

# **P**royecciones de hábitat climático para biomas de Michoacán, en escenarios de cambio climático

*Cuauhtémoc Sáenz-Romero<sup>1\*</sup>, Juan Felipe Charre-Medellín<sup>2,3</sup>, Tiberio Monterrubio-Rico<sup>2</sup>, Margarito Alvarez-Jara<sup>2</sup> y Nicholas L. Crookston<sup>4</sup>*

1 Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales, UMSNH; 2 Facultad de Biología, UMSNH; 3 Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM Morelia; 4 Rocky Mountain Research Station, USDA Forest Service, Forestry Sciences Laboratory, Moscow, Idaho, USA.

## **Resumen**

Se analiza la distribución de hábitat climático propicio para biomas del estado de Michoacán, México, modelados en un trabajo previo usando modelos climáticos “spline” y Random Forests del programa R, bajo clima contemporáneo (1961–1990) y las décadas centradas en los años 2030, 2060 y 2090, usando seis modelos-escenarios de cambio climático. Los resultados consensando las diversas y contrastantes proyecciones de los seis modelos-escenarios, indican que para el año 2030, podría ocurrir una reducción del área ocupada por el hábitat climático propicio para el bosque de coníferas (-71%) y para el bosque de encino (-33%); el de pino-encino se contrae moderadamente (-17%), ya que ocupa las áreas dejadas por el del bosque de coníferas. En contraste, el hábitat propicio para tipos de vegetación de clima cálido o semiárido se expanden: el matorral espinoso en un +29% y el pastizal semidesértico en un +53% de la superficie estatal. Otros hábitats climáticos propicios para biomas muy secos actualmente inexistentes en Michoacán (chaparral

interior, bosque seco caducifolio de Yucatán y de Sinaloa, bosque subcaducifolio de Yucatán y Tamaulipas), se establecen y se expanden a partir del año 2030. También se establece un hábitat propicio para biomas inexistentes en Norteamérica en el presente (clima sin análogo contemporáneo), hasta llegar al 5% de la superficie estatal en 2090. Se encontró disparidad entre las proyecciones de los modelos-escenarios, misma que se incrementa substancialmente para fin de siglo, haciendo difícil tomar decisiones de manejo para escenarios más allá del año 2030.

**Palabras clave:** Hábitat climático propicio; bioma, cambio climático; Michoacán.

## **Abstract**

The distribution of suitable climate habitat for biomes for the state of Michoacan, Mexico, are analyzed. The habitats were previously modeled using spline climate models and Random Forests of the R program, under contemporary climate (1961-1990) and decades centered in the years 2030, 2060 and 2090, using six climate change models-scenarios. The resulting consensus among the diverse and contrasting model-scenario projections indicate that by the year 2030, it might occur a reduction of the area occupied by suitable climate habitat for coniferous forest (-71%) and oak forest (-33%), the pine-oak reduces moderately (-17%), occupying the areas left by coniferous forest. In contrast, the habitat for warm or semi-warm vegetation types expands: the thornscrub by +29% (2030) and the semiarid grassland increases +53% of the state area. Other habitats suitable for dry biomes currently nonexistent in Michoacán (interior chaparral, Yucatan and Sinaloa dry deciduous forest of Yucatán and Tamaulipas semi-deciduous forest), are established and expanded from 2030. A favorable habitat for biomes no existing in the present in Northamerica (climate without contemporary analog) reaches 5 % of the state area in 2090. The disparity among model-scenario projections increases substantially by the end of the century, making difficult management decisions for scenarios beyond 2030.

**Key words:** Suitable climatic habitat, biome, climatic change, Michoacán.

## **Introducción**

La predicción de los impactos potenciales del cambio climático en la vegetación natural, es un tema de la mayor importancia, por sus implicaciones para el manejo sustentable de los recursos naturales renovables y la conservación de la inmensa

biodiversidad de México. El incremento de la temperatura media anual proyectado para Michoacán de 1.4 °C para la década centrada en el año 2030, 2.2 °C para el año 2060 y en 3.6 °C para el año 2090 (en comparación a la media de los años 1961-1990 y promediando seis modelos-escenarios de cambio climático), combinado con una disminución de la precipitación total anual de 5.5% para el año 2030, 5.9% para el 2060 y 7.8% para el 2090, tendrá como consecuencia un incremento de la aridez del clima de Michoacán (Sáenz-Romero *et al.* 2012<sup>a</sup>).

Si bien las proyecciones para el año 2030 difieren muy poco (0.5 °C) entre el modelo-escenario más pesimista (Hadley A2) y el más optimista (GFD B1), para el año 2090 las diferencias entre modelos-escenarios son muy grandes, del orden de 2.6 °C entre ambas proyecciones. La diferencia se debe principalmente a la cantidad de bióxido de carbono que cada escenario de emisiones supone se emitirá para fin de siglo (Hansen 2009). Para el año 2090, la proyección de disminución de precipitación para Michoacán varía entre 1.0% para el GFD B1 y 24.2% para el Canadiense A2.

El cambio climático proyectado, de concretarse, podrían crear un desacoplamiento (desfasamiento) entre los ecosistemas de Michoacán, que clasificados por tipo de vegetación se llaman biomas y el clima para el cual están adaptados (Sáenz-Romero *et al.* 2012<sup>a</sup>). En otras palabras, el clima al cual los biomas se han adaptado a través de un largo proceso evolutivo podría ocurrir en un lugar diferente a los sitios en los que actualmente se distribuyen geográficamente los biomas de Michoacán; en algunos casos, el clima propicio eventualmente podría desaparecer (Rehfeldt *et al.* 2012).

