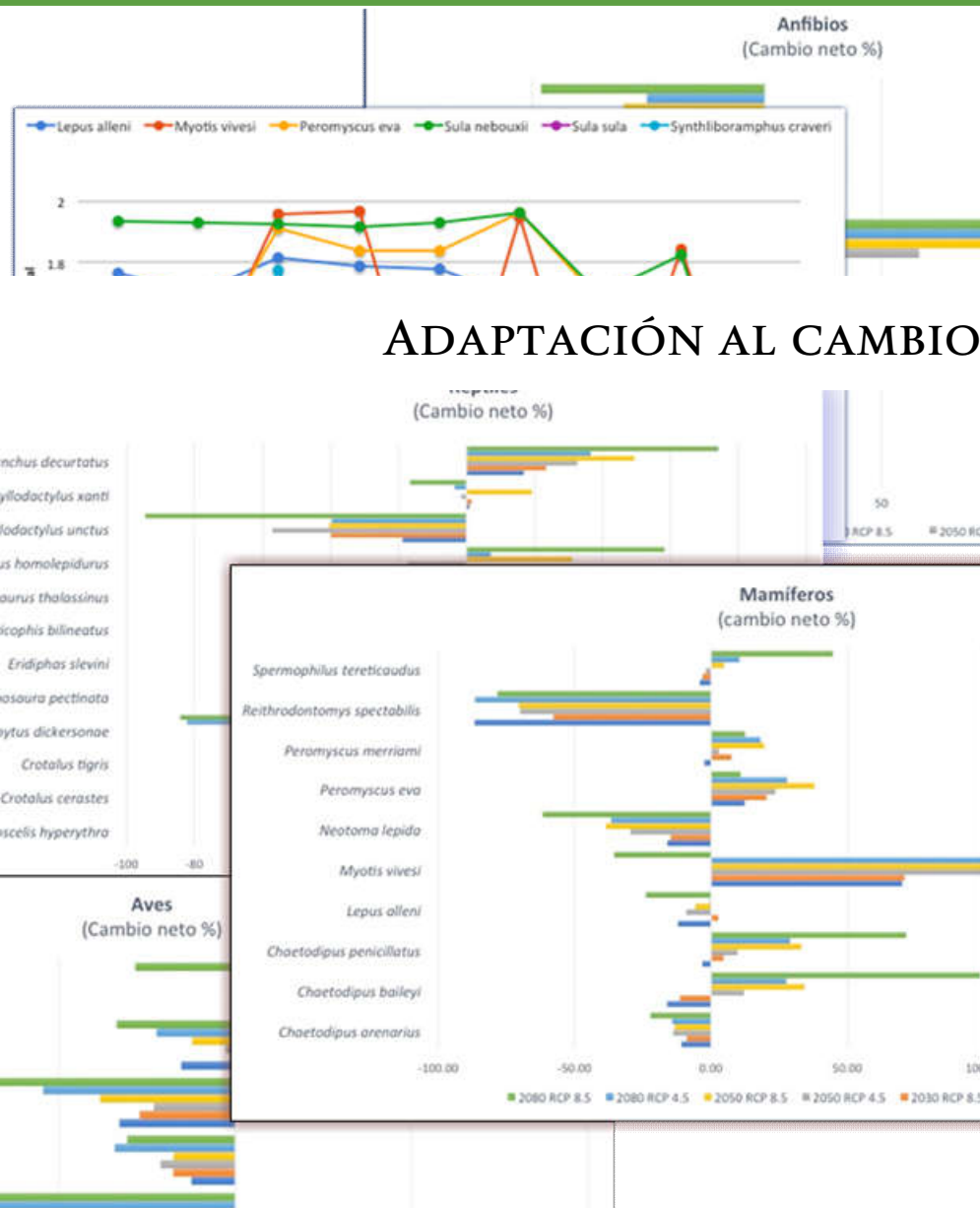


# ACTUALIZACIÓN DE LA EVALUACIÓN DE IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE ESPECIES DE MAMÍFEROS, AVES, REPTILES, ANFIBIOS Y PLANTAS QUE HABITAN LAS ISLAS DE MÉXICO

## Informe final

2017

### ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO



Coordinado por:

Coordinación General de Adaptación al Cambio Climático

Elaborado por:

Dr. Enrique Martínez Meyer  
Dra. Carolina Ureta Sánchez  
Dra. Ángela Cuervo Robayo  
Dr. Constantino González Salazar

Boulevard Adolfo Ruiz Cortines 4209, 2° piso. Col. Jardines en la Montaña, Del. Tlalpan C.p. 4210 Ciudad de México Tel. +52 (55) 54246400.

[www.inecc.gob.mx](http://www.inecc.gob.mx)



Environment  
Canada

Environnement  
Canada

**SEMARNAT**  
SECRETARÍA DE  
MEDIO AMBIENTE  
Y RECURSOS NATURALES



**INECC**  
INSTITUTO NACIONAL  
DE ECOLOGÍA  
Y CAMBIO CLIMÁTICO



**Nombre de la consultoría: “Actualización de la evaluación de impactos del cambio climático sobre la distribución potencial de especies de mamíferos, aves, reptiles, anfibios y plantas que habitan las islas de México”**

**No. De contrato: IC-2016-149**

**Reporte Final**

Consultor responsable:

Dr. Enrique Martínez Meyer

Equipo de trabajo:

Dra. Carolina Ureta Sánchez

Dra. Ángela Cuervo Robayo

Dr. Constantino González Salazar

Junio 2017

## Índice

RESUMEN.....	3
INTRODUCCIÓN.....	3
Modelos de nicho ecológico: ventajas y desventajas.....	4
OBJETIVO.....	5
MÉTODOS.....	5
1. Limpieza y depuración de base de datos.....	5
2. Ajuste y elaboración de variables climáticas presentes y futuras.....	6
3. Selección de las variables importantes para cada especie.....	6
4. Selección de algoritmos de modelado.....	6
5. Modelos de distribución potencial actual.....	7
6. Validación de los modelos.....	7
7. Ensamble de modelos para el presente.....	8
8. Modelos de distribución potencial bajo escenarios futuros.....	8
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	9
Variables ambientales relevantes para las especies.....	10
Selección de algoritmos de modelado.....	12
Validación de los modelos.....	13
Modelos de distribución potencial actual y futura.....	15
Cambio climático en las islas de mayor tamaño.....	21
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	24
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25
ENTREGABLES.....	29
Listado de especies y registros de presencia.....	29
Mapas de distribución potencial presente y futura.....	29

Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático - INECC

Periférico Sur 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, Coyoacán, México D.F.

## RESUMEN

El cambio climático puede traer consecuencias negativas importantes para la biodiversidad mundial, siendo las especies y poblaciones insulares particularmente vulnerables. En esta consultoría modelamos la distribución potencial de 46 especies que habitan (pero no son exclusivas a) diversas islas en México: 11 plantas, 6 anfibios, 12 reptiles, 7 aves y 10 mamíferos, bajo dos escenarios de cambio climático, uno moderado (RCP 4.5) y uno drástico (RCP 8.5), y tres horizontes temporales: cercano (2015-2039), medio (2045-2069) y lejano (2075-2099), producidos por cuatro modelos generales de circulación: MPI-ESM-LR, GFDL-CM3, HADGEM2-ES y CNRM. Los modelos de nicho se generaron con tres algoritmos de modelación: Generalised Boosting Model (GBM), Generalised Linear Models (GLM) y Multiple Adaptive Regression Splines (MARS), que posteriormente fueron ensamblados para producir un modelo consensuado. Los resultados mostraron que de las 46 especies analizadas, 22 presentaron una tendencia a reducir sus áreas de distribución potencial, 19 aumentaron y en las 5 restantes sus patrones no fueron consistentes. Las aves y los anfibios fueron los grupos taxonómicos más afectados, mientras que las plantas y los mamíferos fueron los grupos taxonómicos en donde hubo una mayor proporción de especies que ganaron área. Se analizó la riqueza potencial en 11 islas de mayor tamaño en México, en tres regiones insulares: Pacífico, Golfo de California y Caribe, encontrándose que las especies en la región Golfo de California y Caribe son potencialmente más sensibles a los efectos del cambio climático que la región Pacífico. Se observó también que las aves y los mamíferos presentaron mayores reducciones de la riqueza potencial que los reptiles, plantas y anfibios. Se recomienda que se establezcan observatorios de la biodiversidad en islas centinela que permitan detectar señales tempranas de cambio en las especies. También se propone que se realicen estudios específicos de las especies identificadas como más vulnerables, así como realizar análisis históricos del clima en las estaciones dentro y cercanas a las islas para cuantificar la magnitud del cambio climático.

## INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha generado cambios en la fenología, abundancia, composición y distribución de las especies (Parmesan y Yohe 2003, Peterson et al. 2015). Asimismo, opera de forma sinérgica con la pérdida de hábitat y la invasión de especies exóticas, lo que incrementa la vulnerabilidad de las especies nativas. La mayoría de los estudios de cambio climático se han enfocado a evaluar los efectos en el continente, pero las islas son particularmente vulnerables a los efectos del cambio climático por su relativamente menor área que las regiones continentales y mayor exposición al incremento en la frecuencia e intensidad de fenómenos climáticos extremos (e.g., huracanes), así como al incremento del nivel del mar (Harter et al. 2015).

Según el Catálogo Insular desarrollado por la Secretaría de Gobernación de la República Mexicana, el país cuenta con alrededor de 4000 cuerpos insulares, que representan el 0.3% del territorio nacional. Las islas mexicanas destacan por su variedad de ecosistemas y alta diversidad biológica,

Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático - INECC

Periférico Sur 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, Coyoacán, México D.F.

ya que albergan a más de 2000 especies, de las cuales 10% son endémicas. Las regiones del país con mayor extensión de territorio insular se encuentran en el Océano Pacífico, Golfo de California, y la región del Mar Caribe (CONABIO 2015). Debido a la gran diversidad de ecosistemas existentes en las islas mexicanas, los análisis que se realicen deben procurar la representación de esta diversidad. Por ello, es necesario realizar análisis de vulnerabilidad de la biodiversidad de islas mexicanas al cambio climático, que identifiquen las especies y las regiones de más riesgo.

En México existen esfuerzos muy importantes para la conservación del territorio insular (Aguirre-Muñoz et al. 2008, Aguirre-Muñoz et al. 2009), y recientemente se llevaron a cabo una serie de consultorías por parte del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y el Programa para las Naciones Unidas del Desarrollo (PNUD) para fortalecer el conocimiento en torno a la vulnerabilidad y conservación de la biodiversidad de las islas mexicanas. En una consultoría previa, Ureta (2016) generó modelos de distribución potencial presente y futura para 100 especies que habitan las islas mexicanas. Sin embargo, los escenarios futuros que se usaron fueron los del ensamble ponderado denominado REA (*Reliability Ensemble Averaging*, en inglés); que es una combinación espacial de 14 modelos generales de circulación (Cavazos et al. 2015). Aunque este tipo de ensamblajes son una ventaja para sintetizar el panorama de los análisis de cambio climático, también es cierto que es necesario identificar la variación de la respuesta de las especies ante diferentes modelos, ya que esto permite capturar la incertidumbre provocada por la variación entre los escenarios (Rocchini et al. 2011).

### **Modelos de nicho ecológico: ventajas y desventajas**

Los modelos de nicho ecológico (MNE) y distribución potencial han jugado un papel importante en las evaluaciones preventivas de riesgos por efecto del cambio climático. Permiten entender los rangos geográficos de las especies e identificar aquellos factores ambientales que limitan sus distribuciones (Jeschke y Strayer 2008, Peterson et al. 2011). Los MNE son métodos correlativos y requieren de información sobre la presencia de las especies y una serie de variables ambientales actuales, principalmente climáticas, para generar un modelo de las condiciones que favorecen la presencia de una especie (i.e., un modelo de su nicho ecológico). Este modelo es proyectado al espacio geográfico para generar un mapa que representa la distribución potencial de la especie (Peterson et al. 2011). Un modelo de nicho también puede ser proyectado a escenarios de clima futuro (Jeschke y Strayer 2008, Peterson et al. 2011), lo que permite medir el nivel de exposición y sensibilidad de una amplia gama de especies al cambio climático. Los resultados de este tipo de análisis han sido utilizados para evaluar la vulnerabilidad de las especies y ecosistemas al cambio climático y así proponer estrategias de monitoreo y conservación (Peterson et al. 2002, Thuiller et al. 2005, Huntley et al. 2008). Entre las desventajas de este tipo de métodos es que las correlaciones encontradas no incorporan los mecanismos de interacción de la presencia de la especie con las variables y, por tanto, su respuesta a los cambios ambientales; así como tampoco consideran las interacciones biológicas (Peterson et al. 2011).

La modelación de la distribución de especies en las islas conlleva por lo menos dos limitaciones importantes. En primer lugar, la gran mayoría de las islas mexicanas son de dimensiones relativamente pequeñas y la cartografía climática no tiene la resolución espacial suficiente para capturarlas o están representadas por muy pocos píxeles. En segundo lugar, hay relativamente pocos registros de las especies insulares que representen adecuadamente la distribución de las especies dentro de las islas. Estos inconvenientes impiden hacer un análisis fino de las posibles consecuencias del cambio climático sobre la distribución de las especies en las islas. Por esta razón, en esta consultoría se decidió generar modelos de nicho de forma rigurosa para un subconjunto de las especies analizadas en la consultoría a cargo de la Dra. Ureta (2016), que fueran de interés para la conservación en las islas y que cumplieran con los requerimientos de datos para una modelación confiable, haciendo proyecciones a diversos escenarios climáticos y en tres horizontes temporales. Los resultados de los modelos de distribución potencial presente y futuros se presentan de manera general para todo el país y se analizan para 11 islas mexicanas de mayor tamaño. En el Mar de Cortés fueron: Tiburón, Ángel de la Guarda, Carmen, San José, Espíritu Santo y Cerralvo (ahora Jacques Cousteau); para el Pacífico: Guadalupe, Cedros, Marías y Socorro; y para el Caribe, Cozumel.

## **OBJETIVO**

Actualizar los estudios de impactos del cambio climático sobre la distribución potencial de especies relevantes de anfibios, reptiles, aves, mamíferos y plantas que habitan las islas mexicanas, a partir de la modelación de sus nichos ecológicos y cartografiarlos.

## **MÉTODOS**

### **1. Limpieza y depuración de base de datos**

Las bases de datos proporcionadas por el INECC fueron complementadas con la versión del año 2016 del Sistema Nacional de la Biodiversidad (SNIB), y el repositorio internacional Global Biodiversity Facility (GBIF: [www.gbif.org](http://www.gbif.org)). Para cada especie se revisaron los registros de presencia, donde eliminamos aquellos que estuvieran fuera del área de la distribución conocida de la especie. Esto se realizó con base en dos criterios: (1) consulta a expertos y (2) revisión de literatura especializada.

Los expertos consultados fueron, para plantas: Dr. Jaime Jiménez Ramírez, Facultad de Ciencias, UNAM; Dr. José Luis Villaseñor Ríos, Instituto de Biología, UNAM; y para anfibios: Dr. Óscar Flores Villela, Facultad de Ciencias, UNAM. Las fuentes bibliográficas revisadas fueron las siguientes: plantas (Guzmán et al. 2003); anfibios y reptiles (Castro-Franco & Gaviño 1990, Flores-Villela 1993, Grismer 1999, 2002); aves (BLI & NS 2015); y mamíferos (Wilson & Ruff 1999, Ceballos & Oliva 2005, Kays & Wilson 2009).

Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático - INECC

Periférico Sur 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, Coyoacán, México D.F.

## 2. Ajuste y elaboración de variables climáticas presentes y futuras

Se obtuvieron los valores mensuales de precipitación, temperatura mínima y máxima de la base de datos Worldclim (Hijmans et al. 2005) para el presente (1950-2000), disponibles en la página del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM (<http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/>). A las superficies mensuales del periodo de referencia se le sumó la capa de anomalías generadas por Fernández Eguiarte et al. (2015). A partir de esas tres variables ambientales se generaron 19 variables bioclimáticas para cada uno de los periodos que se analizaron utilizando la biblioteca *Dismo* (Hijmans et al. 2015), del programa de código abierto R (RTeam 2016). Las 19 variables ambientales representan expresiones anuales y estacionales de las temperatura y precipitación (Hijmans et al. 2005). Este conjunto de variables es el más utilizado a nivel mundial en la modelación de distribuciones potenciales.

Los escenarios de clima futuro que se generaron para este estudio corresponden a los RCP 4.5 (moderado) y 8.5 (extremo) y tres horizontes temporales: cercano (2015-2039), medio (2045-2069) y lejano (2075-2099), producidos por cuatro modelos generales de circulación (MGC): MPI-ESM-LR (Alemania), GFDL-CM3 (Estados Unidos), HADGEM2-ES (Reino Unido) y CNRM (Francia); que de acuerdo con el CCAUNAM-INECC son los que mejor representan las tendencias climáticas históricas del país (Fernández Eguiarte et al. 2015). Todos los mapas del presente y del futuro están a una resolución de 30 segundos de arco, lo que corresponde a aproximadamente 1 km<sup>2</sup>.

