

DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.255>

Artículo



Escenarios de cambio climático (CMIP-5) para tres áreas naturales protegidas en el Eje Neovolcánico Transversal

Climate change scenarios (CMIP-5) for three protected natural areas in the Transversal Neovolcanic belt

Ulises Manzanilla Quiñones¹, Óscar Alberto Aguirre Calderón^{1*}, Javier Jiménez Pérez¹, Eduardo Javier Treviño Garza¹ y José Israel Yerena Yamalle¹

Abstract:

Due to climate change, precipitation and temperature patterns will cause significant changes in the ecosystems of the world. The tool used to simulate future climate is the Global Circulation Models (GCM), which are used to generate future climate scenarios. The objective of this study was to estimate climate scenarios for 2045-2069 for the *Pico de Orizaba* natural protected areas (ANP), *Nevado de Toluca* and *Volcán Nevado de Colima*. The monthly climatic layers at 1 km² were used for the present and future of the CRNMCM5 and GDFL_CM3 MCG with a radioactive forcing (RCP) of 4.5 (constant CO₂ emissions) and 8.5 (increasing CO₂ emissions). The layers were trimmed to the size of the ANP, and the scale was adjusted from 1 km² to 30 m. The current and future climate was estimated and the differences between the two were calculated. Various climate change scenarios were generated. Results for 2045-2069 indicate a decrease in precipitation between 18 and 52 mm for *Pico de Orizaba*, 61 to 99 mm for *Nevado de Toluca* and 27 to 38 mm for *Volcán Nevado de Colima*; increase in average annual temperature of 1.32 °C to 1.67 °C (*Pico de Orizaba*), 1.30 °C to 1.76 °C (*Nevado de Toluca*) and 0.91 °C to 1 °C (*Volcán Nevado de Colima*). Changes in temperature and precipitation could lead to more frequent forest fires, increased incidence of forest pests and reduced reload of aquifers.

Key words: Climate analysis, increase in temperature, forest ecosystems, future scenarios, GCM, GIS

Resumen:

Debido al cambio climático, los patrones de precipitación y temperatura ocasionarían cambios importantes en los ecosistemas del mundo. Los Modelos de Circulación Global (MCG) se utilizan para simular el clima a futuro y con ello se generan escenarios climáticos. El objetivo del presente trabajo consistió en estimar escenarios climáticos para 2045-2069 para las áreas naturales protegidas (ANP) Pico de Orizaba, Nevado de Toluca y Volcán Nevado de Colima. Se emplearon las capas climáticas mensuales a 1 km² para el presente y futuro de los MCG CRNMCM5 y GDFL_CM3 con un forzamiento radiactivo (RCP) 4.5 (emisiones de CO₂ constantes) y 8.5 (emisiones de CO₂ en aumento). Se recortaron las capas al tamaño de las ANP, y se ajustó la escala de 1 km² a 30 m. Se generaron diversos escenarios de cambio climático. Los resultados para el periodo 2045-2069 indican una disminución en la precipitación pluvial entre 18 y 52 mm para el Pico de Orizaba, de 61 a 99 mm para el Nevado de Toluca y de 27 a 38 mm para el Volcán Nevado de Colima; un aumento en la temperatura media anual de 1.32 °C a 1.67 °C en el Pico de Orizaba, de 1.30 °C a 1.76 °C en el Nevado de Toluca y de 0.91 °C a 1 °C en el Nevado de Colima. Los cambios en ambas variables pueden propiciar incendios forestales más frecuentes, mayor incidencia de plagas forestales y menor recarga de los mantos acuíferos.

Palabras clave: Análisis climático, aumento en temperatura, ecosistemas forestales, escenarios a futuro, MCG, SIG.

Fecha de recepción/Reception date: 20 de marzo de 2018

Fecha de aceptación/Acceptance date: 14 de septiembre de 2018

¹Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. México. Correo-e: oscar.aguirred@uanl.edu.mx

Introducción

El concepto de cambio climático describe las modificaciones en el clima atribuidos de manera directa o indirecta a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera. El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) declaró en 2013 (IPCC, 2013a) que el calentamiento global observado en la mitad del siglo pasado fue producto de las acciones antrópicas, lo que sumado a la variabilidad climática durante el periodo 1901 a 2012 evidenciaron un aumento significativo de 1 °C en la temperatura media de todo el planeta (IPCC, 2014). Por otro lado, la precipitación ha presentado comportamientos erráticos (Conafor, 2013; Conanp, 2015a). Un hecho irrefutable, es que el clima en el mundo ha cambiado y seguirá modificándose de manera radical en el futuro (Magallanes, 2016).

En los estudios de cambio climático, el recurso empleado son los Modelos de Circulación Global (MCG). Estos son una representación numérica tridimensional de la dinámica atmosférica y de la circulación global alrededor de la Tierra (Jáuregui, 2003); en ellos, se simulan procesos físicos de la atmósfera, océanos y la superficie terrestre, y constituyen una herramienta para pronosticar la respuesta del clima a futuro ante los aumentos de los gases efecto invernadero en la atmósfera (IPCC, 2013b). Al emplearse en los estudios de cambio climático, se convierten en escenarios de dicho fenómeno, los cuales son proyectados a diferentes horizontes de tiempo (futuro cercano 2015-2039, futuro medio 2045-2069 y futuro lejano 2075-2099) (Fernández *et al.*, 2015).

El aumento constante en la temperatura, la variación en precipitación y la frecuencia de eventos climáticos extremos están produciendo enormes impactos en los bosques y en el sector forestal del mundo (Moore y Allard, 2009; Sosa, 2015). En la actualidad una de las consecuencias de dichas modificaciones son los desfasamientos en la fenología de la flora, el desplazamiento de las especies, una mayor frecuencia de incendios forestales y de incidencia de plagas forestales en los bosques de coníferas, así como el aumento de la mortalidad de los árboles (Kurz *et al.*, 2008; Anderegg *et al.*, 2013).

Durante el presente siglo, los impactos del cambio climático supondrían un alto riesgo de afectación en la estructura y función de los ecosistemas terrestres y acuáticos del

mundo, a escala regional (IPCC, 2014). Se estima que debido al cambio climático la temperatura del planeta aumentaría hasta 2 °C hacia mediados del siglo XXI (Garreaud, 2011). Bajo estos escenarios, muchas de las especies serían incapaces de sobrevivir en los nuevos climas, sus hábitats se fragmentarían y el funcionamiento de los ecosistemas se transformaría (Jiménez et al., 2010; IPCC, 2014).

En México, los escenarios de cambio climático indican que las pináceas serían de los grupos más afectados por el aumento de la temperatura (Sáenz et al., 2012; Cruz-Cárdenas et al., 2016); una de las especies más susceptibles es *Abies religiosa* (Kunth) Schltl. et Cham., que podría reducir hasta 87.6 % su área de distribución para 2060 (Sáenz et al., 2012).

Todos esos cambios alterarían de diversas formas y con mucha probabilidad, la dinámica y el funcionamiento de los ecosistemas forestales en México (Moore y Allard, 2009; IPCC, 2014; Islas et al., 2015; Ibarra y Huerta, 2016).

Según la FAO (2003) por efecto del cambio climático, para 2050 alrededor de 25 % de la biodiversidad afrontaría un mayor riesgo de extinción, en especial, aquellos taxones arbóreos de coníferas que habitan los bosques templados del centro de México (Sáenz et al., 2012; Cruz-Cárdenas et al., 2016).

Las áreas naturales protegidas (ANP) son regiones terrestres y marinas con ecosistemas representativos del lugar que no han sido alterados significativamente por el hombre; están sujetas a regímenes especiales de protección, conservación y restauración; además, las actividades que pueden llevarse a cabo en ellas se establecen de acuerdo con la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (Conanp, 2018). Desafortunadamente, las ANP no están exentas de las modificaciones en el clima; de acuerdo con Villers y Trejo (1998), para 2025 los regímenes de precipitación y temperatura cambiarán en 57 % del territorio nacional. Los autores probaron dos modelos; CCC (Centro Climático Canadiense) y GDFL (Laboratorio Geofísico de Dinámica de Fluidos) con los que determinaron que solo nueve de 33 ANP terrestres federales evaluadas en el país, no serían impactadas por los efectos del cambio climático. Otras contribuciones (Sáenz et al., 2012; Islas et al., 2015; Cruz-Cárdenas et al., 2016) confirman el planteamiento de la FAO (2003).