Las plantas cuentan con mecanismos de adaptación para resistir el estrés causado por temporadas de sequía o períodos de temperatura extremas (Allen *et al.* 2015). Sin embargo, esa capacidad adaptativa tiene un límite y puede no ser suficiente para adaptarse a estrés muy severo o prolongado (Mátyás *et al.* 2010, Williams *et al.* 2013, Alfaro *et al.* 2014, McDowell y Allen *et al.* 2015). Los árboles estresados son más susceptibles al ataque de insectos y patógenos naturales, ya que las defensas requieren una elevada inversión de fotosintatos (Fettig *et al.* 2013). Todas las poblaciones forestales conviven con poblaciones de insectos y patógenos (hongos, bacterias y virus dañinos) que se encuentran en su mismo hábitat de manera natural. Sin embargo, cuando los árboles están estresados, esos insectos o patógenos pueden tener mucho más éxito en sus ataques a los árboles, debilitándolos hasta llegar a matarlos, generando brotes de plagas y enfermedades inusualmente numerosos y extensos (Fettig *et al.* 2013). Desafortunadamente,

existe evidencia de que insectos y patógenos son mucho más capaces de adaptarse al incremento de temperatura que sus especies forestales hospederas, debido a la mayor capacidad de los primeros de migrar y acelerar su ciclo de vida (Sturrock *et al.* 2011).

Recientemente se han estado documentando casos de decaimiento forestal atribuible al estrés producido por el cambio climático (Allen *et al.* 2015). Esos casos frecuentemente ocurren en el límite altitudinal inferior del rango natural de distribución altitudinal de una especie, o bien, en el caso del hemisferio norte, en el límite sur de su distribución latitudinal (Jump *et al.* 2009, Allen *et al.* 2010).

En el presente trabajo, se estimó para Michoacán la distribución geográfica del clima apropiado para los biomas, también llamado hábitat climático propicio (*suitable climatic habitat*), bajo el clima contemporáneo (promedio 1961-1990) y bajo seis modelos-escenarios de cambio climático. Esto con la finalidad de tener una estimación del impacto que tendrá el cambio climático en la vegetación de Michoacán. Es importante subrayar que el hábitat climático propicio no es el bioma en sí, sino el clima al que está asociado de manera natural cada bioma.

## **Materiales y métodos**

Se analizó la distribución de los hábitats climáticos de Michoacán que corresponden a los biomas (según la clasificación de Brown *et al.* 1998), bajo el clima definido como contemporáneo (promedio 1961-1990) y se comparó con la proyección de la distribución futura (décadas centradas en los años 2030, 2060 y 2090), bajo seis modelos-escenarios: tres “pesimistas” (Hadley A2, Canadiense A2 y Geofísica de Fluidos A2), y tres “optimistas” (Hadley B2, Canadiense B1 y Geofísica de Fluidos B1). La modelación para Norteamérica (de norte de Honduras a Alaska) se completó para un trabajo previo (Rehfeldt *et al.* 2012). En el presente trabajo se revisita tal modelación, pero analizando únicamente lo referente al Estado de Michoacán, ya que en el trabajo previo mencionado tal análisis está ausente, pues la discusión se elaboró a una escala mucho más general.

Se eligió utilizar la clasificación de biomas de Brown *et al.* (1998) por haber sido desarrollada con un intensivo trabajo de campo, en donde se describió la composición florística de cada bioma con gran precisión. El detalle de la descripción de los biomas se deriva en parte a lo desagregado de la clasificación (se describe un gran número de clases de biomas), lo que permite una mejor clasificación en un país de gran biodiversidad como México, y en particular para un Estado muy

biodiverso como Michoacán. En el citado trabajo previo (Rehfeldt *et al.* 2012), se utilizaron 50 clases de biomas de la clasificación de Brown *et al.* (1998). De ellos, seis están representados en Michoacán de manera importante (con más de 40 km<sup>2</sup>; Cuadro 1).

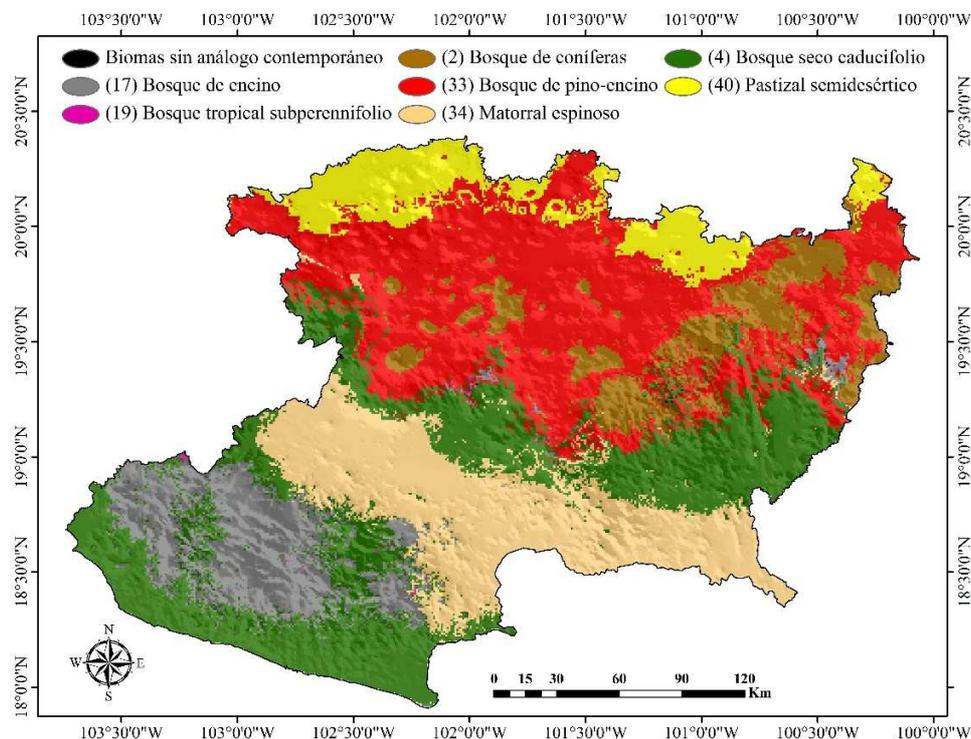
Los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero del tipo “A” asumen que el petróleo y carbón seguirán utilizándose prácticamente como hasta ahora mientras sea económicamente rentable (escenario conocido como “*business as usual*”), y los tipo “B” suponen un cambio tecnológico acelerado para sustituir el petróleo y el carbón por fuentes alternas de energía “verdes” (energía solar y eólica, entre otras) y un desarrollo tecnológico y económico cada vez menos desigual entre los países desarrollados y los menos desarrollados (conjunto de suposiciones poco probables) (IPCC 2000). Cada modelo-escenario utilizó estimaciones del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), ajustadas mediante un modelo “spline” a una escala de 1 km<sup>2</sup> (Sáenz-Romero *et al.* 2010).