## 3. Selección de las variables importantes para cada especie

Se utilizó la prueba de permutación del algoritmo MaxEnt (Phillips y Dudík 2009) para elegir variables relevantes para los modelos de nicho de cada una de las especies. De esta forma, del conjunto de las 19 variables bioclimáticas originales, se realizó una selección para cada especie, la cual es especificada en el archivo de Excel que se anexa a esta entrega (*Variables.xlsx*). La variable fue considerada como importante si su aportación al modelo fue mayor o igual al 1%.

## 4. Selección de los algoritmos de modelado

Se ha demostrado que los algoritmos de modelación tienen diferente desempeño y que en la actualidad no existe un algoritmo que funcione mejor que los demás, sino que dependiendo de la estructura de los datos biológicos y ambientales un algoritmo en particular puede desempeñarse mejor que otros, pero cambiando la estructura de los datos puede ocurrir lo opuesto (Qiao et al. 2015). Esto es particularmente exacerbado cuando los modelos de nicho son transferidos a escenarios de cambio climático (Pearson et al. 2006), lo que obliga a hacer pruebas de desempeño para elegir el o los algoritmos que mejor funcionen para los datos con los que se cuenta. Por ello,

Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático - INECC

Periférico Sur 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, Coyoacán, México D.F.



una vez teniendo el conjunto específico de variables por especie, se realizó una prueba piloto con seis especies para las que se tienen relativamente pocos datos, pero su distribución es bien conocida, con el fin de identificar los algoritmos de modelación que mejor funcionan con base en métricas de desempeño para datos de sólo presencia: la tasa de omisión y ROC parcial (Fielding et al., 1999; Peterson et al., 2008), así como el juicio de expertos. Las especies seleccionadas para la prueba piloto fueron tres mamíferos (*Lepus alleni*, *Myotis vivesi* y *Peromyscus eva*) y tres aves (*Sula neboxii*, *Sula sula* y *Synthliboramphus craveri*).

Para generar los modelos de distribución se probaron nueve algoritmos, seis dentro de la plataforma de modelación BIOMOD (Biodiversity Modelling) (Thuiller et al., 2009), la cual contiene diferentes métodos usados para modelar el nicho y la distribución de las especies. Dentro de esta plataforma se seleccionaron los siguientes algoritmos: Artificial Neural Networks (ANN), Generalised Additive Models (GAM), Generalised Boosting Model (GBM), Generalised Linear Models (GLM), Multiple Adaptive Regression Splines (MARS) y Random Forest (RF). De igual forma se utilizó el algoritmo Bioclim, contenido en la plataforma de modelación *Dismo* del programa R (Hijmnas et al., 2015); y finalmente en sus programas autónomos se probaron el Genetic Algorithm for Rule-set Prediction (GARP) (Stockwell & Peters, 1999) y MaxEnt (Phillips y Dudík, 2009).

## 5. Modelos de distribución potencial actual

Con base en las pruebas mencionadas se identificaron los tres algoritmos que tuvieron mejor desempeño en las especies piloto, que fueron: MARS, GLM, GBM. Estos algoritmos se usaron para la modelación de todas las demás especies: Para ello, primero se dividieron los registros de las especies de manera aleatoria en 70% para calibrar el modelo y 30% para evaluarlo. Dado que estos tres métodos requieren datos de ausencia para su funcionamiento, se generaron 10,000 pseudo-ausencias en el área de análisis; esto es, se escogieron aleatoriamente ese número de píxeles en donde no se tenía registrada la presencia de las especies que se analizaron. Con los datos de calibración, cada uno de los algoritmos fue parametrizado *ad hoc* en la plataforma BIOMOD para generar los modelos de distribución potencial bajo el escenario actual (1950-2000). Para cada algoritmo se realizó una sola corrida en la que se generaron los mapas de distribución potencial actual.

## 6. Validación de los modelos

La validación es un paso fundamental en el proceso de modelado, ya que permite evaluar la capacidad informativa de los modelos. Antes de realizar las transferencias al futuro se evaluó el desempeño de las calibraciones de cada algoritmo. Para ello se utilizó la tasa de omisión y la medida True Skill Statistic (TSS), que se ha recomendado en la evaluación de modelos de distribución cuando las predicciones se expresan como mapas de ausencia-presencia (Fielding et

al. 1999, Allouche et al. 2006). Si un modelo no resulta satisfactorio bajo el escenario de calibración (i.e., el escenario del presente) no es conveniente realizar transferencias de ese modelo en escenarios futuros, ya que la propagación del error causaría modelos con muy alta incertidumbre.

## **7. Ensamble de los modelos para el presente**

Las salidas de los modelos generados con cada uno de los tres algoritmos son de tipo probabilístico, es decir, los píxeles toman valores entre 0 y 1. Estos mapas probabilísticos se convirtieron en mapas binarios (0=ausencia y 1=presencia) utilizando como valor umbral de corte la probabilidad que maximizara el desempeño, de acuerdo con la prueba TSS. Los tres mapas binarios correspondientes a cada algoritmo se sumaron en un sistema de información geográfica para producir un mapa consenso con valores que pueden ir de 0 a 3, en donde 0 significa que todos los algoritmos predijeron la ausencia de la especie en esos píxeles; 1, que solo uno de los 3 algoritmos predijo presencia en esos píxeles; 2, que dos de los tres algoritmos predijeron la presencia en dichos píxeles; y 3 son los píxeles de máximo consenso, en donde los 3 algoritmos predijeron la presencia de la especie. Este mapa consenso fue posteriormente reclasificado a un mapa binario (0 y 1) considerando como umbral el valor 2; es decir, los valores 0 y 1 se reclasificaron con valor de 0 (ausencia) y los valores 2 y 3 con valor de 1 (presencia). El uso de varios algoritmos, en lugar de sólo uno, permite evaluar la incertidumbre generada por los algoritmos y con ello identificar áreas en donde hay mayor confianza en las proyecciones geográficas de los modelos (Buisson et al., 2010).

## **8. Modelos de distribución potencial bajo escenarios futuros**

Los modelos de nicho bajo las condiciones de clima actual fueron proyectados a los escenarios producidos por los modelos generales de circulación: MPI-ESM-LR, GFDL-CM3, HADGEM2-ES y CNRM, bajo los RCP 4.5 y 8.5, y tres horizontes temporales: cercano (2015-2039), medio (2045-2069) y lejano (2075-2099), generando así un mapa de distribución potencial para cada combinación laboratorio-RCP-tiempo; es decir, un total de 24 mapas futuros para cada especie. Para sintetizar esta información se generaron ensambles de los cuatro laboratorios siguiendo el mismo procedimiento anterior: (1) los mapas probabilísticos se transformaron en binarios usando el mismo valor umbral que su mapa correspondiente al presente; (2) los mapas binarios se sumaron en un SIG para obtener un mapa consenso; y (3) el mapa consenso se reclasificó para hacerlo binario, convirtiendo los valores 0, 1 y 2 a 0 (ausencia), y 3 y 4 a 1 (presencia). De esta forma, al final se obtuvieron 7 mapas de distribución potencial para cada una de las 46 especies: uno para el presente, dos para cada tiempo (cercano, medio y lejano), y dos RCP: 4.5 y 8.5.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las 100 especies de plantas y vertebrados que nos fueron entregadas como producto de la consultoría a cargo de Ureta (2016), seleccionamos 46 con base en criterios de relevancia para la conservación (evitamos especies no nativas y de muy amplia distribución) y de suficiencia de datos, quedando conformadas de la siguiente manera: 11 plantas, 6 anfibios, 12 reptiles, 7 aves y 10 mamíferos (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Especies analizadas en este estudio y número de localidades únicas por especie.