En el Eje Neovolcánico Transversal existen áreas naturales protegidas de gran riqueza biológica que proporcionan recursos maderables y no maderables, brindan incalculables servicios ambientales y proveen de agua a los pobladores que habitan cerca de ellas. A pesar de sus bondades, no cuentan con estudios de escenarios de cambio climático dentro de sus programas de manejo y conservación, por lo que el objetivo principal de este estudio fue estimar tales escenarios a futuro medio (2045-2069) para las áreas naturales protegidas Pico de Orizaba, Nevado de Toluca y Volcán Nevado de Colima. De manera específica, se estimó el clima actual y futuro y se generaron escenarios climáticos.

Materiales y Métodos

Área de estudio

Los tres sitios analizados son áreas naturales protegidas federales y se ubican dentro del Eje Neovolcánico Transversal (Figura 1).

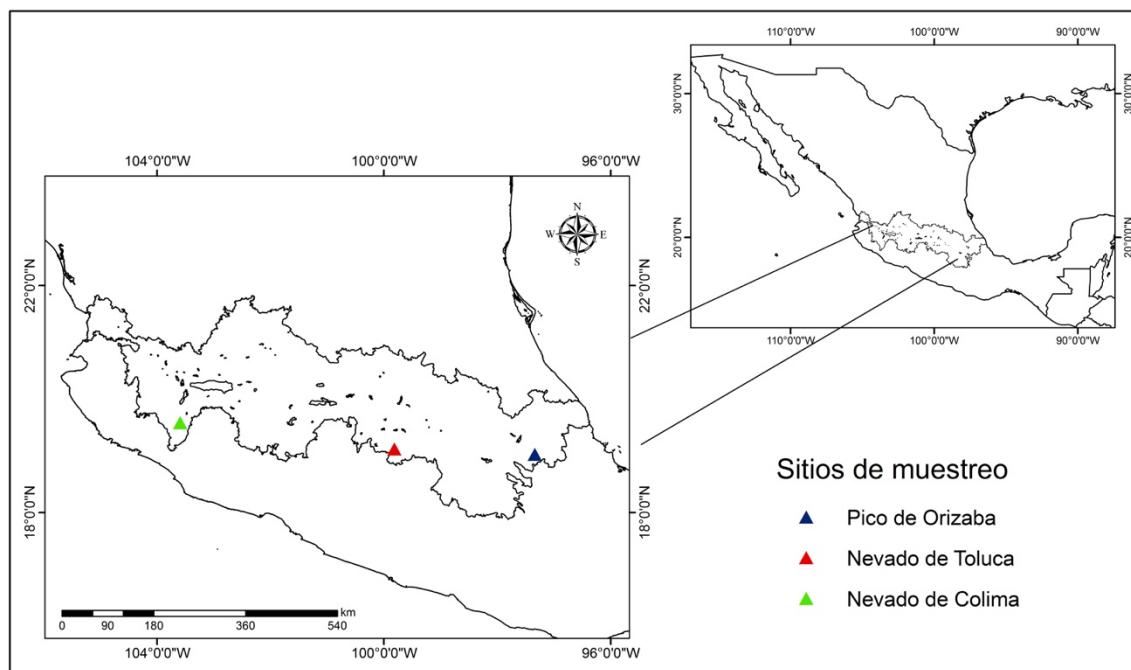


Figura 1. Ubicación geográfica de los sitios de estudio.

Sitios de estudio

Parque Nacional Pico de Orizaba

Se localiza entre los 18°56'30" y 19°09'30" latitud norte y 97°12'30" y 97°22'30" oeste, en los estados de Puebla y Veracruz y abarca un área de 19 750 ha (Conanp, 2015b).

Los climas prevalecientes corresponden a C(w₁) templado, subhúmedo con una temperatura media anual alrededor de los 12 °C; Cb'(w₂) semifrío, subhúmedo con una temperatura media anual de 5 y 12 °C; E(T)CHw frío, con una temperatura media anual entre -2 y 5 °C. EFHw muy frío, temperatura media anual menor a -2 °C (García, 1998).

Los tipos de vegetación en el lugar corresponden a bosque de pino, bosque de oyamel, pastizales inducidos, pradera alta de montaña, agricultura de temporal y vegetación secundaria arbustiva y arbórea de bosque de pino (INEGI, 2013).

Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca

Sus coordenadas geográficas son 18°51'31" y 19°19'03" norte y 99°38'54" y 100°09'30" oeste, se localiza en el Estado de México y cubre una superficie de 53 590.7 ha (Conanp, 2016).

Los climas prevalecientes son: Cb'(w₂) semifrío, subhúmedo con una temperatura media anual entre 5 y 12 °C; E(T)CHw frío, con una temperatura media anual entre -2 y 5 °C; C(w₁) templado, subhúmedo con una temperatura media anual entre los 12 °C; y C(w₂) templado, subhúmedo con una temperatura media anual de 12 a 18 °C (García, 1998).

Los tipos de vegetación están representados por formas arbóreas secundarias de bosque de pino y oyamel, arbustivas de los bosques de encino, oyamel y pino, pastizales inducidos, pradera alta de montaña, bosques de oyamel, encino, pino, pino-encino, encino-pino y agricultura de temporal (INEGI, 2013).

Parque Nacional Volcán Nevado de Colima

Sus coordenadas geográficas son 19°27'15" y 19°35'09" latitud norte y 103°34'38" y 103°39'04" longitud oeste, se ubica en los estados de Jalisco y Colima y tiene un área de 6 555 ha (Conanp, 2006).

Los climas corresponden a los tipos Cb'(w₂) semifrío, subhúmedo con una temperatura media anual entre 5 y 12 °C; E(T)CHw frío, con una temperatura media anual entre -2 y 5 °C; y C(w₂) templado, subhúmedo con una temperatura media anual entre 12 y 18 °C (García, 1998).

De acuerdo a INEGI (2013), la vegetación en el área está conformada, principalmente, por pradera alta de montaña, por bosques de oyamel, de pino, pino-encino y en menor proporción, por bosque mesófilo de montaña.

Obtención de capas climáticas actuales

Se obtuvieron las capas climáticas mensuales actuales para precipitación y temperatura media en <http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/kml/> (CCA, 2016), las cuales representan el comportamiento climático histórico promedio de 1902-2011 y tienen una resolución espacial de 1 km² para toda la república mexicana. Se recortaron las capas al tamaño de las áreas naturales protegidas (ANP).

Modelos de Circulación Global (MCG)

Se descargaron las capas climáticas mensuales de los MCG CRNMCM5 (Centro Nacional de Investigaciones Meteorológicas de Francia) y GDFL_CM3 (Laboratorio Geofísico de Dinámica de Fluidos de la NOAA, E.U.A.), los cuales fueron generados a partir de Modelos Regionales del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5, 2013) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) proyectados para el horizonte 2045-2069, con dos forzamiento radiactivos (RCP) de 4.5 (emisiones de CO₂ constantes) y 8.5 (emisiones de CO₂ altas) para precipitación y temperatura media a una escala espacial de 1 km² para la república

mexicana (Fernández *et al.*, 2015) en http://atlasclimatico.unam.mx/AECC_descargas/. Las capas climáticas se recortaron al tamaño de las ANP.

Reducción de escala

Se reajustó la resolución espacial de 1 km² a una escala espacial de 30 m (1 segundo arco) por medio de una interpolación bilineal.

Clima actual y futuro

Los climas actual y futuro se obtuvieron a partir de la suma de las 12 capas mensuales de precipitación y el promedio de las 12 capas de temperatura media para los períodos presente y futuro, respectivamente.

Escenarios de cambio climático

Los escenarios de cambio climático se estimaron a partir de la diferencia entre las capas climáticas actuales y futuras de los modelos CRNMCM5 y GDFL_CM3 con dos forzamientos radiactivos RCP 4.5 y 8.5 proyectados a 2045-2069. Los escenarios con forzamiento radiactivo RCP 4.5 se clasifican como escenarios “conservadores”, y los escenarios con forzamiento radiactivo RCP 8.5 como “extremos” (Fernández *et al.*, 2015).

Todos los procesos descritos anteriormente se llevaron a cabo con ayuda del módulo álgebra de mapas del programa Arcmap 10.3® (ESRI, 2014).

Resultados y Discusión

Clima actual

Los resultados del promedio histórico 1902-2011 del clima actual se presentan en el Cuadro 1, donde se describen los valores para precipitación anual y temperatura media anual.

Cuadro 1. Precipitación y temperatura media de las ANP.