Recientemente se han generado nuevos escenarios de acumulación de gases de efecto invernadero, conocidos como RCPs por su acrónimo en inglés (*Representative Concentration Pathway*). Esencialmente los modelos de emisiones de gases de efecto invernadero usados en el presente trabajo, son a grandes rasgos equivalentes a los recientes RCPs de la siguiente manera: escenarios B  $\approx$  RCP 4.5 watts/m<sup>2</sup>; escenarios A  $\approx$  RCP 8.5 watts/m<sup>2</sup> (Van-Ypersele 2010).

El análisis del área ocupada por cada bioma en cada uno de los seis modelos-escenarios, se realizó con ArcMap (versión 9.3, 2008), extrayendo la superficie correspondiente a México de los mapas generados en un trabajo previo de Rehfeldt *et al.* (2012; disponibles en <http://forest.moscowfsi.wsu.edu/climate/>), en el que se proyectó la distribución de biomas usando modelos climáticos “spline” y Random Forests del programa R. También se utilizaron los mapas de consenso, en donde cada pixel es el resultado de la mayoría de “votos” de la predicción de bioma que hace cada uno de los seis modelos-escenarios para cada pixel. En caso de empate, se toma al azar uno de los dos (Rehfeldt *et al.* 2012).

Conforme se hace más lejana la proyección en el tiempo, se incrementa la divergencia entre modelos-escenarios respecto a qué bioma se predice para cada pixel. Esta divergencia se discute ejemplificando con: (i) mapas para la década centrada en el año 2030 de dos modelos-escenarios contrastantes: (a) Canadiense A2, el más pesimista, por ser el que predice la mayor disminución en precipitación y el segundo con mayor incremento de temperatura, y (b) Geofísica de Fluidos B1,

el más optimista, por ser el que predice menor cambio en precipitación y uno de los menores incrementos en temperatura para fin de siglo (Sáenz-Romero *et al.* 2012<sup>a</sup>) y (ii) mapa que indica el número de modelos-escenarios que coinciden en la predicción mayoritaria (de entre seis modelos-escenarios) de un bioma dado para cada pixel, para la década centrada en el año 2090.



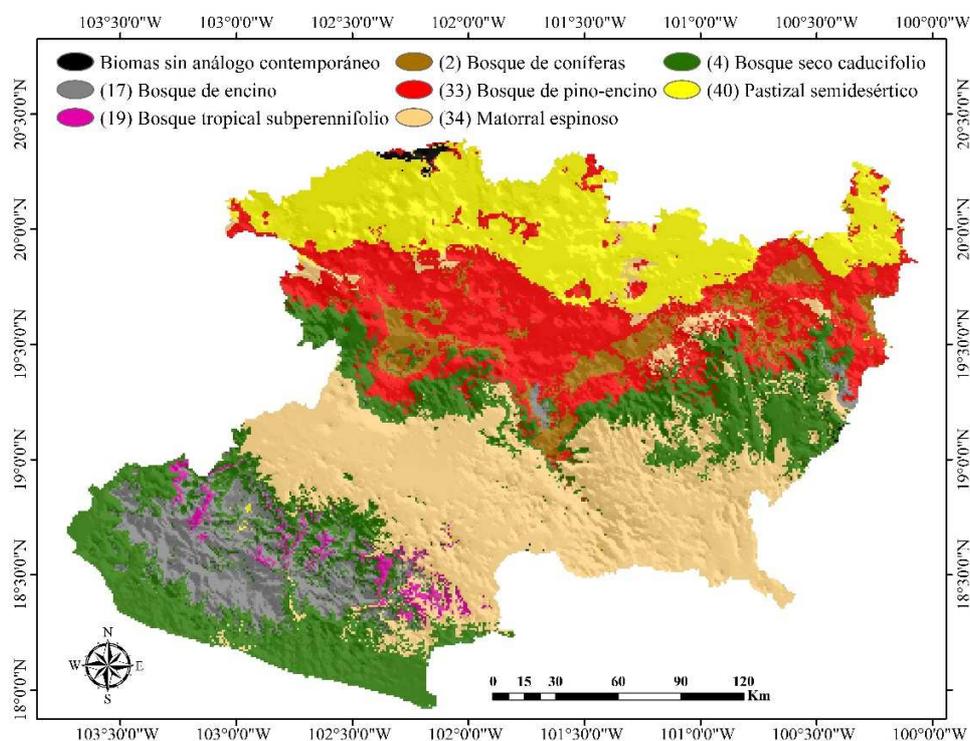
**Figura 1.** Hábitat climático propicio para los biomas de Michoacán, bajo el clima contemporáneo (promedio años 1961–1990). Mapa de consenso entre seis modelos-escenarios.