ESPECIES	No. de registros	ESPECIES	No. de registros
<b>Anfibios</b>		<i>Sula sula</i>	30
<i>Anaxyrus californicus</i>	28	<i>Synthliboramphus craveri</i>	103
<i>Aneides lugubris</i>	8	<b>Mamíferos</b>	
<i>Batrachoseps major</i>	16	<i>Chaetodipus arenarius</i>	291
<i>Incilius alvarius</i>	142	<i>Chaetodipus baileyi</i>	289
<i>Lithobates forreri</i>	105	<i>Chaetodipus penicillatus</i>	489
<i>Pseudacris cadaverina</i>	88	<i>Lepus alleni</i>	168
<b>Reptiles</b>		<i>Myotis vivesi</i>	38
<i>Aspidoscelis hyperythra</i>	180	<i>Neotoma lepida</i>	647
<i>Crotalus cerastes</i>	346	<i>Peromyscus eva</i>	124
<i>Crotalus tigris</i>	141	<i>Peromyscus merriami</i>	151
<i>Crotaphytus dickersonae</i>	27	<i>Reithrodontomys spectabilis</i>	11
<i>Ctenosaura pectinata</i>	311	<i>Spermophilus tereticaudus</i>	181
<i>Eridiphas slevini</i>	22	<b>Plantas</b>	
<i>Masticophis bilineatus</i>	275	<i>Bunchosia palmeri</i>	146
<i>Petrosaurus thalassinus</i>	162	<i>Chiococca alba</i>	267
<i>Phyllodactylus homolepidurus</i>	59	<i>Carlowrightia arizonica</i>	1026
<i>Phyllodactylus unctus</i>	169	<i>Dalea carthagenensis</i>	85
<i>Phyllodactylus xanti</i>	267	<i>Echites yucatanensis</i>	165
<i>Phyllorhynchus decurtatus</i>	712	<i>Elaeodendron trichotomum</i>	72
<b>Aves</b>		<i>Hofmeisteria fasciculata</i>	103
<i>Egretta rufescens</i>	3307	<i>Melicoccus olivaeformis</i>	353
<i>Pelecanus occidentalis</i>	11880	<i>Myriocarpa longipes</i>	310
<i>Ptychoramphus aleuticus</i>	38	<i>Opuntia karwinskiana</i>	68
<i>Sula leucogaster</i>	327	<i>Pachycereus pecten-aboriginum</i>	198
<i>Sula nebouxii</i>	520		

### **Variables ambientales relevantes para las especies**

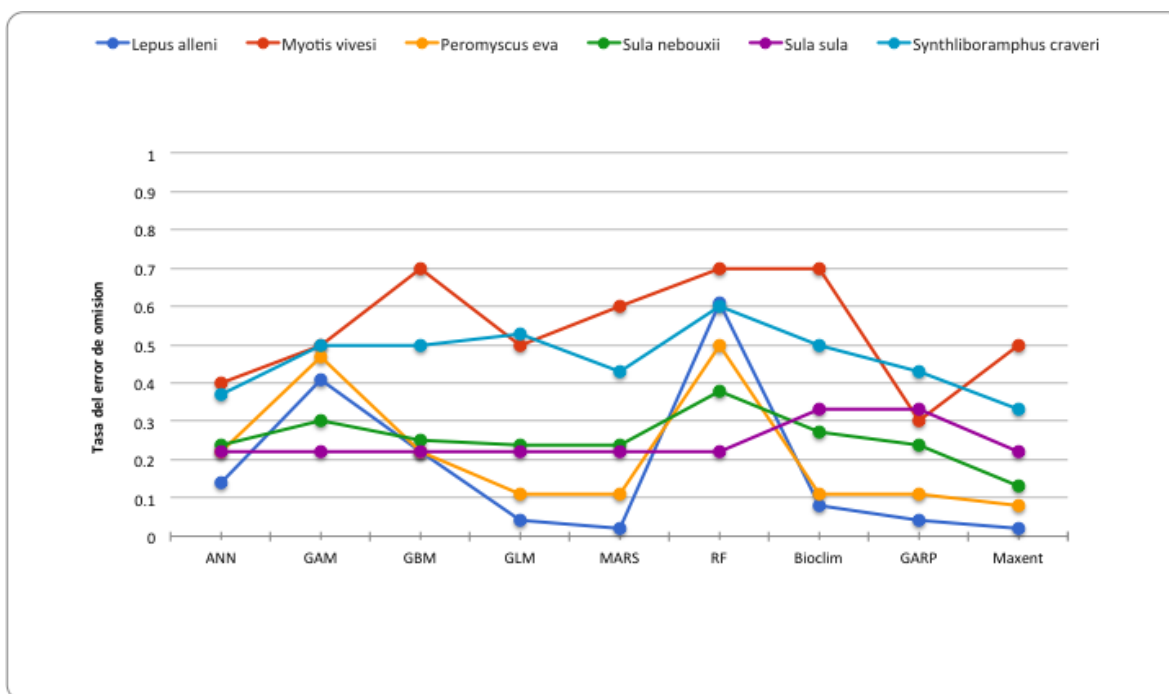
El análisis para determinar la importancia de las variables ambientales para cada especie mostró resultados interesantes. De las cinco variables que fueron relevantes para un mayor número de especies, dos fueron de temperatura y tres fueron de precipitación: (1) estacionalidad de la temperatura (Bio4; 38 spp), (2) precipitación del trimestre más caliente (Bio18; 34 spp), (3) precipitación anual (Bio12; 33 spp), (4) estacionalidad de la precipitación (Bio15, 32 spp) y temperatura media del trimestre más seco (Bio9; 31 spp). Por el contrario, la variable que fue importante para un menor número de especies fue la temperatura media del trimestre más cálido (Bio10; 11 spp) (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Variables ambientales relevantes para las especies analizadas. Nomenclatura: Bio1-Temperatura media anual; Bio2-Intervalo diurno medio de la temperatura; Bio3-Isotermalidad; Bio4-Estacionalidad de la temperatura; Bio5-Temperatura máxima del mes más cálido; Bio6-Temperatura mínima del mes más frío; Bio7-Intervalo anual de la temperatura; Bio8-Temperatura media del trimestre más húmedo; Bio9-Temperatura media del trimestre más seco; Bio10-Temperatura media del trimestre más cálido; Bio11-Temperatura media del trimestre más frío; Bio12-Precipitación anual; Bio13-Precipitación del mes más húmedo; Bio14-Precipitación del mes más seco; Bio15-Estacionalidad de la precipitación; Bio16-Precipitación del trimestre más húmedo; Bio17-Precipitación del trimestre más seco; Bio18-Precipitación del trimestre más cálido; Bio19-Precipitación del trimestre más frío.