ANP	Precipitación anual (mm)		Temperatura media anual (°C)	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
Pico de Orizaba	1 059	2 418	-1.86	10.91
Nevado de Toluca	882	1 300	4.14	12.23
Volcán Nevado de Colima	938	1 418	6.37	16.23

Clima futuro 2045-2069

En el Cuadro 2 se describen los registros obtenidos para precipitación y temperatura media anual de las proyecciones RCP 4.5 y 8.5 a 2045-2069 para las tres ANP.

Cuadro 2. Precipitación y temperatura media de las tres ANP evaluadas para 2045-2069.

ANP	Variable analizada	Modelo CRNMCM5		Modelo GDFL_CM3	
		RCP 4.5		RCP 8.5	
		Mínima-Máxima	Mínima-Máxima	Mínima-Máxima	Mínima-Máxima
Pico de Orizaba	PPT (mm)	990 a 2 328	1 044 a 2 382	1020 a 2358	1 000 a 2 338
	TMED (°C)	-0.20 a 12.44	0.90 a 13.58	0.29 a 12.95	1.60 a 14.31
Nevado de Toluca	PPT (mm)	813 a 1 241	812 a 1 240	810 a 1238	788 a 1212
	TMED (°C)	5.63 a 13.65	6.94 a 14.97	6.21 a 14.23	7.71 a 15.75
Volcán Nevado de Colima	PPT (mm)	981 a 1 429	935 a 1 413	962 a 1411	923 a 1 381
	TMED (°C)	7.36 a 17.15	8.56 a 18.37	7.89 a 17.65	9.26 a 19.04

PPT = Precipitación acumulada anual; TMED = Temperatura media anual.

Escenarios de cambio climático

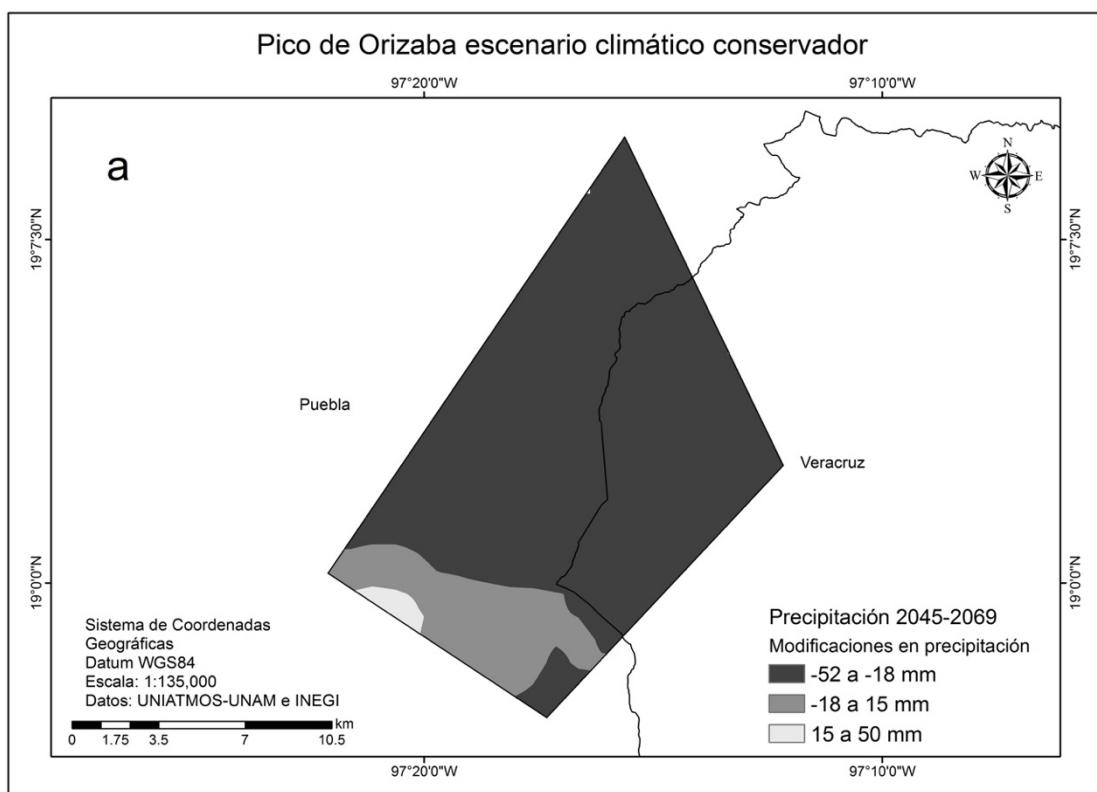
Proyecciones RCP 4.5 y 8.5 a 2045-2069

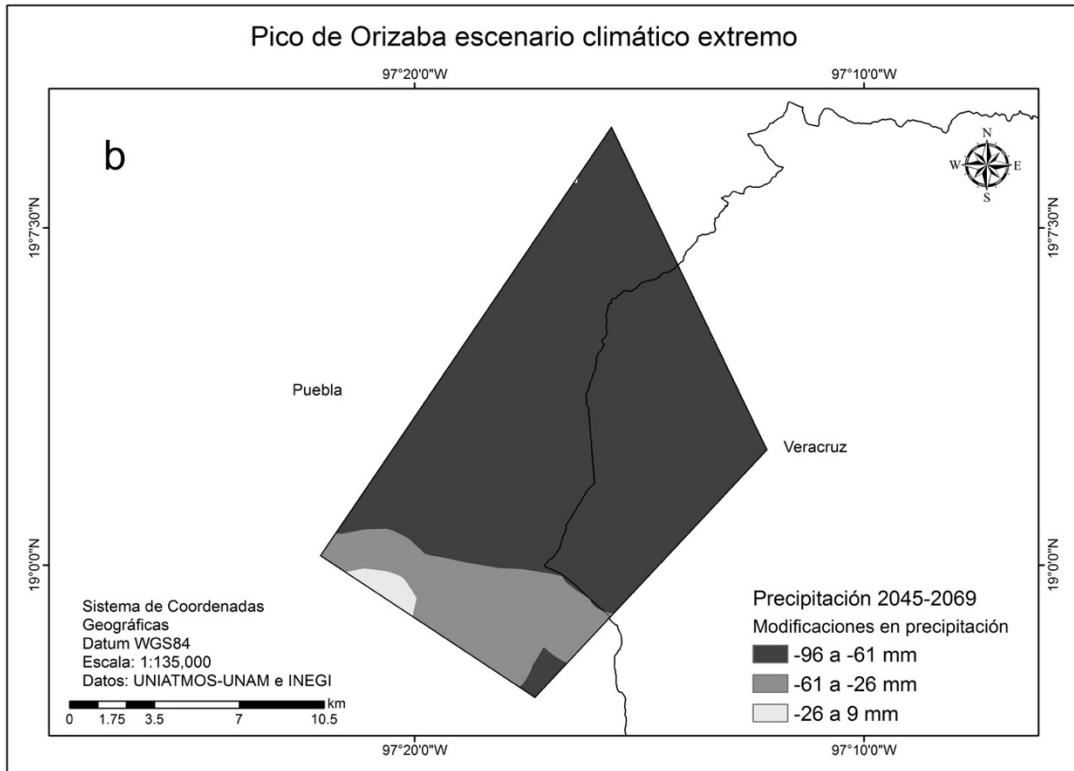
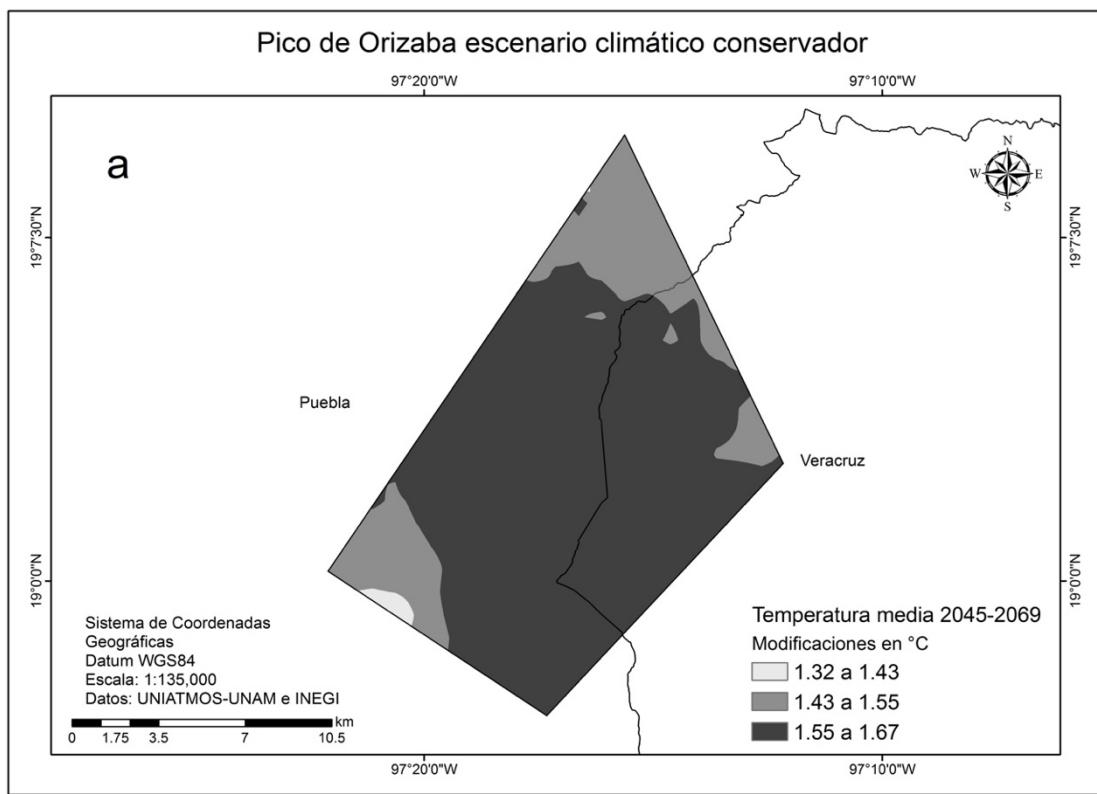
Pico de Orizaba

