) y los procesos de cambio de uso de suelo y expansión agrícola en la zona de crecimiento y reproducción, así como la extracción ilegal de madera de oyamel (*Abies religiosa*) y pino (*Pinus spp.*) en la zona de hibernación. Las condiciones climáticas extremas o adversas al crecimiento de las larvas de la mariposa monarca, se reconocen en ambos sitios.

En el caso de las condiciones climáticas extremas, se tienen registros de que cada vez son más frecuentes eventos extremos asociados a temperaturas, precipitaciones y vientos en los sitios de hibernación, tal como lo sugieren Browser *et al.* (2012) y Barve *et al.* (2012), y que explican las variaciones en la concentración de poblaciones de mariposas monarcas para ciertos años, como la temporada 2009-2010. En concordancia con lo anterior este trabajo presenta la evidencia sobre las tendencias positivas o negativas de las temperaturas, lo que se traduciría en condiciones cada vez más adversas para la permanencia de la especie. Esto último coincide con lo que Barve *et al.* (2012) encuentran al aceptar la hipótesis de que las temperaturas diarias estimadas para el periodo invernal dentro de la RBMM tienden a un enfriamiento que progresivamente se acerca a las condiciones umbrales de supervivencia de la mariposa monarca. Por su



parte, Thogmartin *et al.* (2017a) encuentran que existe una correlación significativa entre las temperaturas existentes en los sitios de reproducción y crecimiento y la cantidad total de hectáreas ocupadas por mariposa monarca en la RBMM: una asociación negativa en las primeras semanas de crecimiento (inicio a finales de mayo), y una asociación positiva con las semanas consecuentes (finales de mayo a mediados de junio).

También se ha evidenciado que la disminución en la superficie ocupada por la mariposa monarca en los sitios de hibernación de la RBMM está relacionada con la disminución de población en sus sitios de reproducción y crecimiento como consecuencia de la disminución en las densidades de algodoncillo (Thogmartin *et al.*, 2017b). La planta algodoncillo (*Asclepias spp.*) es la planta hospedera por excelencia de la mariposa monarca: aloja a los huevecillos de las mariposas durante la fecundación de la hembra cuando la mariposa aún no ha migrado hacia México. Las asclepias son especies que tienen una amplia distribución en la región conocida como 'Medio oeste' de los Estados Unidos, incluyendo estados como Norte y Sur Dakota, Nebraska, Minnesota, Wisconsin, Michigan y Ohio, y en la que sus mayores concentraciones se encuentran en Iowa y Missouri; tan amplia es su distribución que en México hay presencia de algodoncillos en comunidades permanentes de mariposa monarca en Michoacán, San Luis Potosí, Guerrero, Morelos y Chiapas (Cortez *et al.*, 2014). Observaciones en campo referidas por Brower *et al.* (2012) dan cuenta que existe una relación directa entre la concentración de algodoncillo y la población de mariposas monarca: entre mayor sea la primera, generalmente la segunda tenderá a aumentar.

La principal causante de la disminución de algodoncillos en Estados Unidos es la adopción desde 1999 de cultivos de soya y maíz genéticamente modificados



(Organismos Genéticamente Modificados, en breve OGM) resistentes a herbicidas de glifosato los cuales son aplicados para la erradicación de algodoncillos considerados estos como malezas en parcelas agrícolas (Brower *et al.*, 2012). Y es la principal causa puesto que se estima que aproximadamente el 98% de toda la pérdida de algodoncillos en la región es atribuida a la pérdida en campos agrícolas de soya y maíz desde ese año (Thogmartin *et al.*, 2017b) lo que ha generado a su vez que la reproducción de la mariposa monarca se haya frenado en un 81% (Thogmartin *et al.*, 2017a).

Incrementar la concentración de asclepias en la zona nororiental de Estados Unidos y suroriental de Canadá, traería consigo como primer y principal beneficio el incremento de la población de mariposas monarcas. Lograr ese objetivo tomando como punto de partida las concentraciones actuales de asclepias en los distintos usos de suelo, supone un reto muy grande que involucra consumir esfuerzos de repoblamiento para incrementar la densidad, sobretodo en áreas en las que empíricamente se supone que existe una contribución significativa: en el caso de las parcelas de cultivo de soya y maíz es lo más deseable pero se descarta por completo su viabilidad puesto que es difícil que los agricultores dejen de usar OGM, o en zonas urbanas en los que el éxito de repoblamiento dependerá del esfuerzo colectivo de la ciudadanía; pero se reconoce que repoblar de asclepias en áreas protegidas y zonas adyacentes a carreteras pueda tener una contribución importante. En lo anterior, el escenario propuesto por Thogmartin *et al.* (2017b) indica que para lograr un adecuado repoblamiento de asclepias y por ende un repunte en la cantidad de mariposas monarcas, se requiere un esfuerzo de todos los usos de suelo por incrementar la concentración de asclepias (lo que se conoce como “all hands on deck”), aunque el solo incremento de plantas en campos de soya y maíz como lo había