## Resultados

**Cambios en la superficie ocupada por hábitats climáticos.** En comparación con la distribución contemporánea de hábitats climáticos propicios para biomas de Michoacán (Figura 1), el cambio climático probablemente ocasionará una gran reducción del área ocupada por el hábitat climático propicio para el bosque de coníferas (se reduce en un **70.5%** para el año 2030, Cuadro 1; bioma 2, color café,

*Proyecciones de hábitat climático para biomas de Michoacán, en escenarios de cambio climático*

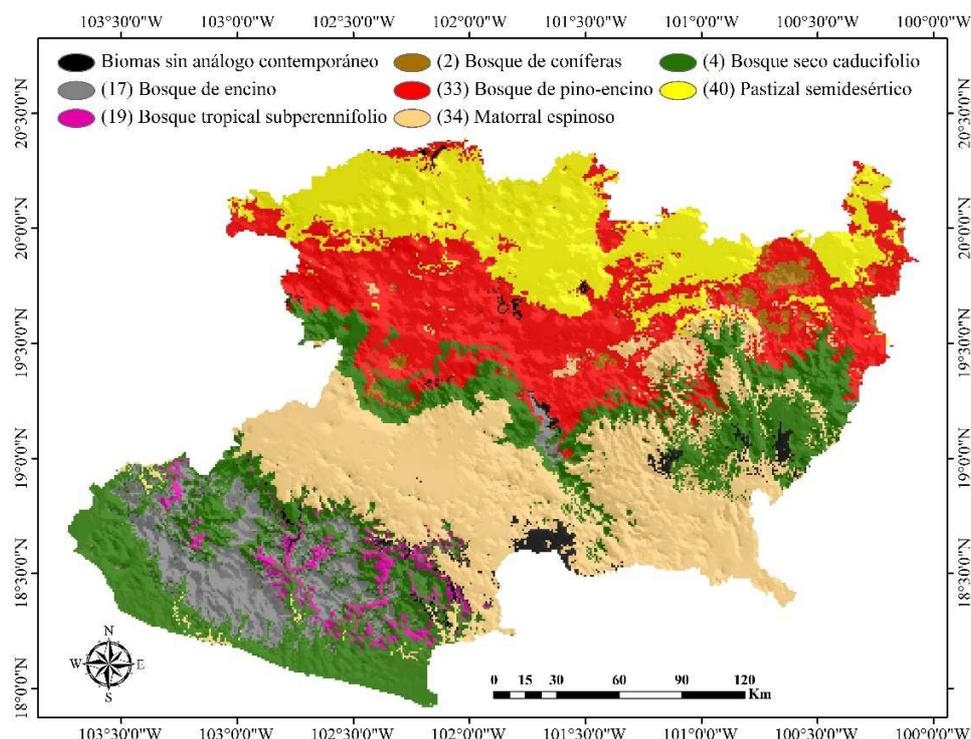
Figuras 2 y 3), y para el bosque de encino (reducción del **32.6%** para el 2030; Cuadro 1; bioma 17, color gris, Figuras 2 y 3). El hábitat climático del bosque de pino-encino se contrae moderadamente (**16.7%** para el año 2030; Cuadro 1; bioma 33, color rojo, Figuras 2 y 3). La reducción del área total de hábitat propicio para pino-encino es moderada, debido a que su contracción en el límite con el bosque de encino en el sur y con el pastizal en el norte, es compensada por la expansión ocupando áreas del bosque de coníferas en la Faja Volcánica Transmexicana (Figuras 2 y 3).



**Figura 2.** Hábitat climático propicio para los biomas de Michoacán, proyectado para la década centrada en el año 2030, por el modelo Geofísica de Fluidos, escenario de emisiones B1 (optimista).

En contraste, el hábitat propicio para tipos de vegetación de clima cálido o semiseco probablemente se expandirá substancialmente. Tal es el caso del hábitat propicio para el matorral espinoso, que se proyecta tendrá una gran expansión principalmente en la Depresión del Balsas (28.5%), región también conocida en

Michoacán como Tierra Caliente (Cuadro 1; bioma 34, color amarillo oscuro, Figura 2 y 3). También hay una notable expansión del hábitat asociado al bosque tropical subperennifolio, con una distribución contemporánea muy menor en superficie (Figura 1), de apenas de 41 km<sup>2</sup>, pero que se expande a 3498 km<sup>2</sup> para el 2090, equivalente al 4.8% de la superficie estatal (Cuadro 1).



**Figura 3.** Hábitat climático propicio para los biomas de Michoacán, proyectado para la década centrada en el año 2030, por el modelo Canadiense, escenario de emisiones A2 (pesimista).

Otros hábitats climáticos muy secos, propicios para biomas actualmente ausentes en Michoacán pero que ocurren en otras regiones xéricas de México (chaparral interior, bosque seco caducifolio de Yucatán y de Sinaloa, bosque subcaducifolio de Yucatán y Tamaulipas), probablemente se establecerán y expandirán a partir del año 2030, hasta alcanzar el 7% de la superficie estatal en el 2060 (Cuadro 1).

**CUADRO 1**

Área ocupada por el hábitat climático propicio para los biomas de Michoacán, estimado en base al clima contemporáneo (promedio 1961-1990) y proyectado para las décadas centradas en los años 2030, 2060 y 2090. Estimaciones a partir del consenso de seis modelos-escenarios climáticos.

Clave	Principales biomas de Michoacán	Contemporáneo (km <sup>2</sup> )	Cambio en área (% del contemporáneo)		
			2030	2060	2090
2	Bosque de coníferas	6098	-70.5	-92.8	-95.8
33	Bosques de pino-encino	21215	-16.7	-0.1	-8.9
17	Bosques de encino	7752	-32.6	-44.8	-78.7
4	Bosque seco caducifolio	18452	-4.8	-25.6	-38.1
40	Pastizal semidesértico	5840	52.9	-47.2	-58.3
34	Matorral espinoso	13151	28.5	-12.3	4.4
	Biomás de extensión contemporánea muy reducida o inexistente		Área ocupada (% del total estatal) <sup>&amp;</sup>		
19	Bosque tropical subperennifolio	41	1.7	3.8	4.8
6, 11, 3, 26	Chaparral interior, bosque seco caducifolio de Yucatán y de Sinaloa, bosque subcaducifolio de Yucatán y Tamaulipas	0	1.3	6.4	6.7
99	Bioma sin análogo contemporáneo	0	0.5	7.1	4.8

Código de biomas corresponde a la clasificación de Rehfeldt *et al* (2012), basada en Brown *et al* (1998). Para mayor detalle de tal clasificación, ver Tabla 1 de Rehfeldt *et al* (2012).