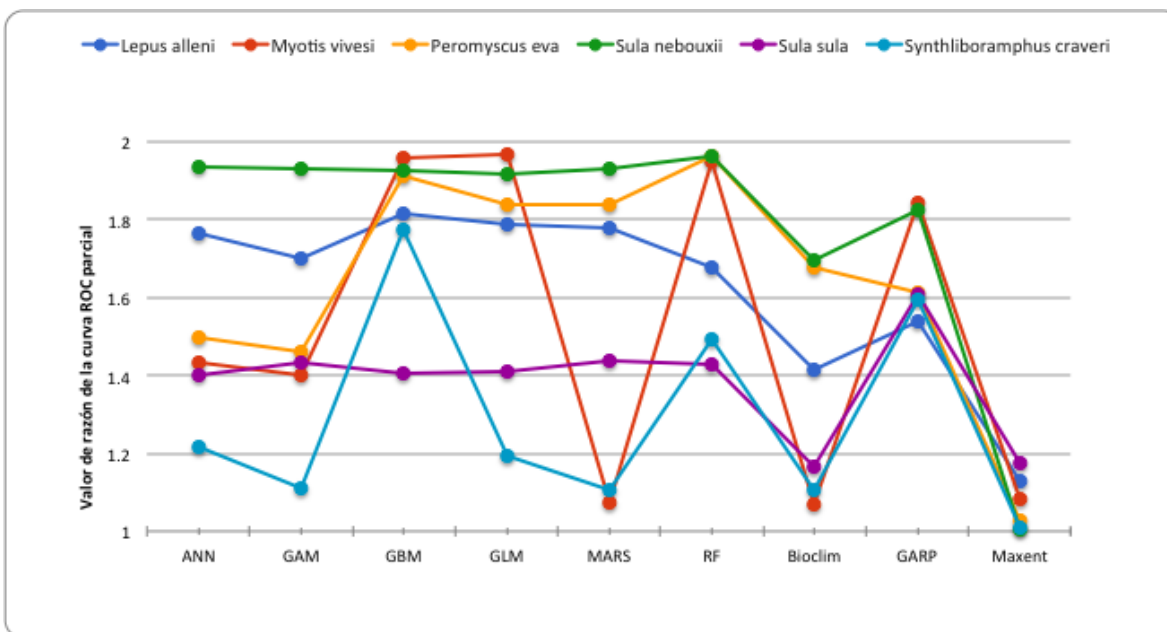
Especie	Variables Bioclimáticas																		
	Bio1	Bio2	Bio3	Bio4	Bio5	Bio6	Bio7	Bio8	Bio9	Bio10	Bio11	Bio12	Bio13	Bio14	Bio15	Bio16	Bio17	Bio18	Bio19
<b>ANFIBIOS</b>																			
<i>Anaxyrus alifornicus</i>								1	1				1		1			1	1
<i>Aneides lugubris</i>		1				1		1	1				1		1		1	1	1
<i>Batrachoseps major</i>							1	1						1				1	1
<i>Incilius alvarius</i>			1	1	1	1			1	1	1			1	1				1
<i>Lithobates forreri</i>				1	1			1	1		1				1	1	1	1	1
<i>Pseudacris adaverina</i>	1	1		1				1	1				1	1	1				1
<b>REPTILES</b>																			
<i>Aspidoscelis hyperythra</i>	1	1	1	1	1	1	1	1					1	1	1	1	1	1	1
<i>Crotalus cerastes</i>	1	1	1	1				1		1		1	1	1	1				1
<i>Crotalus tigris</i>		1	1	1	1	1			1					1					1
<i>Crotaphytus tickersonae</i>				1				1					1			1			
<i>Ctenosaura pectinata</i>			1	1	1	1	1	1	1				1	1		1		1	1
<i>Eridiphas levinii</i>				1									1			1	1		
<i>Masticophis lateralis</i>	1		1	1				1	1	1		1	1	1	1		1	1	1
<i>Petrosaurus halassinus</i>			1	1	1	1	1	1	1				1	1		1		1	1
<i>Phyllodactylus homolepidurus</i>			1					1	1	1			1	1		1		1	1
<i>Phyllodactylus sanctus</i>	1	1	1	1				1				1		1	1	1		1	1
<i>Phyllodactylus santii</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1		1	1
<i>Phyllorhynchus securtatus</i>	1		1	1	1	1	1		1			1	1	1	1		1	1	1
<b>AVES</b>																			
<i>Egretta tricolor</i>		1	1	1	1	1	1	1	1	1			1		1	1	1		1
<i>Pelecanus occidentalis</i>		1	1	1	1	1	1	1	1	1			1		1	1	1		1
<i>Ptychoramphus aleuticus</i>			1	1									1					1	1
<i>Sula sula</i>								1	1				1		1	1			1
<i>Sula leucogaster</i>		1	1	1	1	1		1				1	1	1	1			1	1
<i>Sula nebouxii</i>	1	1						1	1	1		1	1	1	1	1		1	1
<i>Synthliboramphus traverii</i>				1	1			1	1	1		1						1	1
<b>MAMÍFEROS</b>																			
<i>Chaetodipus arenarius</i>	1	1	1					1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Chaetodipus baileyi</i>		1		1					1	1	1	1	1		1	1	1		1
<i>Chaetodipus penicillatus</i>	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1			1	1			1
<i>Lepus alleni</i>			1	1			1	1		1		1	1	1	1	1		1	1
<i>Myotis vivesi</i>				1				1	1				1	1		1			
<i>Neotoma lepida</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1				1	1			1	1	1
<i>Peromyscus leucopus</i>	1	1	1	1	1	1						1	1		1	1	1	1	1
<i>Peromyscus merriami</i>	1	1	1	1				1	1	1		1						1	1
<i>Reithrodontomys spectabilis</i>				1				1	1	1				1				1	1
<i>Spermophilus tereticaudus</i>	1	1	1	1	1	1			1						1	1	1	1	1
<b>PLANTAS</b>																			
<i>Bunchosia palmeri</i>				1				1		1		1			1	1	1	1	1
<i>Carlwrightia arizonica</i>		1	1		1			1	1	1	1	1			1	1	1		1
<i>Chiococca loba</i>	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1			1	1		1	1
<i>Dalea orthagenensis</i>		1	1	1				1	1			1	1	1		1	1		1
<i>Echites yucatanensis</i>	1		1	1			1	1		1	1	1	1					1	1
<i>Elaeodendron trichotomum</i>		1	1	1	1	1	1						1	1	1	1	1		1
<i>Hofmeisteria fasciculata</i>	1		1	1				1	1						1			1	1
<i>Melicoccus livaeformis</i>	1	1		1				1	1		1	1	1	1	1				
<i>Myriocarpa longipes</i>		1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1		1	1
<i>Opuntia karwinskiana</i>		1		1							1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Pachycereus pecten-aboriginum</i>			1	1				1	1		1	1			1	1		1	1

## Selección de algoritmos de modelado

La prueba piloto con las seis especies seleccionadas para determinar los algoritmos de mejor desempeño indicaron que, con base en las pruebas de tasa de omisión y ROC parcial, además del juicio de expertos, no hubo un solo algoritmo que funcionara mejor para todas las especies ni tampoco bajo las dos métricas de desempeño. Por ejemplo, MaxEnt obtuvo relativamente buen desempeño según la prueba de tasa de omisión (Fig. 1), pero bajo desempeño de acuerdo a la prueba de ROC parcial (Fig. 2). Ponderando los resultados de las pruebas de desempeño y los mapas resultantes, los algoritmos de desempeño más consistentes fueron: Generalised Boosting Model (GBM), Generalised Linear Models (GLM) y Multiple Adaptive Regression Splines (MARS), por lo que estos tres algoritmos se usaron para la modelación de las 46 especies.



**Figura 1.** Prueba de la tasa de omisión para medir el desempeño de los nueve algoritmos usados en las seis especies como prueba piloto.



**Figura 2.** Prueba de ROC parcial para medir el desempeño de los nueve algoritmos usados en las seis especies como prueba piloto.

### Validación de los modelos

Las pruebas de validación para la mayoría de las especies fueron satisfactorias, ya que los valores de omisión se mantuvieron por debajo de 0.1 y los de TSS por arriba de 0.75 (Cuadro 3). Los modelos de las especies que manifestaron bajo desempeño fueron: la salamandra *Aneides lugubris*, la culebra *Eridiphas slevini* y las plantas *Dalea carthagenensis* y *Chiococca alba* (Cuadro 3). Por ello, se recomienda cautela en la interpretación de los resultados para estas tres especies.

**Cuadro 3.** Pruebas de validación TSS y tasa de omisión de los modelos de nicho para las especies analizadas y los tres algoritmos de modelación utilizados.