Los escenarios conservadores indican una disminución anual de 18 a 52 mm (2.2 %) de la precipitación (GDFL_CM3 RCP 4.5) en 85.8 % del ANP, y un aumento en temperatura media anual entre 1.55 a 1.67 °C (15.3 %) en 79 % del área para el 2045-2069 (MCG CRNMCM5 RCP 4.5).

Los escenarios extremos predicen una disminución en precipitación anual de 47 a 76 mm (3.1 %) en 91.8 % del ANP (CRNMCM5 RCP 8.5), y un incremento entre 2.07 a 2.18 °C (20 %) en temperatura media anual en 66.8 % del ANP para 2045-2069 (CRNMCM5 RCP 8.5).

La Figura 2 muestra los escenarios climáticos conservadores (a) y extremos (b) para precipitación y temperatura media para el Pico de Orizaba.





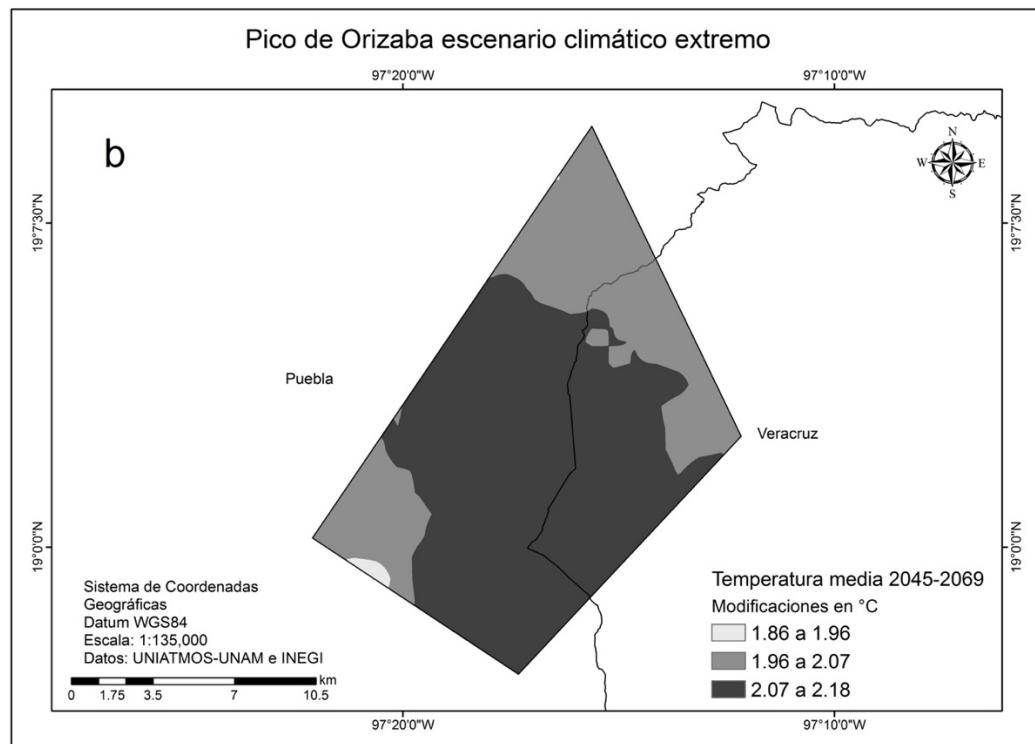


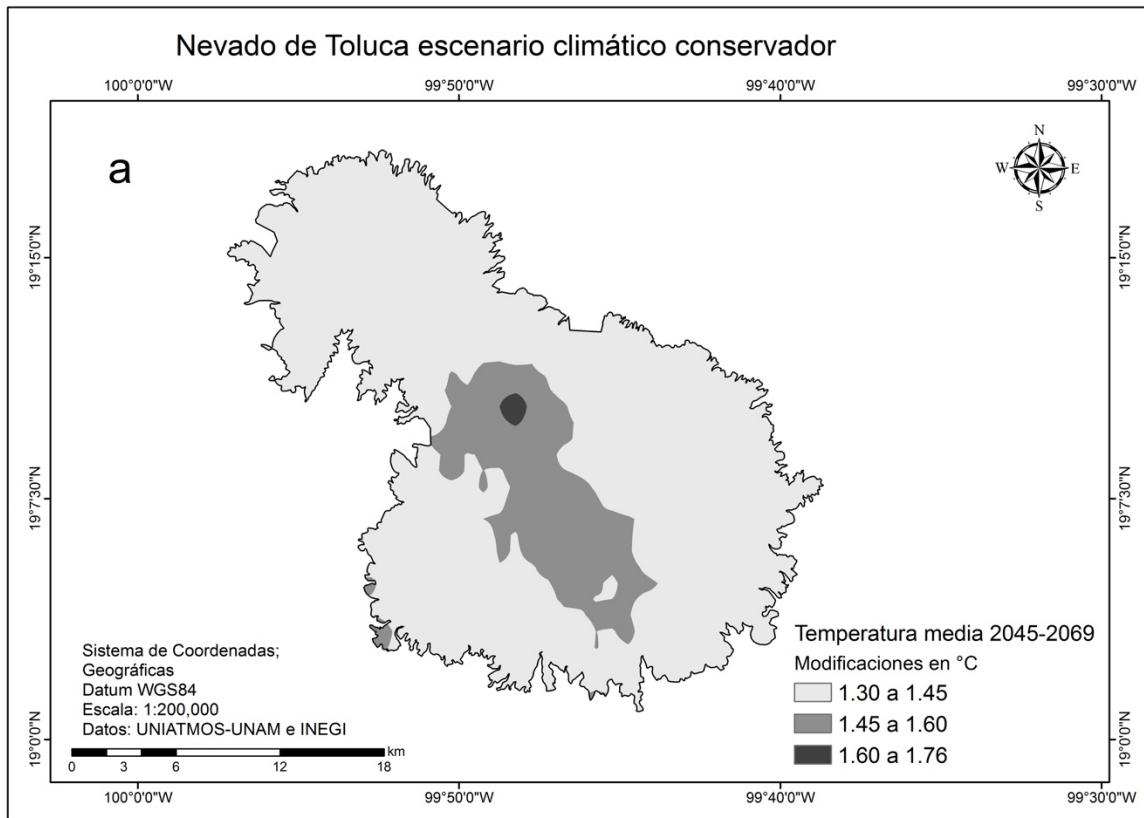
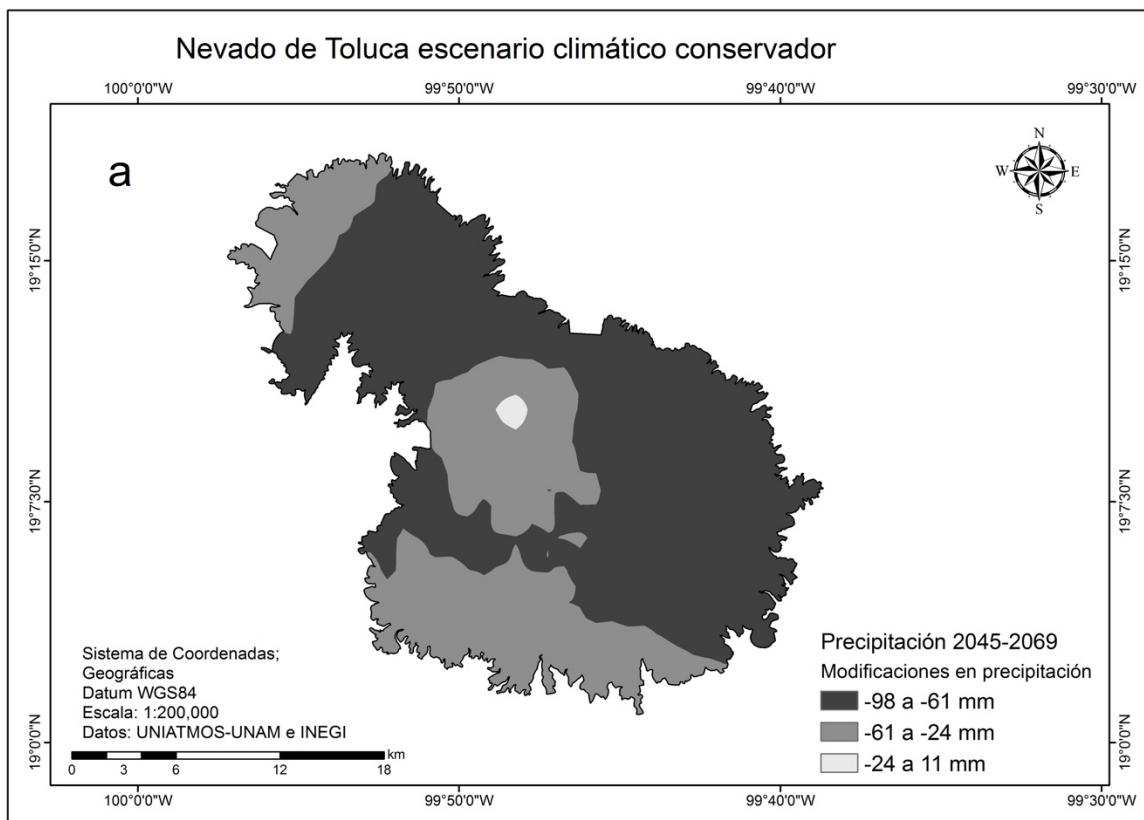
Figura 2. Escenarios climáticos conservadores (a) y extremos (b) para precipitación y temperatura media del Pico de Orizaba.