<sup>&</sup>No se incluyen biomas con extensión (contemporánea o futura) de hábitat climático menor a 40 km<sup>2</sup>.

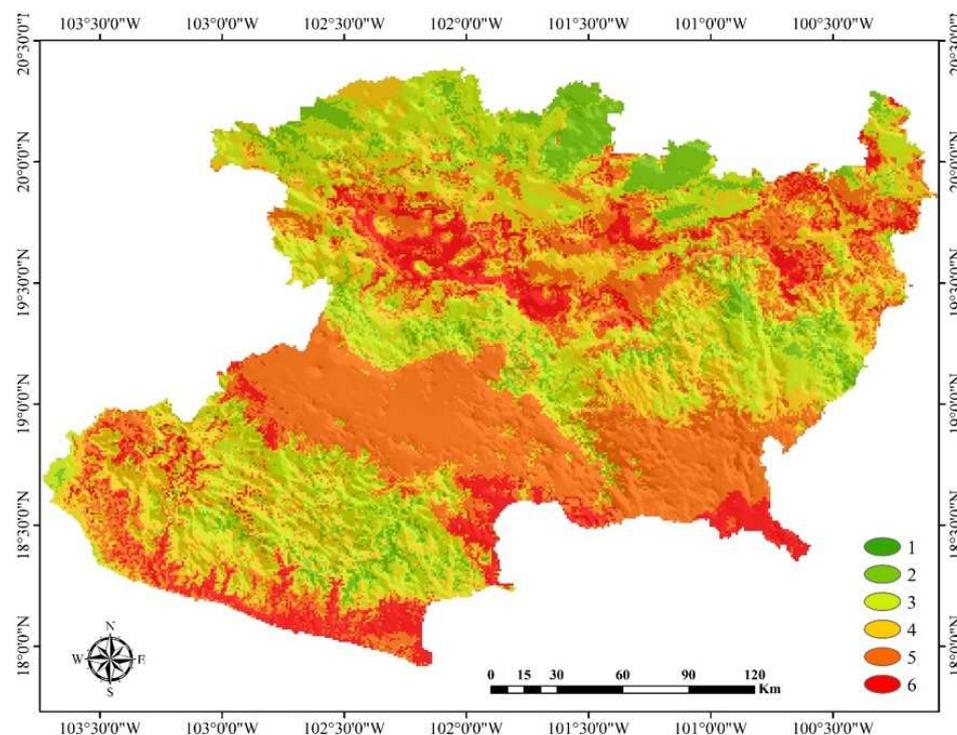
El hábitat propicio para biomas inexistentes en el presente en Michoacán y que por tanto no tienen actualmente un bioma asociado (sin análogo contemporáneo), aparecerán y se expandirá hasta alcanzar el 4.8% de la superficie estatal (Cuadro 1).

**Discrepancia entre modelos-escenarios.** Las proyecciones para la década centrada en el año 2030 son similares entre modelos-escenarios, pero discrepan notablemente para la década centrada en el año 2090. Por ejemplo, el hábitat climático propicio para el pastizal semidesértico que se distribuye actualmente en el norte de Michoacán, en el límite con Guanajuato (bioma 40, propio de la vegetación del Bajío, color amarillo en Figura 1), se expande hacia el sur, a costa del hábitat climático propicio para el pino-encino, y eso sucede de manera muy similar tanto en la proyección del modelo-escenario más optimista (Geofísica de Fluidos – B1; Figura 2), como en la del más pesimista (Canadiense A2; Figura 3).

En cambio, para la década centrada en el año 2090, la discrepancia entre modelos-escenarios es muy grande. Por ejemplo, en el norte del estado de Michoacán, en donde para la década centrada en el 2090 se proyectaba la expansión del pastizal semidesértico, hay una coincidencia muy pobre entre los modelos-escenarios de cuál bioma tendría un hábitat climático propicio (colores verdes en Figura 4 indican coincidencia de menos de tres modelos escenarios). La coincidencia de las predicciones es mayor a lo largo de la Faja Volcánica Transmexicana (centro-norte del estado, en un eje este-oeste alrededor de la latitud 19° 30'), en donde dominan valores de 5 a 6 modelos coincidentes (colores naranja a rojo, Figura 4); esa región son las partes altas de la Faja Volcánica Transmexicana, en donde en el clima contemporáneo hay un clima frío y húmedo propicio para bosque de coníferas, que eventualmente sería desplazado por un propicio para bosque de pino-encino (Cuadro 1).

Como un factor adicional de incertidumbre, para el 2090 el 4.8% de la superficie estatal sería ocupada por un clima sin análogo contemporáneo (promedio entre modelos escenarios; Cuadro 1).

Las discrepancias entre modelos-escenarios de biomas predichos, se deriva principalmente de las diferencias de emisiones de gases de efecto invernadero entre modelos-escenarios (Sáenz-Romero *et al.* 2010). Tales emisiones a su vez dependen de factores que no tienen una probabilidad estadística asociada: cambio tecnológico futuro para la producción de electricidad, grado de convergencia tecnológica entre países con actual desigualdad en desarrollo, crecimiento demográfico y Producto Interno Bruto de los países que tendrán la mayor contribución en las emisiones (IPCC 2000). Esto hace muy difícil tomar decisiones de manejo para un horizonte de tiempo tan alejado como 2090.



**Figura 4.** Número de modelos-escenarios que coinciden en la predicción mayoritaria (de entre seis modelos-escenarios), de un bioma dado para cada pixel, para la década centrada en el año 2090.

## Discusión

Las proyecciones para las décadas centradas en los años 2030, 2060 y 2090, indican que los hábitats climáticos propicios para los biomas que corresponden a clima templado se contraen y los de clima seco se expanden.