antes de 1999 puede ser suficiente. Si bien el escenario arroja información importante sobre cuánto es el incremento potencial de asclepias al que se puede llegar según el uso de suelo, hace falta ver el potencial que estas concentraciones tienen como hospederos de comunidades de mariposa monarca, dado que no es lo mismo una comunidad alejada en una parcela agrícola, que muy cercana a una carretera.

Continuar con esa relación simbiótica de tipo comensalista podría acarrear otro tipo de beneficios que aún no han sido investigados a profundidad. Por ejemplo, Cortez *et al.* (2014) reportan que uno de los beneficios de incrementar la densidad de asclepias en algunas comunidades permanentes de mariposa monarca presentes en el estado de Michoacán, después de aumentar la cantidad de mariposas, es el control biológico de plagas de árboles de limón por medio del parasitismo que efectúan algunos organismos sobre los huevecillos de la mariposa, sin que esto represente un riesgo a la extinción de la monarca.

La explotación forestal ha sido un *driver* de la disminución de la población de la mariposa monarca. Thogmartin *et al.* (2017a) identifican por medio de técnicas de fotointerpretación que existe una correlación positiva entre las tasas de deforestación y la cantidad de hectáreas ocupadas por mariposas monarca dentro o cerca de la RBMM. De manera similar, Brower *et al.* (2012) han identificado que la explotación forestal ilegal ha degradado casi la mitad de sitios de hibernación de mariposa monarca dentro de la RBMM entre 1971 y 1999. Una nueva medición para el periodo 2001-2009, después del decreto presidencial del año 2000 que incrementaba la superficie de la zona núcleo, arrojó que se degradó cerca del 10% de toda la zona núcleo, y que si bien la degradación disminuyó, no se detuvo. Champo *et al.* (2012) hacen un análisis de deforestación dentro



de la RBMM mediante la clasificación supervisada de imágenes de satélite. Con ese trabajo, concluyen que entre los años 2006-2010 hubo una tasa media de deforestación de 500 ha/año, de las cuales 300 se dieron dentro de la zona núcleo. Lo anterior tiene una cierta lógica: las áreas mayormente deforestadas están localizadas en regiones que cuentan con mayor densidad de recursos forestales, y la zona núcleo es la que tiene la mayor densidad de bosque con respecto a la zona de amortiguamiento, que su cobertura de suelo podría catalogarse en su mayoría como “no bosque”. No obstante, lo que no es lógico es que eso ocurra en una zona que tiene por decreto presidencial una protección a sus recursos forestales y una prohibición total a la intromisión de actividades humanas. Este trabajo plantea el supuesto de que las temperaturas en la RBMM continuarán cambiando y propiciando cada vez condiciones más adversas para la hibernación de la mariposa monarca, pero también considera la evidencia que demuestra que los cambios en las condiciones climáticas no son la única razón por la que la población de mariposas monarcas está disminuyendo, este trabajo propone fomentar la adaptación de la mariposa monarca ante el cambio climático mediante una estrategia que puede resultar efectiva para prolongar la permanencia de la especie en el sitio y propiciar su adaptación a los cambios en el clima: la conservación y la restauración de su medio, tanto de reproducción y crecimiento como de hibernación. Por un lado, la conservación de los bosques de oyamel cuya extensión es dominante dentro de la zona núcleo y que funcionan como albergues para la mariposa durante su estancia en la RBMM, a partir de la vigilancia constante para evitar su extracción ilegal. Por otro lado, la restauración de las comunidades de algodoncillos en el noreste de Estados Unidos y sureste de Canadá en diferentes ambientes para promover el incremento de población de mariposas.