Nevado de Toluca

Los escenarios climáticos indican una disminución anual entre 61 a 98 mm (7.5 %) en precipitación (MCG CRNMCM5 RCP 4.5) en 63.9 % del ANP y un aumento de 1.30 a 1.45 °C (11.9 %) en temperatura media anual en 83.6 % del área para el 2045-2069 (MCG CRNMCM5 RCP 4.5).

Los escenarios extremos predicen una disminución en precipitación anual entre 64 y 102 mm (7.9 %) en 56.4 del ANP (CRNMCM5 RCP 8.5), y un incremento en temperatura media anual de 1.87 a 2.03 °C (16.6 %) en 78.9 % del área para 2045-2069 (MCG CRNMCM5 RCP 8.5).

La Figura 3 se exhiben los escenarios climáticos conservadores (a) y extremos (b) para precipitación y temperatura media para el Nevado de Toluca.



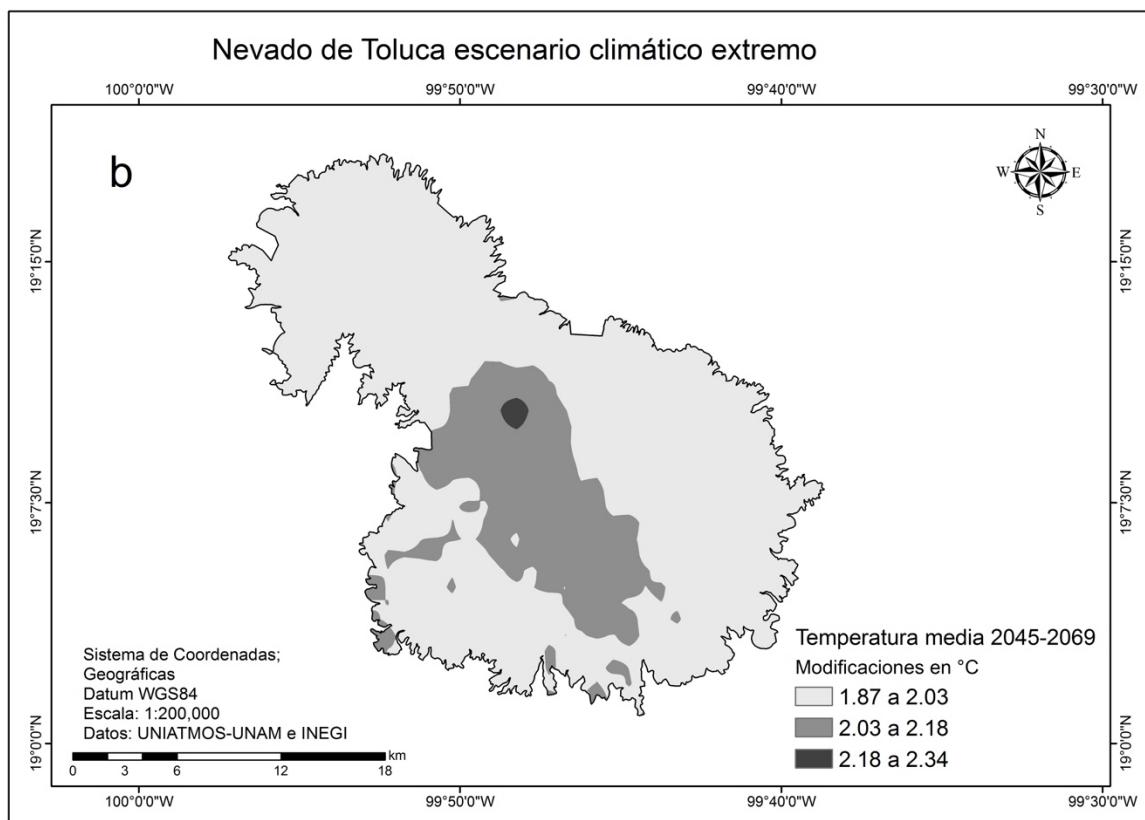
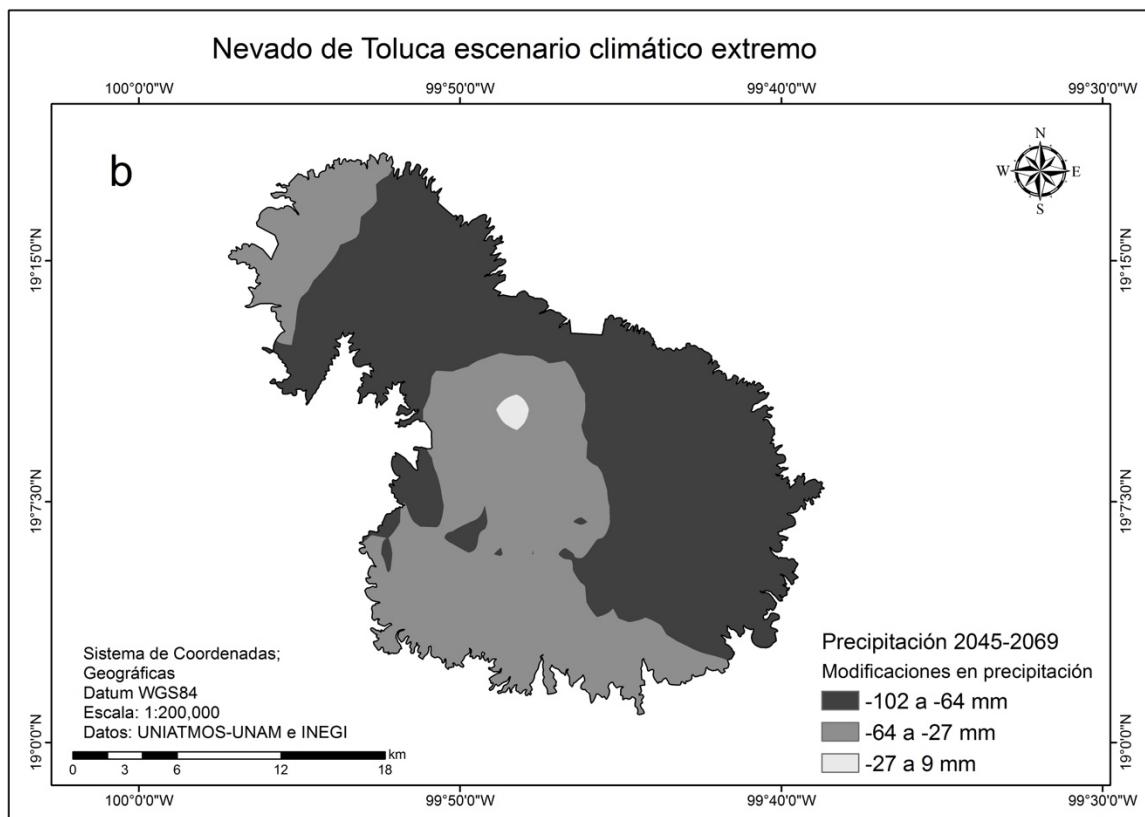