Sin embargo, la expansión del hábitat climático de biomas de vegetación seca no significa necesariamente que se expandirá el bioma correspondiente. Ello requeriría que las nuevas áreas ocupadas por el hábitat climático propicio, sean colonizadas por propágulos (semillas y plántulas) de las especies del bioma que les es propicio. Esto desde luego es poco probable que suceda, ya que la velocidad natural de migración de especies arbóreas es mucho más lenta que la velocidad a la que está ocurriendo el cambio climático (Peñuelas *et al.* 2007, Lenoir *et al.* 2008, Jump *et al.*

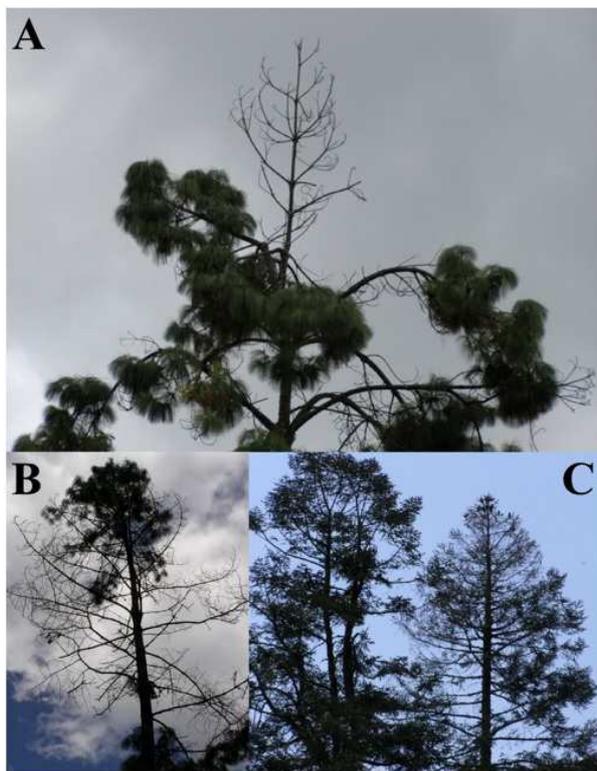
2009, Delzon *et al.* 2013). Además, cuando las perturbaciones de una comunidad vegetal son muy severas y con una duración larga, es posible que los procesos de sucesión no ocurran de una manera esperada. Por ejemplo, se ha observado que después de una mortalidad masiva de *Pinus ponderosa* en Jemez Mountain, Nuevo México, USA, debido a una sequía e incendios forestales atribuibles al cambio climático, el sotobosque fue ocupado masivamente por una exótica invasora: *Robinia neomexicana* (Csaba Mátyás, University of Sopron, Hungría; comunicación personal mayo 2018).

La consistencia entre modelos-escenarios para el año 2030 y su disparidad para el año 2090, llevan a pensar que las acciones de manejo por el momento deben tomarse considerando reacoplar las poblaciones naturales, las especies y los biomas al clima del 2030, o tal vez máximo para el año 2060. En el futuro cercano se deberá re-valorar las proyecciones, decidiéndose por tomar en cuenta el modelo-escenario más probable. Ante la imposibilidad de realizar todos los realineamientos bioma-clima necesario, lo razonable sería dar prioridad a aquellos en los que la incertidumbre sea menor (Rehfeldt *et al.* 2012). En el caso de Michoacán, la mayor certidumbre en las predicciones en el largo plazo es para la Faja Volcánica Transmexicana, en donde el hábitat propicio para el bosque de coníferas sería en gran medida desplazado por el propicio para pino-encino, mientras que éste último se contraería en sus límites altitudinales inferiores.

En cuanto a las áreas que se proyecta serán ocupadas por un clima sin análogo contemporáneo, Rehfeldt *et al.* (2012) define tal categoría como aquél que no ocurre bajo clima contemporáneo en Norteamérica y por ello no tiene una definición de la composición florística a la cual asociar dicho clima. Por ello, no es posible valorar con mayor detalle si sería benéfico como recurso aprovechable. Sin embargo, en este caso y en nuestra apreciación, un hábitat climático propicio para un bioma más árido que el actual, difícilmente sería benéfico en comparación a lo contemporáneo.

**Decaimiento forestal.** En México hemos observado decaimiento de árboles por sequía probablemente ligada al cambio climático. El decaimiento ha sido observado como defoliación de *Pinus pseudostrobus* en la Meseta Purépecha, Michoacán (Figura 5<sup>a</sup>, b) y de *Abies religiosa* (oyamel) en la Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca (Figura 5c; ver también Saénz-Romero *et al.*, 2012b). El sitio con declinación de *P. pseudostrobus* (Figura 5<sup>a</sup>, 5b) se encuentra en el límite inferior altitudinal de la distribución de esa especie en la región (entre 2,200 y 2,000 m s.n.m.), y es un micrositio pedregoso (López-Toledo *et al.* 2017). Esto concuerda con la predicción de un desfaseamiento entre hábitat climático y el sitio ocupado en

el presente por los biomas y con otros reportes de decaimiento forestal de árboles en su límite altitudinal inferior, que es su límite xérico (el límite de condiciones de sequía que puede soportar una población o especie) (Mátyás 2010).



**Figura 5.** Decaimiento de individuos de poblaciones de *Pinus pseudostrobus* (pino caniz) en la meseta Purépecha (a) y (b) y de *Abies religiosa* (oyamel) en la Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca (c), Michoacán. Defoliación aparentemente debida a sequía asociada al cambio climático. Modificado de López-Toledo et al (2017).

***Migración asistida, una opción para realinear los genotipos a los ambientes.***

La conclusión de lo anterior es que se requiere de ayuda humana para reacoplar (realignar) las poblaciones de especies forestales a los climas para los cuales están adaptadas, pero que ahora ocurrirán en sitios en los cuales no están presentes las poblaciones, especies y biomas actuales y a los que difícilmente son capaces de llegar por medios naturales (Aitken *et al.* 2008). La estrategia de proveer asistencia para realinear las poblaciones naturales a los ambientes para los cuales están

adaptadas, ha sido llamada migración asistida (Rehfeldt *et al.* 2002, Tchevakova *et al.* 2006).