Como se ha visto en las tendencias de escala global, una zona que forma parte de la ruta migratoria tiende al enfriamiento, tal como puede observarse en las figuras 3.1 a la 3.15: se trata de toda una zona de enfriamiento ya descrita en la zona de Nuevo León-San Luís Potosí, y que en ocasiones se extiende hasta Tamaulipas. Se necesitan hacer estudios de escala local para conocer la interacción de ambas escalas con el fin de hacer un diagnóstico del comportamiento de las temperaturas, tomando en cuenta que en la gran escala está ocurriendo un enfriamiento, y con ello poder plantear estrategias de adaptación de la mariposa a su ruta migratoria, sobre todo si esas temperaturas se encuentran muy cerca del umbral de supervivencia de la especie.

En concreto, ejemplo de lo anterior es el conjunto de acciones que está llevando a cabo el gobierno del estado de Tamaulipas, por medio de la Secretaría de Desarrollo y Medio Ambiente, en coordinación con presidencias municipales: pago de incentivos a ciudadanos por mantener parcelas dedicadas exclusivamente a la alimentación de mariposa monarca con la siembra de asclepias y polocotes. Es además una estrategia que involucra a la ciudadanía en el proceso de conservación de una especie animal y que tiene el potencial de, en un futuro, además de mantener las parcelas, promover un monitoreo de la especie y generar un inventario anual, basándose en el concepto de ciencia ciudadana.

Tal como se redacta en la nota, esta serie de actividades sirven para disminuir las amenazas que [las mariposas monarcas] enfrentan durante la migración”. Tal como se ha argumentado en este proyecto, se reconoce que estas acciones no terminan con las amenazas para la mariposa monarca, como podría ser el cambio climático, por ejemplo, pero si pueden ayudar a disminuir los impactos negativos que se tengan sobre ellas.



Con todo lo anterior dicho, se deduce que, si bien los cambios en la temperatura que se han detectado dentro de la RBMM representan una importante amenaza para la permanencia de la mariposa monarca, se proponen un conjunto de acciones que propicien la reducción de la vulnerabilidad de la misma, ante tales cambios.



6. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos en este proyecto de investigación, se concluye lo siguiente:

Primero, se cumplieron tanto el objetivo general como los objetivos particulares planteados, al lograr identificar y contrastar las diferencias que existen entre las tendencias de temperatura tanto máxima como mínima en las diferentes escalas de análisis en la zona de estudio.

Segundo, dados los resultados obtenidos, se refuta la hipótesis plantada para este proyecto. La evidencia muestra que la RBMM no tiene influencia en la regulación del clima, lo cual se observa en las tres escalas evaluadas. Los mapas de tendencia de la temperatura, los análisis de proximidad para la escala regional y las pruebas estadísticas para la escala local sustentan esta afirmación. La escala global es la primera aproximación que se tiene al proceso de regulación climática para todas las áreas naturales protegidas del territorio nacional, y en ningún sitio se observa la influencia de alguna de ellas en la tendencia de la temperatura, incluida la RBMM. Las siguientes dos escalas, acopladas a la RBMM, demuestran que tampoco hay una injerencia en la tendencia del clima por parte de la RBMM.

Tercero, se reconoce que las tendencias de la temperatura máxima son mayores dentro de la RBMM con respecto a su área adyacente. Por el contrario, las mayores tendencias de temperatura mínima se ubican en un área que se extiende tanto dentro como fuera de la RBMM, al sur de la misma.



Cuarto, existe una asociación media entre las tendencias de la escala regional y las tendencias de la escala local, lo que permite ver que la escala regional es solo una reconstrucción del comportamiento del clima, ante la incapacidad de manejar toda la información climática existente. Por ello, la información de escalas mayores debe ser manejada y usada como una fuente de datos con mayor incertidumbre. Por esa misma razón, se debe considerar el comportamiento del clima en escalas locales para la toma de decisiones, dado que en la escala local se observa un comportamiento del clima muy particular, que no siempre es reflejado en la escala regional.

Por último, al no existir una regulación climática por parte de la RBMM, las condiciones de temperatura favorecerán cada vez menos la hibernación de la especie *Danaus plexippus*, por lo que este proyecto propone concentrar todos los recursos necesarios en la reducción de la vulnerabilidad de la mariposa monarca ante los cambios de temperatura, más que en la mitigación de dichos cambios, fundamentalmente promoviendo la conservación y restauración de su hábitat.