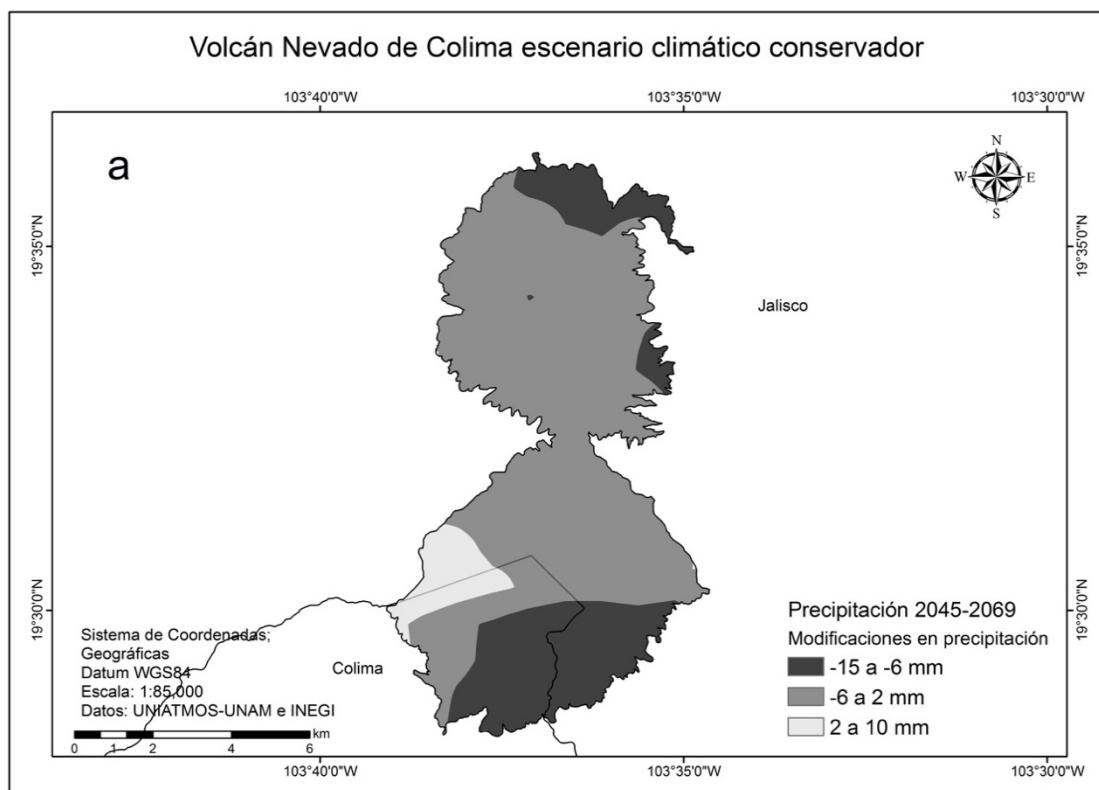
Figura 3. Escenarios climáticos conservadores (a) y extremos (b) para precipitación y temperatura media del Nevado de Toluca.

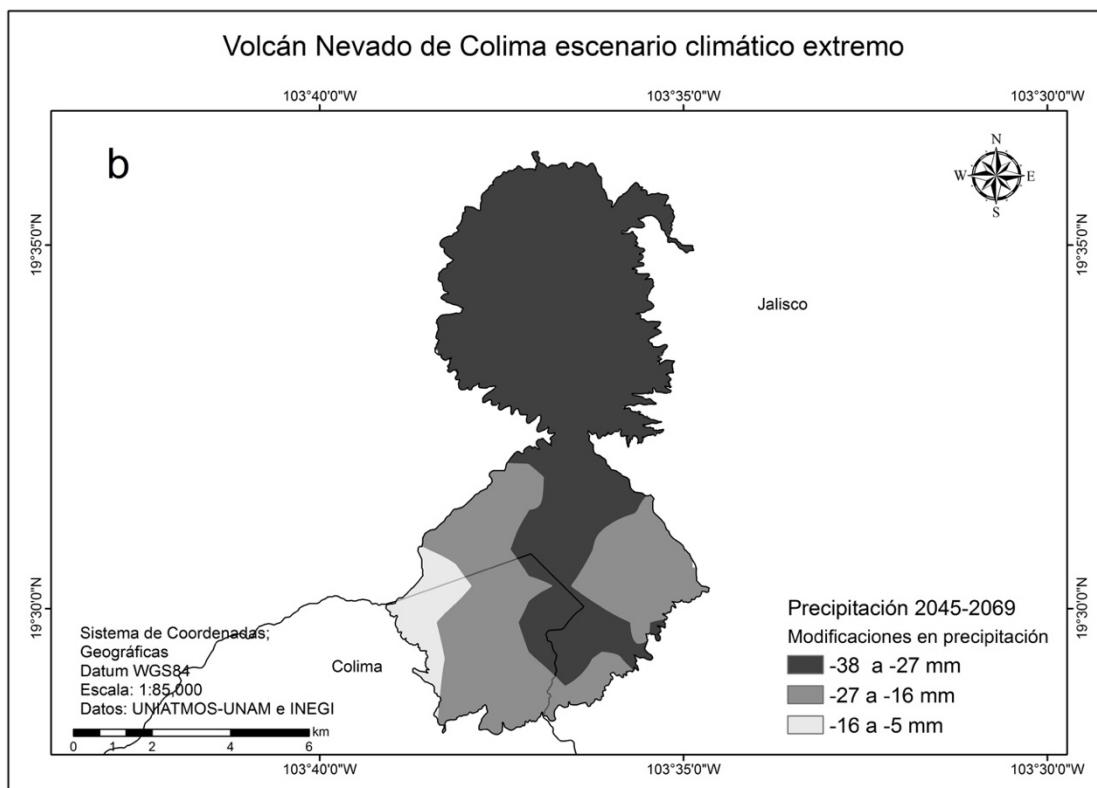
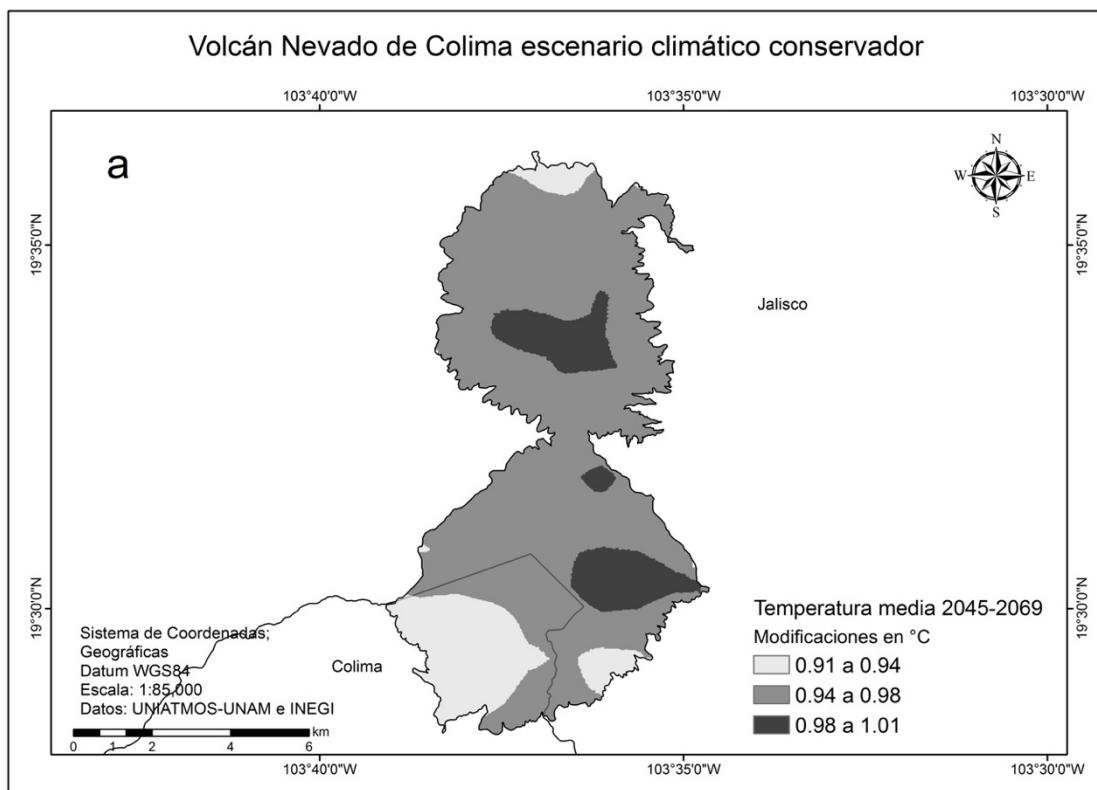
Volcán Nevado de Colima