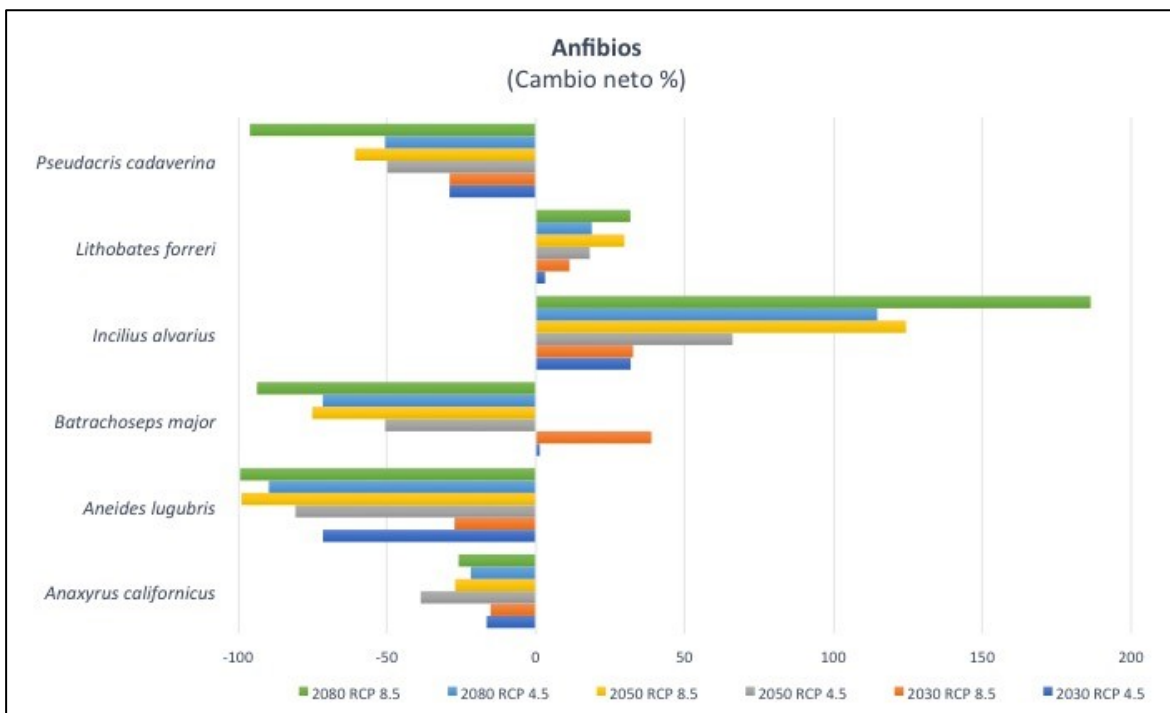
	GBM		GLM		MARS		
	TSS	Omisión	TSS	Omisión	TSS	Omisión	
<b>Anfibios</b>	<i>Anaxyrus californicus</i>	0.99	0.90	0.98	0.00	0.85	0.99
	<i>Aneides lugubris</i>	0.50	0.50	0.50	0.50	0.49	1.00
	<i>Batrachoseps major</i>	1.00	0.00	0.99	0.00	1.00	0.00
	<i>Incilius alvarius</i>	0.91	0.02	0.88	0.02	0.90	0.05
	<i>Lithobates forreri</i>	0.85	0.03	0.85	0.03	0.83	0.03
	<i>Pseudacris cadaverina</i>	0.97	0.00	0.86	0.04	0.97	0.00
<b>Reptiles</b>	<i>Aspidoscelis hyperythra</i>	0.93	0.00	0.85	0.10	0.88	0.06
	<i>Crotalus terastes</i>	0.84	0.00	0.84	0.07	0.84	0.03
	<i>Crotalus tigris</i>	0.81	0.12	0.84	0.07	0.84	0.05
	<i>Crotaphytus dickersonae</i>	0.99	0.00	0.99	0.00	0.99	0.00
	<i>Ctenosaura pectinata</i>	0.86	0.03	0.85	0.03	0.82	0.02
	<i>Eridiphas slevini</i>	0.65	0.33	0.96	0.00	0.50	0.50
	<i>Masticophis bilineatus</i>	0.82	0.01	0.75	0.09	0.75	0.06
	<i>Petrosaurus thalassinus</i>	0.92	0.04	0.84	0.13	0.95	0.00
	<i>Phyllodactylus homolepidurus</i>	0.92	0.06	0.91	0.06	0.90	0.06
	<i>Phyllodactylus unctus</i>	0.99	0.00	0.97	0.02	0.99	0.00
	<i>Phyllodactylus xanti</i>	0.88	0.03	0.89	0.05	0.87	0.07
<i>Phyllorhynchus decurtatus</i>	0.87	0.02	0.87	0.03	0.87	0.03	
<b>Aves</b>	<i>Egretta tricolor</i>	0.88	0.01	0.86	0.04	0.87	0.04
	<i>Pelecanus occidentalis</i>	0.87	0.03	0.86	0.05	0.85	0.04
	<i>Ptychoramphus aleuticus</i>	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
	<i>Sula sula</i>	0.97	0.00	0.97	0.00	0.57	0.43
	<i>Sula leucogaster</i>	0.94	0.01	0.95	0.01	0.94	0.01
	<i>Sula nebouxi</i>	0.93	0.02	0.94	0.02	0.94	0.01
	<i>Synthliboramphus traverii</i>	0.95	0.00	0.98	0.00	0.98	0.00
<b>Mamíferos</b>	<i>Chaetodipus arenarius</i>	0.94	0.01	0.86	0.09	0.95	0.00
	<i>Chaetodipus baileyi</i>	0.88	0.00	0.81	0.01	0.88	0.00
	<i>Chaetodipus penicillatus</i>	0.86	0.02	0.87	0.00	0.86	0.01
	<i>Lepus alleni</i>	0.85	0.06	0.87	0.02	0.86	0.02
	<i>Myotis vivesi</i>	0.99	0.00	1.00	0.00	0.99	0.00
	<i>Neotoma lepida</i>	0.88	0.01	0.88	0.04	0.90	0.01
	<i>Peromyscus truei</i>	0.95	0.03	0.95	0.00	0.97	0.00
	<i>Peromyscus merriami</i>	0.86	0.07	0.85	0.04	0.88	0.04
	<i>Reithrodontomys spectabilis</i>	1.00	0.00	0.99	0.00	1.00	0.00
	<i>Spermophilus tereticaudus</i>	0.89	0.02	0.88	0.02	0.87	0.02
<b>Plantas</b>	<i>Bunchosia palmeri</i>	0.87	0.05	0.84	0.02	0.83	0.02
	<i>Carlwrightia arizonica</i>	0.80	0.04	0.76	0.11	0.76	0.03
	<i>Chiococca lba</i>	0.69	0.08	0.66	0.14	0.65	0.06
	<i>Dalea arthagenensis</i>	0.66	0.04	0.69	0.04	0.67	0.12
	<i>Echites yucatanensis</i>	0.89	0.04	0.83	0.08	0.86	0.08
	<i>Elaeodendron trichotomum</i>	0.76	0.05	0.75	0.10	0.81	0.14
	<i>Hofmeisteria fasciculata</i>	0.97	0.00	0.84	0.10	0.97	0.00
	<i>Melicoccus liviaeformis</i>	0.90	0.04	0.91	0.03	0.92	0.02
	<i>Myriocarpa longipes</i>	0.83	0.06	0.80	0.11	0.82	0.04
	<i>Opuntia karwinskiana</i>	0.85	0.10	0.83	0.10	0.84	0.10
	<i>Pachycereus pecten-aboriginum</i>	0.83	0.03	0.81	0.07	0.80	0.08



## Modelos de distribución potencial actual y futura

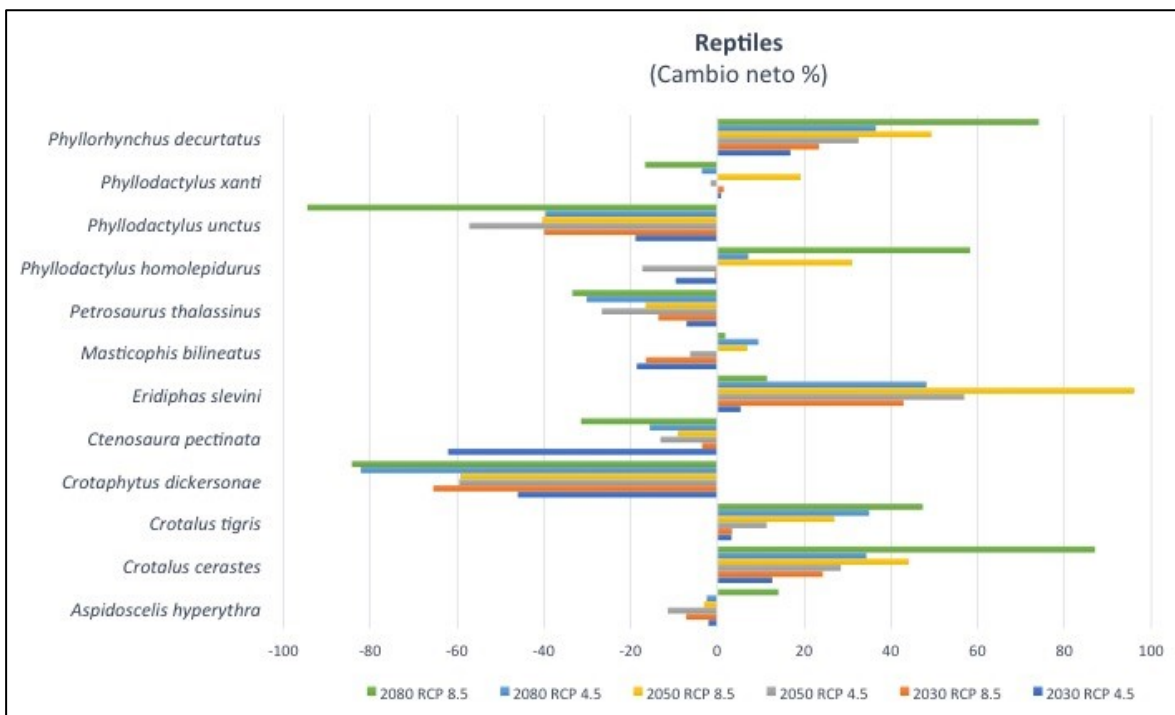
Los modelos de distribución presente y al futuro permiten observar algunos patrones generales. En primer lugar, en todos los grupos taxonómicos hay algunas especies que muestran aumentos y otras que muestran reducciones en las áreas de distribución potencial futura, bajo cualquiera de los escenarios. De las 46 especies analizadas, 22 mostraron una clara tendencia a reducir sus áreas de distribución potencial, 19 aumentaron y en las 5 restantes sus patrones no fueron consistentes, puesto que en algunos escenarios mostraron pérdidas y en otros ganancias (Figs. 3-7). Las aves y los anfibios fueron los grupos taxonómicos más afectados, en donde el 71 y 66% de sus especies, respectivamente, mostraron pérdida de área de distribución potencial. Por otro lado, las plantas y los mamíferos fueron los grupos taxonómicos en donde hubo una mayor proporción de especies que ganaron área, con 54 y 50%, respectivamente.