La escala es un concepto geográfico, que se extiende más allá de la relación matemática existente entre una representación cartográfica y su realidad representada. Es un ente complejo y abstracto que permite observar un proceso que en cada escala se manifiesta con propiedades y características distintas. Se ha observado que múltiples fenómenos tanto del medio físico como del ámbito humano pueden ser entendidos desde una visión multiescalar, por lo que se sugiere que en proyectos posteriores, se analicen las distintas escalas que pueden estar involucradas así como las interacciones entre ellas. En este caso en particular, se esperaba que la regulación climática fuera evidente en alguna de las escalas bajo estudio, pero no ocurrió así.



Por otra parte, este proyecto propone una metodología que busca evaluar un servicio ambiental como lo es la regulación climática, por medio del procesamiento geoestadístico de los datos de temperatura en un sitio. De esa forma, se espera que esta metodología pueda ser replicada en futuros proyectos de investigación en los que se busque la detección y estimación de tendencias de diversas variables medioambientales en conjunto con sus patrones de distribución espacial, como la precipitación, el cambio de uso de suelo o el NDVI, además de ayudar en estudios de cambio climático y apoyar en la generación de estrategias para la conservación de la biodiversidad.

Es necesario tener autocrítica y reconocer que una de las desventajas de este proyecto es que la información climática a escala local puede resultar insuficiente para llegar a una conclusión certera. Hubiera sido deseable haber utilizado una mayor cantidad de información de escala local, sin embargo dadas las características de los datos en las estaciones climatológicas del sitio, solo fue posible usar dos de ellas. Así mismo, se espera que en un futuro este trabajo pueda ser perfeccionado ante el creciente desarrollo tecnológico que ha permeado en el monitoreo del clima; los datos climáticos de satélite de alta resolución podrán ser una fuente de información confiable.



Referencias

- Arriola, V. (2018) Efecto del cambio de cobertura del suelo en el clima regional de la Costa Central del Golfo de México (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Barbosa, H., Lakshmi, T. y Silva, L. (2015). Recent trends in vegetation dynamics in the south America and their relationship to rainfall. *Nat Hazards*, (77), 883-899.
- Barnes, M., Craigie, I., Harrison, L., Geldmann, J., Collen, B., Whitmee, S., Balmford, A., Burgess, N., Brooks, T., Hockings, M. y Woodley, S. (2016) Wildlife population trends in protected areas predicted by national socio-economic metrics and body size. *Nature communications*, 7.
- Barve, N., Bonilla, A., Brandes, J., Brown, J., Brunsell, N., Cochran, F., Crosthwait, R., Gentry, J., Gerhart, L., Jackson, T., Kern, A., Oberhauser, K., Owens, H., Peterson, A., Reed, A., Soberón, J., Sundberg, A., y Williams, L. (2012) Climate change and mass mortality events in overwintering monarch butterflies. *Revista Mexicana de biodiversidad*, (83), 817-824.
- Bezaury, J. y Gutiérrez, D. (2009) Áreas naturales protegidas y desarrollo social en México en Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2009) *Capital natural de México. Volumen 2. Estado de conservación y tendencias de cambio*. (pp- 385-341). Ciudad de México, México: Autor.
- Brower, L., Zubieta, R., Williams, E. y Ramírez, I. (2012) Decline of monarch butterflies overwintering in Mexico: Is the migratory phenomenon at risk? *Insect Conservation and Diversity*. 1-6.
- Campos, D. (1998). Precipitación. En *Procesos del ciclo hidrológico* (pp.4-1 – 4-99). San Luís Potosí, México: Universidad Autónoma de San Luís Potosí.
- Castro, L. y Carvajal, Y. (2010) Analisis de tendencia y homogeneidad en series climatológicas. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (9), 15-25.
- Céspedes, S. y Moreno, E. (2010). Estimación del valor de la pérdida de recurso forestal y su relación con la reforestación en entidades federativas de México. *Investigación ambiental*, 2(2), 5-13.
- Champo, O., Valderrama, L., y España, M. (2012) Pérdida de cobertura forestal en la Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca, Michoacán, México (2006-