Los escenarios climáticos evidencian una disminución anual entre 6 y 15 mm (1.1 %) en precipitación (GDFL_CM3 RCP 4.5) en 89 % del ANP, y un aumento de 0.95 a 0.98 °C (6 %) en temperatura media anual en 70 % del área para el 2045-2069 (MCG CRNMC5 RCP 4.5).

Los escenarios extremos predicen una disminución en precipitación anual entre 27 y 38 mm (2.7 %) en 60 % del ANP (GDFL_CM3 RCP 8.5), y un incremento en temperatura media anual de 1.49 a 1.53 °C (9.4 %) en 63 % del área para 2045-2069 (MCG CRNMC5 RCP 8.5).

En la Figura 4 se observan los escenarios climáticos conservadores (a) y extremos (b) para precipitación y temperatura media para el Volcán Nevado de Colima.





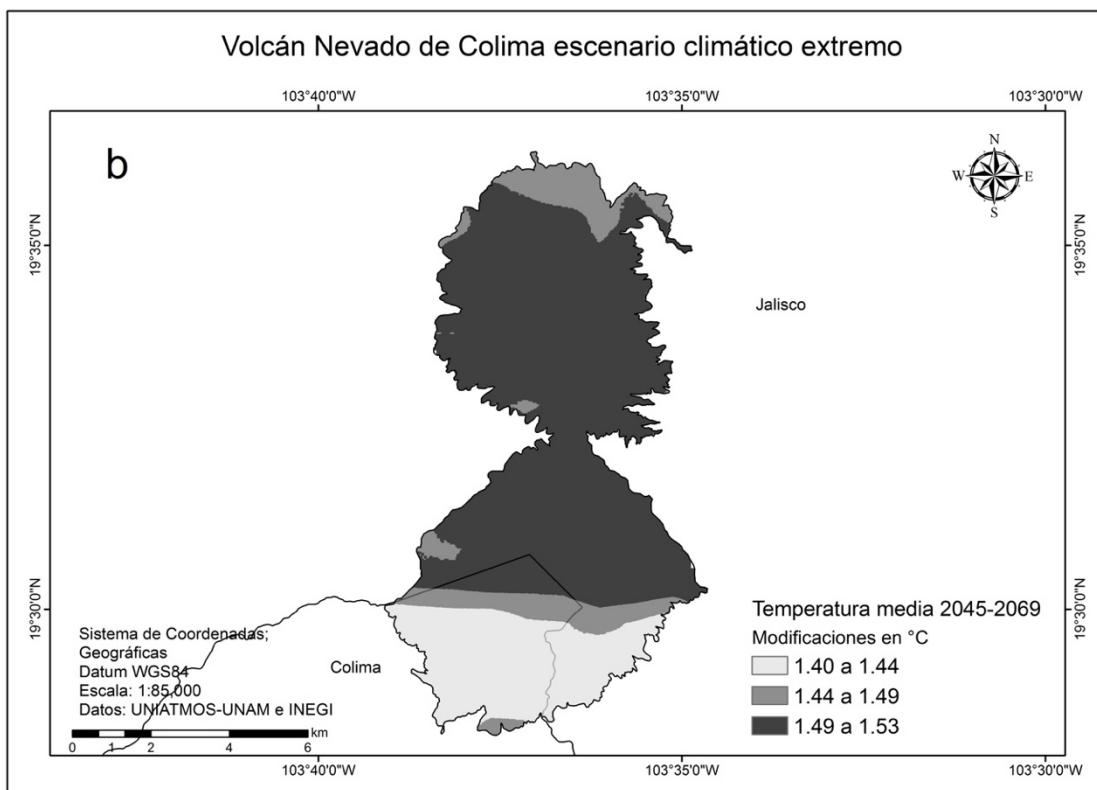


Figura 4. Escenarios climáticos conservadores (a) y extremos (b) para precipitación y temperatura media del Volcán Nevado de Colima.

Entre las principales consecuencias del cambio climático se pueden citar el aumento en la temperatura y un comportamiento errático en la precipitación como aumento, disminución o desplazamiento de la lluvia a otras regiones geográficas (Conafor, 2013; Conanp, 2015a).

Las proyecciones para precipitación a futuro del Programa Especial de Cambio Climático de la Semarnat (PECC, 2014) sugieren una disminución promedio en el país de alrededor de 10 % para 2030. Sáenz *et al.* (2010) pronostican una reducción promedio de 9 % en la precipitación de 2060; Sosa (2015) prevé una disminución promedio de hasta 20 %, a partir de 2020 para México.

Los resultados de los escenarios para precipitación acumulada anual pronostican una disminución de 3.1% para el Pico de Orizaba, 7.9 % para el Nevado de Toluca y 2.7 % para el Volcán Nevado de Colima para 2045-2069, estos resultados están dentro de los intervalos de disminución calculados por Sáenz *et al.* (2010) para ese horizonte de tiempo.

El IPCC (2014) establece que un aumento de 1 a 2 °C en la temperatura media anual representaría un daño moderado a la biodiversidad y economía de todo el mundo, mientras que si fuera >3.5 °C resultaría perjudicial para la mayoría de los ecosistemas terrestres y marinos, lo que produciría extinciones de 40 hasta 70 % de las especies del mundo (IPCC, 2007); un incremento drástico en la temperatura y una disminución notoria en la precipitación para 2050 provocaría una reducción importante de los bosques de coníferas en el territorio nacional (Sáenz *et al.*, 2012; PECC 2014).

Para México, Sáenz *et al.* (2010) y Conanp (2015a) estiman un aumento en la temperatura media anual de 0.5 a 2 °C para 2030, de 2.3 °C para 2060 y hasta de 3.7 °C para 2090. En este trabajo, el área natural protegida que sería más afectada por el aumento de la temperatura media anual es el Nevado de Toluca, donde aumentaría entre 1.30 y 1.45 °C en 83.6 % del ANP (escenario conservador) y hasta 1.87 a 2.03 °C en 16.6 % del ANP (escenario extremo) para 2045-2069, valores ligeramente inferiores a los de Sáenz *et al.* (2010).

Villers y Trejo (1998) y Sáenz *et al.* (2012) prevén que los bosques secos aumentarían su distribución (7.4 %), mientras que los bosques templados y fríos reducirían sus áreas de distribución entre 65 % y 87.6 %, respectivamente; además, sitios como la Reserva de la Mariposa Monarca presentaría condiciones más cálidas para 2060 (2.3 °C) (Sáenz *et al.*, 2010), condiciones climáticas similares a las que ocurrirían en el Pico de Orizaba, el Nevado de Toluca y el Volcán Nevado de Colima.

Manzanilla y Aguirre (2017) estimaron, para escenarios conservadores, un aumento en la temperatura media anual entre 0.41 y 0.83 °C (100 %) y una disminución en la precipitación anual de 71 a 35 mm (88 %) para la Reserva de la Biosfera Selva El Ocote, Chiapas para 2030. En el presente trabajo, los escenarios conservadores para 2045-2069 señalan al Volcán Nevado de Colima como el sitio menos afectado por el cambio climático; la precipitación anual disminuiría entre 6 y 15 mm (1.1 %) y la temperatura media anual aumentaría entre 0.95 y 0.98 °C (6 %), por lo que las áreas ubicadas en las montañas (Nevado de Toluca) tendrían un mayor aumento en la

temperatura media anual, en comparación con zonas tropicales como la Reserva antes citada.