En anfibios, cuatro de las seis especies mostraron una tendencia a perder área de distribución potencial al futuro. En particular, los diversos escenarios futuros para la salamandra *Aneides lugubris* mostraron una pérdida de entre 27 y 99% de su distribución potencial actual, y para la rana *Pseudacris cadaverina* las reducciones fueron de 29 a 96%, dependiendo del escenario (Fig. 3). Sin embargo, el modelo de nicho de *A. lugubris* mostró bajo desempeño de acuerdo a las pruebas de validación (Cuadro 3), por lo que se sugiere tomar este resultado con cautela. Por otro lado, dos especies presentaron una tendencia a aumentar sus áreas de distribución al futuro: el sapo *Incilius alvarius* presentó aumentos que van del 31 al 186%, dependiendo del escenario, mientras que para la rana *Lithobates forreri* los aumentos fueron del 3 al 31% (Fig. 3). En el estudio de Ureta (2016), todos los anfibios en común con este estudio presentaron un balance positivo, ganando más área potencial de la que perdieron.



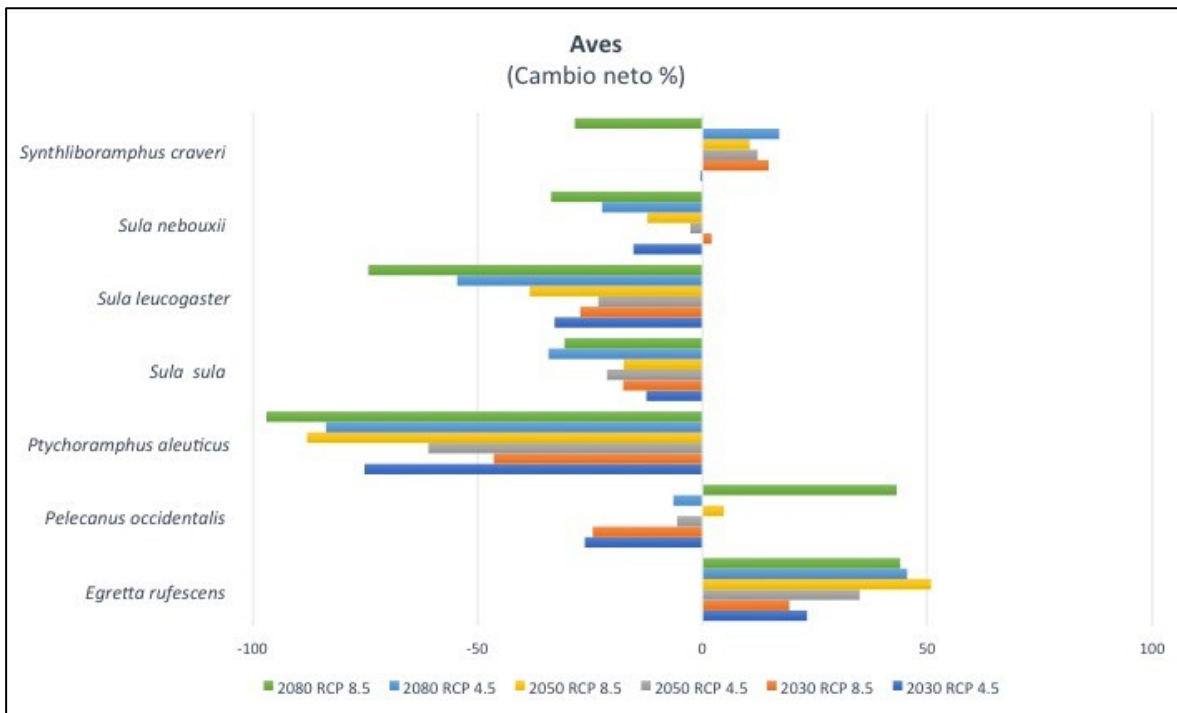
**Figura 3.** Cambio neto en la proporción del área de distribución potencial en escenarios futuros con respecto al presente para las seis especies de anfibios analizadas en este estudio.

En el caso de los reptiles, de las 12 especies estudiadas, cinco presentaron una tendencia a perder área de distribución potencial hacia el futuro, cuatro tienden a ganar y tres (los geckos *Phyllodactylus xanti*, *P. homolepiduris* y la serpiente *Masticophis bilineatus*) mostraron patrones inconsistentes, es decir, bajo algunos escenarios ganaron y bajo otros perdieron área de distribución potencial (Fig. 4). De las especies que se podrían ver más desfavorecidas, la lagartija *Crotaphytus dickersonae* y el gecko *Phyllodactylus uncus* son las que en general perderían más área de distribución potencial, con reducciones de entre 46 y 85% y 19 y 94%, respectivamente, con respecto a su distribución potencial actual (Fig. 4). Estos números son más extremos que lo observado por Ureta (2016), en donde estas dos especies muestran reducciones potenciales máximas de 35 y 46%, respectivamente. Las especies favorecidas por el cambio climático serían las serpientes *Eridiphas selvini*, *Crotalus cerastes* y *Phyllorhynchus decurtatus* con aumentos de 5 a 96%, de 24 a 87% y de 16 a 74%, respectivamente, con respecto a su área de distribución potencial actual (Fig. 4).



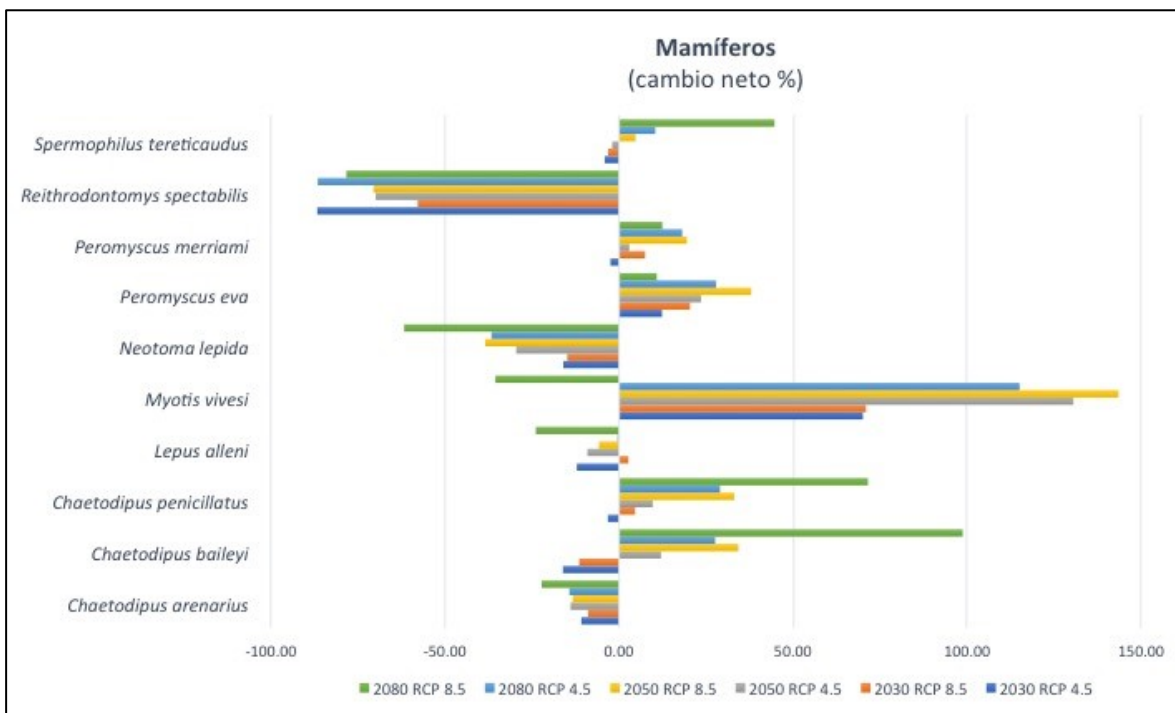
**Figura 4.** Cambio neto en la proporción del área de distribución potencial en escenarios futuros con respecto al presente para las 12 especies de reptiles analizadas en este estudio.