En general el movimiento debe ser hacia latitudes superiores o en misma latitud pero a mayor altitud. Esto se traduciría, para el caso de poblaciones forestales, en recolectar semilla de la especie forestal de interés en un sitio, producir planta en vivero y plantar en un sitio en donde se ha predicho que ocurrirá el clima que le es propicio, por ejemplo, para la década centrada en el año 2030. Esto implica dejar a un lado concepto muy usado en la restauración ecológica, de que la semilla local en general es la mejor, porque está adaptada (Ledig y Kitzmiller 1992). Evidentemente, esto último era válido hasta antes de que el cambio climático fuera una realidad.

En el caso particular del estado de Michoacán, la migración hacia el norte no es una opción, ya que ese estado colinda al norte con Guanajuato, que en su parte sur es más seca que Michoacán (ver mapas en Sáenz-Romero *et al.* 2012<sup>a</sup> y áreas color amarillo en Figura 1). Por ello, en el caso de Michoacán, las opciones de migración asistida serán hacia mayores altitudes; es decir, a partes elevadas de la Faja Volcánica Transmexicana. Un experimento de migración asistida de tres especies de pino en Michoacán, puso en evidencia que un desplazamiento altitudinal hacia arriba de hasta 400 m es aceptable, implicando una disminución de crecimiento (en comparación a procedencias locales) del 5 % por cada 100 m de movimiento altitudinal (Castellanos-Acuña *et al.* 2015).

Para realinear las poblaciones al clima que les es propicio y que ocurrirá en el año 2030, la recomendación general sería mover hacia altitudes superiores las poblaciones 300 m. Esta estimación proviene de la proyección de un incremento de 1.4 °C para la década centrada en el año 2030 (Saénez-Romero *et al.*, 2012<sup>a</sup>), en comparación con el período 1961-1990. En general, por cada 100 m de mayor altitud, la temperatura decrece 0.5 °C (Saénez-Romero *et al.* 2010). Por tanto, un movimiento altitudinal hacia arriba, compensaría el incremento de 1.4 °C esperado para el año 2030.

Lo ideal sería hacer un análisis de la variación genética entre poblaciones para cada especie prioritaria, a fin de considerar los límites de la capacidad adaptativa de las poblaciones a distintos ambientes y con ello disminuir los riesgos de mala adaptación a los sitios a los que sean migradas (Loya-Rebollar *et al.* 2013). Es de la mayor importancia comprender que el movimiento altitudinal asistido tendría que hacerse en el presente, para que en el año 2030, con suerte, los árboles que se hayan plantado hayan sobrevivido, competido con éxito y alcanzado la edad

reproductiva. Eso permitiría coleccionar semilla en el año 2030 y repetir el ciclo, en esa ocasión, para reacomplarse al clima, por ejemplo, del 2060. Tal migración asistida debería hacerse estableciendo las plantaciones prioritariamente en sitios que ya se encuentran perturbados (deforestados, que abundan en México), a fin de hacer el reemplazamiento gradual, permitiendo que permanezcan lo más posible los tipos de vegetación originales en sitios poco perturbados.

Llevar a la práctica un programa masivo de migración asistida, desde luego requeriría de la participación de organismos gubernamentales a nivel federal (Comisión Nacional Forestal), estatal (Comisión Forestal del estado de Michoacán, en el caso que nos ocupa) y municipales (numerosos ayuntamientos cuentan con una Dirección de Ecología). Sin embargo, no se considera que es una labor únicamente gubernamental. Sería deseable la participación de otras instancias, tales como Organizaciones No Gubernamentales (de ecologistas), asociaciones de silvicultores y comunidades bien organizadas en torno al manejo forestal sustentable, como es el caso en Michoacán de las comunidades indígenas de Nuevo San Juan Parangaricutiro (CINSJP) y Cherán. En conjunto (instancias gubernamentales y de la sociedad civil), tendrían que decidir prioridades, que seguramente serían de dos tipos: económicas (como es la producción de madera comercial en la CINSJP) y para la conservación (como sería dentro de la Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca).

## **Conclusiones**

La proyección del hábitat climático propicio para biomas del estado de Michoacán, México, bajo clima contemporáneo (1961–1990) y las décadas centradas en los años 2030, 2060 y 2090, indican que para el año 2030, podría ocurrir una reducción del área ocupada por el hábitat climático propicio para vegetación propia de climas templados: bosque de coníferas, pino-encino y encino. En contraste, el hábitat propicio para tipos de vegetación de clima cálido o semiárido se expanden: matorral espinoso y pastizal semidesértico. Otros hábitats climáticos propicios para biomas muy secos, actualmente inexistentes en Michoacán (chaparral interior, bosque seco caducifolio de Yucatán y de Sinaloa, bosque subcaducifolio de Yucatán y Tamaulipas), se establecen y se expanden a partir del año 2030. La disparidad entre las proyecciones de los modelos-escenarios se incrementa conforme pasa el tiempo y se incrementa substancialmente para fin de siglo, haciendo difícil tomar decisiones de manejo para escenarios más allá del año 2030. Se sugiere realizar migración asistida, mediante programas de reforestación, para reacomplrar poblaciones de

especies forestales al hábitat climático que les es propicio y que ocurrirá en un lugar diferente al actual. Tal migración no es realizable hacia el norte, ya que el vecino estado de Guanajuato es más seco; la migración tendría que ser a mayores altitudes.

### **Agradecimientos**

Se agradece el financiamiento a CSR de la Comisión para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (proyecto CONABIO-JM036) y de la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH, así como la beca de postgrado del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a JFCM. Se agradecen los valiosos comentarios de Gerald E. Rehfeldt, USDA-Forest Service, Moscow, Idaho, USA, durante la preparación del manuscrito.