Por último, el aumento en la temperatura media anual afectaría 49 % de la superficie (bosque de pino) del Pico de Orizaba, 24% de la superficie (bosque de *Abies religiosa*) del Nevado de Toluca y 42.2% de la superficie (Pradera Alta de Montaña) del Volcán Nevado de Colima. El ecosistema más vulnerable a estos cambios en el clima sería el bosque de *A. religiosa* del Nevado de Toluca, cuyos escenarios climáticos a futuro no son alentadores para la especie en México (Sáenz et al., 2012).

Ante tales anomalías, los ecosistemas en las tres ANP analizadas tendrían dos opciones: ajustarse a las nuevas condiciones climáticas, lo cual involucraría resistir estrés hídrico, ataques de plagas e incendios forestales; o migrar de forma altitudinal como lo indican Sáenz et al. (2010), cuando, por cada 0.5 °C de aumento, las especies tendrían que desplazarse 100 m. Los bosques de *A. religiosa* existentes en el Nevado de Toluca tendrían que desplazarse en ese sentido de 150 m (1.3 °C) hasta 250 m (2.34 °C) para subsistir durante el periodo 2045-2069.

Conclusiones

El clima del planeta ha cambiado y sigue en constante transformación, alteraciones que modificarían la cobertura de muchos ecosistemas del mundo incluidas las áreas naturales protegidas de México.

Los escenarios de cambio climático no se deben tomar como simples pronósticos, sino como posibles comportamientos del clima a futuro.

De las tres ANP analizadas, los modelos destacan al Nevado de Toluca como el sitio que sería más afectado por el cambio climático, en particular, el bosque de *A. religiosa*.

Debido a la disminución en precipitación anual la recarga de los mantos acuíferos sería cada vez menor en las áreas naturales protegidas. El aumento en temperatura media anual reduciría la superficie del glaciar Jamapa en el Pico de Orizaba, por lo que es muy probable que para 2050, el glaciar haya casi desaparecido por completo.

Es importante hacer mención que los resultados de este trabajo son convincentes más no concluyentes; se recomienda utilizar más Modelos de Circulación Global con diferentes forzamientos radiactivos (RCP) para estimar la variabilidad climática futura de la región geográfica de interés.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por el apoyo brindado para la ejecución del estudio descrito. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el apoyo de beca de posgrado al primer autor. A los revisores anónimos por sus comentarios y sugerencias, los cuales ayudaron a mejorar el contenido del presente trabajo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Ulises Manzanilla Quiñones: descarga y estimación de escenarios climáticos, escritura y estructura del manuscrito; Óscar Alberto Aguirre Calderón, Javier Jiménez Pérez, Eduardo Javier Treviño Garza y José Israel Yerena Yamallel: revisión del manuscrito.



Referencias

- Anderegg, W. R. L., J. M. Kane and L. D. L. Anderegg. 2013. Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress. *Nature Climate Change* 3:0-36.
- Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA). 2016 Bases de datos y metadatos. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México. <http://atlasclimatico.unam.mx/atlas/kml/> (15 de noviembre de 2017).
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp). 2006. Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Volcán Nevado de Colima. México, D. F., México. 194 p.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp). 2015a. Estrategia de cambio climático desde las Áreas Naturales Protegidas: Una Convocatoria para la Resiliencia de México (2015-2020). 1^a. edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F., México. 62 p.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp). 2015b. Programa de Manejo Parque Nacional Pico de Orizaba. 1^a. edición. México, D. F., México. 187 p.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp). 2016. Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. 1^a. Edición. Ciudad de México, México. 203 p.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp). 2018. Áreas Naturales Protegidas Decretadas. <https://www.gob.mx/conanp/acciones-y-programas/areas-naturales-protegidas-decretadas> (3 de junio de 2018).
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2013. Bosques, cambio climático y REDD+ en México. Guía básica. 2^a edición. Zapopan, Jal., México. pp 15-17.

- Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5). 2013. Coupled Model Intercomparison Project Phase 5. <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/> (3 de junio de 2018).
- Cruz-Cárdenas, G., L. López-Mata, J. T. Silva, N. Bernal-Santana, F. Estrada-Godoy and J. A. López-Sandoval. 2016. Potential distribution model of *Pinaceae* species under climate change scenarios in Michoacán. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 2:135-148.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2014. ArcGis Desktop: 10.3. Software diseñado para análisis espacial y Sistemas de Información Geográfica. Redlands, CA USA. s/p.
- Fernández E., A., J. Zavala H., R. Romero C., A. C. Conde Á. y R. I. Trejo Vázquez. 2015. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México, D. F., México. 22 p.
- García, E. 1998. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). Climas (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México, D. F. México. s/p.
- Garreaud, D. R. 2011. Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile. Revista Tierra Adentro, 93(2):1-14.
- Ibarra M., J. L. y F. M. Huerta M. 2016. Cambio climático y predicción de incendios al 2050 en el Bosque La Primavera, Jalisco. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 7(37):39-50. doi.org/10.29298/rmcf.v7i37.50.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). 2013. Uso de suelo y vegetación. Escala 1:250 000 serie V (capa unión). México, D. F., México. s/p.
- Islas B., A., R. Pérez M., A. González H., M. E. Romero S. y E. Velasco B. 2015. Riesgo del hábitat de la Mariposa Monarca (*Danaus plexippus*) ante escenarios de cambio climático. Revista Ximhai 11(5):49-59.

Jáuregui, O. E. 2003. Algunos conceptos modernos sobre la circulación general de la atmósfera. *Investigaciones Geográficas* 50: 121-143.

Jiménez, M., A. Chain y B. Locatelli. 2010. Efectos del cambio climático en la distribución de zonas de vida en Centroamérica. *Comunicación Técnica en Recursos Naturales y Ambiente* (59):32-40.

Kurz, W. A., C. C. Dymond, G. Stinson, G. J. Rampley, E. T. Neilson, A. L. Carroll, T. Ebata and L. Safranyik. 2008. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature* 452:987-990.

Magallanes, P. J. 2016. Cambio climático: evaluación de medidas de adaptación. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Mor., México. 73 p.

Manzanilla Q., U. y O. A. Aguirre C. 2017. Zonificación climática actual y escenarios de cambio climático para la Reserva de la Biosfera Selva el Ocote en Chiapas, México. In: Ruíz M., L., G. Álvarez G., N. Ramírez Ma. y B. Cruz S. (eds.).

Vulnerabilidad social y biológica ante el cambio climático en la Reserva de la Biosfera Selva El Ocote. San Cristóbal de las Casas, Chis., México. pp. 25-66.

Moore, B y G. Allard. 2009. Impactos del cambio climático en la sanidad forestal. Departamento Forestal. FAO. Roma, Italia. 42 p.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO). 2003. La fauna silvestre en un clima cambiante. Estudios FAO: Montes 167. Roma, Italia. 114 p.

Panel Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC). 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. In: Pachauri, R., K. y A., Reisinger, (eds.). Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland. 104 p.

Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). 2013a. Quinto informe de evaluación del Cambio Climático.

https://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/ar5/ar5_wg1_headlines_es.pdf (9 de noviembre de 2017).

Panel Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC). 2013b. Resumen para responsables de políticas. In: Stocker, T. F., D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.). Cambio climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al V Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático. Climate Change 2013. The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the 5th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland. 27 p.

Panel Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC). 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de Trabajo II al 5º. In: Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea y L. L. White (eds.). Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Ginebra, Suiza. 34 p.

Programa Especial de Cambio Climático (PECC). 2014. PECC. 2014-2018. Versión de Difusión. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Subsecretaría de Planeación y Política Ambiental Dirección General de Políticas para el Cambio Climático .México, D. F., México. 91 p.

Sáenz R., C., G. E. Rehfeldt, N. L. Crookston, D. Pierre, R. St. Amant, J. Beaulieu and B. Richardson. 2010. Contemporary and projected Spline Climate surfaces for Mexico and their use in understanding climate plant relationships. Climatic Change 102: 595-623.

Sáenz R., C., G. E. Rehfeldt, P. Duval and R. A. Linding C. 2012. *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for Monarch butterfly conservation in Mexico. Forest Ecology and Management 275:98-106.

Sosa R., F. S. 2015. Política del cambio climático en México: avances, obstáculos y retos. Revista Internacional de Estadística y Geografía 6(2):4-23.

Villers R., L. y R. I. Trejo V. 1998. Climate change on Mexican forests and natural protected areas. Global Environmental Change 8(2):141-157.