- 2010). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Medio Ambiente*, 2(18), 143-157.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2001) *Programa de Manejo Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca*. México: Autor.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2011) Antecedentes. En *Estrategia y lineamientos de manejo de fuego en áreas naturales protegidas*. México: Autor.
- Comisión Nacional del Agua (2011) Anexo 11. Descripción de la base de datos administrada con CLICOM en *Manual para el control de inundaciones* (pp. 268-276). Autor.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2009) Ejes-guía para las acciones estratégicas. En *Capital natural de México. Acciones estratégicas para su valoración, preservación y recuperación*. (pp. 9-28) Ciudad de México: Autor.
- Cortez, H., García, F. y Guzmán, A. (2014) Conservando la mariposa monarca (*Danaus plexippus L.*), conservando enemigos naturales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 247-253
- Espín, D. (2005) Análisis espacial y temporal de las olas de frío en la region de Murcia. Cartografía del riesgo de heladas en la huerta de Murcia. De La Riva, J., Ibarra, P., Montorio, R., y Rodrigues, M., (2005) *Análisis espacial y representacion geografica: innovación y aplicación*, 1589-1597
- Espinosa, E. (2013) Análisis de la distribución de gastos máximos anuales (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Estrategia Nacional de Cambio Climático. México (2012). Consultado el día 23 de marzo de 2018 en:
http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documentos/06_otras/ENCC.pdf
- Food and Agriculture Organization (2016) Tendencias en el cambio del uso de la tierra. En *El estado de los bosques del mundo 2016. Los bosques y la agricultura en relación con el uso de la tierra* (pp. 7-26). Roma: Autor
- Food and Agriculture Organization (2018) Servicios Ecosistémicos y Biodiversidad. Consultado el día 16 de octubre de 2018 en: <http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/background/regulating-services/es/>



- Fatoric, S. (2014) Vulnerability and adaptation to climate change in the mediterranean region. Climate out of balance in Aiguamolls de l'Empordà? (tesis de doctorado). Universidad Autónoma de Barcelona. Barcelona
- Figueroa, F., Sánchez-Cordero, V., Illoldi-Rangel, P., y Linaje, M. (2011) Evaluación de la efectividad de las áreas naturales protegidas para contener procesos de cambio de uso de suelo y la vegetación ¿Un índice es suficiente?. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, (82), 951-965.
- García, E. (1981). *Apuntes de Climatología*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Global Forest Watch (2016). Consultado el día 09 de octubre de 2016 en: <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/global>
- Harris, I., Jones, P., Osborn, T. y Lister, D. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climate observations – the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, (34), 623-642.
- Herrmann, S., Anyamba, A. y Tucker, C. (2005). Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change*, (15), 394-404.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2008). Diagnóstico de los sistemas de información meteorológica, climatológica, hidrológica y oceanográfica. En *Diagnóstico de las capacidades, fortalezas y necesidades para la observación, monitoreo, pronóstico y prevención del tiempo y el clima ante la variabilidad y el cambio climático en México* (pp. 14-37). Ciudad de México: Autor.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2001) *Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability. Summary for policy makers*. World Meteorological Organization.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2014) *Cambio climático 2014. Informe de síntesis*. Ginebra: Autor.
- Islas, A., Pérez, R., González, A., Romero, M. y Velasco, E. (2015). Riesgo del hábitat de la mariposa monarca (*Danaux plexippus*) ante escenarios de cambio climático. *Revista Ra Ximhai*, 5(11), 49-59.
- Jain, S. y Kumar, V. (2012). Trend analysis of rainfall and temperature data for India. *Current science*, 102(1), 37-49.
- Ley General de Cambio Climático (2012). Consultado el día 23 de marzo de 2018 en: http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6583/1/ley_general_de_cambio_climatico.pdf



- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (2012). Consultado el día 04 de agosto de 2017 en:
<https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/protocolo/LGEEPA.pdf>
- López, A. (2012) *Deforestación en México. Un análisis preliminar*. Ciudad de México: CIDE.
- López, L. (2015). *Evaluación de la predictibilidad de del tiempo atmosférico en el Valle de México*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Maldonado, T. y Alfaro, E. (2010). Revisión y comparacion de escenarios de cambio climático para el Parque Nacional Isla de Coco, Costa Rica. *Revista Biológica Tropical*, (60), 83-112.
- March, I. y Flamenco, A. (1996). *Evaluación de la deforestación en las áreas naturales protegidas de Chiapas (1970-1993)*. San Cristóbal de las Casas, México: El Colegio de la Frontera Sur.
- Mendenhall, W., Beaver, R. y Beaver, B. (2010) Modelos lineales y estimación por mínimos cuadrados. En *Estadística matemática con aplicaciones* (pp. 563-639). Ciudad de México: CENGAGE Learning.
- Miró, J., Estrela, M. y Olcina, J. (2016) Reconstrucción de la señal térmica local en la comunidad valenciana entre 1948 y 2011 a partir de un downscaling estadístico mediante una red neuronal artificial: detección de patrones locales de cambio. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*. 70, 113-147.
- Neil, W., Arnell, N. y Tompinks, E. (2005) Succesful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change*. 77-86.
- Nogueira, M. (2014) Trends in mean annual streamflows in Serra da Mantiqueira Environmental Protection Area. *Brazilian Archieve of biology and technology*, 57(6), 1004-1012.
- Organización de las Naciones Unidas (1992) *Convenio sobre la diversidad biológica*. Río de Janeiro: Autor.
- Programa Especial de Cambio Climático (2014) Consultado el día 23 de marzo de 2018 en: <http://www.sectur.gob.mx/wp-content/uploads/2014/09/PECC-2014-2018.pdf>
- Recursos Forestales Mundiales (2012) *Términos y definiciones. Documento de trabajo de la evaluación de los recursos forestales no. 180*. Roma: Autor.
- Rendón, E. y Vidal, O. (2014) Dynamics and trends of overwintering colonies of the monarch butterfly in Mexico. *Biological Conservation*, 108, 165-175.



- Ribeiro, S., Caineta, J. y Costa, A. (2015) Review and discussion of homogenization methods for climate data. *ELSEVIER Physics and Chemistry of the Earth*, (94), 167-179
- Sánchez, I., Díaz, G., Cavazos, T., Granados, R. y Gómez, E. (2011). *Elementos para entender el cambio climático y sus impactos*. Ciudad de México: Medio Ambiente y Ecología. Serie.
- Sheppard, E. y McMaster, R. (2004). *Scale and Geography Inquiry. Nature, Society and Method*. Cornwall: Blackwell Publishing.
- Soares, B., Moutinho, P., Nepstad, D., Anderson, A., Rodrigues, H., Garcia, R., Dietzsch, L., Merry, F., Bowman, M., Hissa, L., Silvestrini, R., y Maretti, C. (2010) Role of brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. *PNAS*, 107(24), 10821-10826.
- Téllez, O. y Dávila, P. (2003) Protected areas and climate change: a case of study of the Cacti in the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, Mexico. *Conservation Biology*, 17(39), 846-853.
- Thogmartin, W., Wiederholt, R., Oberhauser, K., Drum, R., Diffendorfer, J., Altizer, S., Taylor, O., Pleasants, J., Semmens, D., Semmens, B., Erickson, R., Libby, K. y Hoffman, L. (2017a) Monarch butterfly population decline in North America: identifying the threatening processes. *The Royal Society Open Science*. 1-16.
- Thogmartin, W., López, L., Rohweder, J., Diffendorfer, J., Drum, R., Semmens, D., Black, S., Caldwell, I., Cotter, D., Drobney, P., Jackson, L., Gale, M., Helmers, D., Hilburger, S., Howard, E., Oberhauser, K., Pleasants, J., Semmens, B., Taylor, O., Ward, P., Wiltzin, J. y Wiederholt, R. (2017b) Restoring monarch butterfly habitat in the midwestern US: "all hands on deck". *Environmental Research Letters*. 1-16.
- Vergés, F., Pérez, J., Villalobos, M., Navarro, E., Salinas, E. y Remond, R. (2014). El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y bosque*, 1(20), 21-35.
- Villalobos, I. (2000). Áreas naturales protegidas: instrumento estratégico para la conservación de la biodiversidad. *Gaceta ecológica*, (54), 24-34.
- Villers, L. y Trejo, I. (1998). Impacto del cambio climático en áreas naturales protegidas de México. *Interciencia*, 23(1), 10-19.
- Virkkala, R. y Rajasärkka, A. (2011) Climate change affects populations of northern birds in boreal protected areas. *Biology Letters*, 7(3), 395-398



Wackerly, D., Mendenhall, W. y Scheaffer, R. (2008). Linear models and estimation by least squares. En *Mathematical statistics with applications* (pp. 563-639). Thomson Books/cole.

Wiens, J., Seavy, N. y Jongsomjit, D. (2011) Protected areas in climate space: whats will the future bring?. *Biological Conservation*, 144(8), 2119-2125.

World Meteorological Organization (2016) Consultado el día 22 de octubre de 2016 en: http://www.wmo.int/pages/prog/www/index_en.html