### **Literatura citada**

- Aitken, S. N., S. Yeaman, J. A. Holliday, T. Wang y S. Curtis-McLane. 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications* 1:95-111.
- Alfaro, R. I., B. Fady, G. G. Vendraminc, I. K. Dawson, R. A. Fleminga, C. Sáenz-Romero, R. Lindig-Cisneros, T. Murdock, B. Vinceti, C. M. Navarro, T. Skråppa, G. K. Baldinelli, Y. A. El-Kassaby y J. Loo. 2014. The role of forest genetic resources in responding to biotic and abiotic factors in the context of anthropogenic climate change. *Forest Ecology and Management* 333(1):76-87.
- Allen, C. D., A. K. Macalady, H. Chenchouni, D. Bachelet, N. McDowell, M. Vennetier, T. Kitzberger, A. Rigling, D. D. Breshears, E. H. Hogg, P. González, R. Fensham, Z. Zhangm, J. Castro, N. Demidova, J. H. Lim, G. Allard, S. Running, A. Semerci y N. Cobb. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259:660-684.
- Allen, C. D., D. Breshears y N. McDowell. 2015. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere* 6(8):1-55.
- Brown, D. E., F. Reichenbacher y S. Franson. 1998. A Classification of North American Biotic Communities. University of Utah, Salt Lake City. 141 pp.

- Castellanos-Acuña, D., R. Lindig-Cisneros and C. Sáenz-Romero. 2015. Altitudinal assisted migration of Mexican pines as an adaptation to climate change. *Ecosphere* 6(1):1-16.
- Delzon, S., M. Urli, J. C. Samalens, J. B. Lamy, H. Lischke, N. Zimmermann and A. J. Porte. 2013. Field evidence of colonisation by Holm oak, at the northern margin of its distribution range, during the Anthropocene Period. *PlosOne* 8(11):e80443.
- Fettig, C. J., M. L. Reid, B. Bentz, S. Sevanto, D. Spittlehouse and T. Wang. 2013. Changing climates, changing forests: a Western North American perspective. *Journal of Forestry* 111:214-228.
- Hansen, J. 2009. *Storms of my grandchildren*. Bloomsbury, New York. 336 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2000. Emissions Scenarios; Summary for Policymakers. Special Report of IPCC Working Group III. USA (<http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>).
- Jump, A. S., C. Mátyás and J. Peñuelas. 2009. The altitude-forlatitude disparity in the range retractions of woody species. *Trends in Ecology and Evolution* 24(1):694-701.
- Ledig, F. T. and J. Kitzmiller J. H. 1992. Genetic strategies for reforestation in the face of global climate change. *Forest Ecology and Management* 50:153-169.
- Lenoir, J., J. Gégout, P. Marquet, P. de Ruffray and H. Brisse. 2008. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20<sup>th</sup> century. *Science* 320:1768-1771.
- Loya-Rebollar, E., C. Sáenz-Romero, R. Lindig-Cisneros, P. Lobit, J. Villegas-Moreno and N. Sánchez-Vargas. 2013. Clinal variation in *Pinus hartwegii* populations and its application for adaptation to climate change. *Silvae Genetica* 62:86-95.
- Mátyás, C. 2010. Forecasts needed for retreating forests. *Nature* 464:1271.
- Mátyás, C., I. Berki, B. Czúcz, B. Gálos, N. Móricz and E. Rasztoivits. 2010. Future of beech in Southern Europe from the perspective of evolutionary ecology. *Acta Silvatica and Lingaria Hungarica* 6:91-110.
- McDowell, N. G. and C. Allen. 2015. Darcy's law predicts widespread forest mortality under climate warming. *Nature Climate Change* 5, 669–672.
- Peñuelas, J., R. Oyaga, M. Boada, and A. Jump. 2007. Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia (NE Spain). *Ecography* 30:830-838.

- Rehfeldt, G. E., N. Tchebakova, Y. Parfenova, W. Wykoff, N. Kuzmina and L. Milyutin. 2002. Intraspecific responses to climate in *Pinus sylvestris*. *Global Change Biology* 8:912-929.
- Rehfeldt, G. E., Crookston N. L., Sáenz-Romero C. and Campbell E. 2012. North American vegetation model for land-use planning in a changing climate: a solution to large classification problems. *Ecological Applications* 22:119-141.
- Sáenz-Romero, C., G. Rehfeldt, N. Crookston, P. Duval, R. St-Amant, J Beaulieu and B. Richardson. 2010. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for México and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change* 102:595-623.
- Sáenz-Romero, C., G. Rehfeldt, N. Crookston, P. Duval and J. Beaulieu. 2012a. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Michoacán state, México; impacts on the vegetation. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35:333-345.
- Sáenz-Romero, C., G. Rehfeldt, P. Duval and R. Lindig-Cisneros. 2012b. *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management* 275:98-106.
- Sturrock, R. N., S. Frankel, A. Brown, P. Hennon, J. Kliejunas, K. Lewis, J. Worrall and A. Woods. 2011. Climate change and forest diseases. *Plant Pathology* 60:133-149.
- Tchebakova, N. M., G. Rehfeldt and E. Parfenova. 2005. Impacts of climate change on the distribution of *Larix* spp. and *Pinus sylvestris* and their climatypes in Siberia. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11:861-882.
- López-Toledo, L., M. Heredia-Hernández, D. Castellanos-Acuña, A. Blanco-García, and C. Sáenz-Romero. 2017. Reproductive investment of *Pinus pseudostrobus* along an altitudinal gradient in Western Mexico: implications of climate change. *New Forests* 48(6):867–881.
- Van-Ypersele, J. P. 2010. Update on scenario development: from SRES to RCPs. *Proceedings IPCC*. Cancún, México, December 2010. [https://unfccc.int/files/methods\\_and\\_science/research\\_and\\_systematic\\_observation/application/pdf/ipcc\\_van\\_ypersele.pdf](https://unfccc.int/files/methods_and_science/research_and_systematic_observation/application/pdf/ipcc_van_ypersele.pdf)
- Williams, A. P., C. Allen, A. Macalady, D. Griffin, C. Woodhouse, D. Meko, T. Swetnam, S. Rauscher, R. Seager, H. Grissino-Mayer, J. Dean, E. Cook, C. Gangodagamage, M. Cai and N. McDowell. 2013. Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nature Climate Change* 3:292-297.