Para las 7 especies de aves, los resultados mostraron que sólo en dos especies, *Egreta rufescens* y *Synthliboramphus craveri*, se observó una tendencia a aumentar sus distribuciones potenciales, de 19 a 45% para la primera y de 14 a 17% para la segunda (Fig. 5). Estos aumentos son mucho más conservadores que los observados por Ureta (2016), quien para estas dos especies encontró incrementos netos de 98 y 744%, respectivamente. Las cinco especies restantes mostraron reducciones en sus áreas de distribución potencial, siendo *Ptycoramphus aleuticus* la más drástica (de 46 a 97%), seguida por *Sula leucogaster*, con una pérdida de 23 a 74% de su área de distribución potencial (Fig. 5).



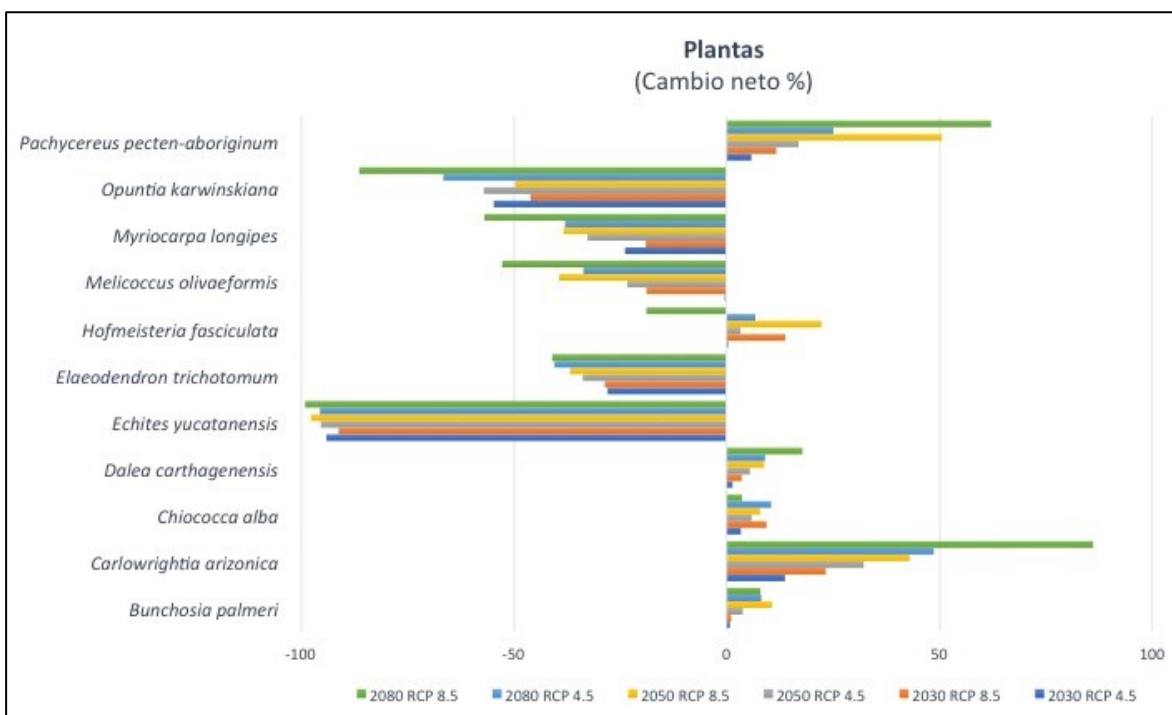
**Figura 5.** Cambio neto en la proporción del área de distribución potencial en escenarios futuros con respecto al presente para las siete especies de aves analizadas en este estudio.

De las 10 especies de mamíferos analizadas, cuatro mostraron una tendencia a reducir sus áreas de distribución potencial, otras cinco a aumentarla y una, la ardilla *Spermophilus tereticaudus*, con un patrón indefinido (Fig. 6). Las especies que más área de distribución potencial podrían perder son el ratón *Reithrodontomys spectabilis* con 57 a 83% de pérdida y la rata *Neotma lepida*, con 14 a 61% (Fig. 6). Las especies que podrían ganar área de distribución potencial fueron el murciélago *Myotis vivesi*, con incrementos de entre 70 y 143%, y el ratón *Chaetodipus baileyi*, con aumentos de 12 a 98% (Fig. 6). Es interesante que para esta última especie, Ureta (2016) observó una tendencia opuesta, siendo la única especie de los mamíferos que analizó para la que el balance resultó negativo, con una reducción neta de 15% en el escenario más drástico.



**Figura 6.** Cambio neto en la proporción del área de distribución potencial en escenarios futuros con respecto al presente para las 10 especies de mamíferos analizadas en este estudio.

Finalmente, de las 11 especies de plantas analizadas, los resultados indican que cinco mostraron una reducción de sus áreas de distribución potencial y seis presentaron aumentos (Fig. 7). Las especies más afectadas son *Echites yucatanensis*, con reducciones de entre 91 y 99% de su distribución potencial, lo que coincide con lo observado por Ureta (2016), y *Opuntia karwinskiana*, con 45 a 86% de pérdida de área de distribución potencial (Fig. 7). Por el contrario, las especies con mayor aumento en sus áreas de distribución potencial fueron *Carlowrightia arizonica*, con incrementos de 13 a 86%, y *Pachycereus pecten-aboriginus*, que aumentó de 5 a 62%. Esta última especie también presentó un balance positivo neto de 296% en el escenario más drástico analizado por Ureta (2016).



**Figura 7.** Cambio neto en la proporción del área de distribución potencial en escenarios futuros con respecto al presente para las 11 especies de plantas analizadas en este estudio.

En general, se observan algunas discrepancias importantes de los resultados obtenidos en este estudio con respecto a los obtenidos por Ureta (2016). Esto puede deberse al protocolo y los algoritmos de modelación que se usaron en cada uno de los estudios. Las diferencias metodológicas más importantes entre los dos estudios fueron las climatologías utilizadas y los algoritmos implementados para generar los modelos.

En el estudio de Ureta (2016), las climatologías usadas para generar los modelos en el presente fueron las generadas por Fernández Eguiarte et al. (2014), que comprenden valores de clima de 1961-2000. En el caso de este análisis, usamos una actualización de esa base de datos que tiene una cobertura temporal un poco mayor (1950-2000; Fernández Eguiarte 2015). Otra fuente de variación fueron los escenarios al futuro usados en cada estudio. Ureta (2016) usó el ensamble ponderado denominado REA (*Reliability Ensemble Averaging*, en inglés), que combina 14 modelos generales de circulación (Cavazos et al. 2015). En nuestro caso modelamos individualmente con cuatro modelos generales de circulación (MGC): MPI-ESM-LR, GFDL-CM3, HADGEM2-ES y CNRM, por ser los que mejor representan las tendencias climáticas históricas del país, de acuerdo con el CCAUNAM-INECC (Fernández Eguiarte et al. 2015). La diferencia en las climatologías del presente y del futuro sin duda generan resultados diferentes (Heikkinen et al. 2006).

Sin embargo, es posible que la fuente más importante de las diferencias observadas en los dos estudios se deba a los algoritmos de modelación y las estrategias de modelación utilizados. En el análisis realizado por Ureta (2016), los algoritmos utilizados fueron dos: MaxEnt y GAM, en el caso de este estudio usamos tres algoritmos diferentes a los de Ureta (2016): GBM, GLM y MARS. En ambos estudios se realizó un ensamble de los mapas generados por cada uno de los algoritmos. Se ha demostrado que los algoritmos funcionan diferente cuando se transfieren a escenarios alternativos al de calibración (i.e., con el que se genera el modelo de nicho), como los escenarios de cambio climático, aún cuando su desempeño en el escenario de calibración sea bueno y semejante entre sí (Pearson et al. 2006). Esto se debe al efecto que tienen los climas no análogos en los modelos producidos por los algoritmos, pues cuando un algoritmo se enfrenta a una combinación climática para la cual no está entrenada, su estimación de probabilidad de presencia o favorabilidad ambiental de ese sitio se guía por los criterios programáticos con los que se desarrolló ese algoritmo, y éstos pueden ser muy variados. El resultado de esto es que dos algoritmos pueden presentar resultados contrastantes para el mismo conjunto de datos de entrada, como en el caso del estudio de Ureta (2016) y éste. Un problema con esta situación es que cuando se trata de estudios proyectivos a escenarios futuros, no hay posibilidades de saber cual algoritmo es el que mejor se desempeña porque no hay datos para comprobarlo. La forma de investigarlo es mediante estudios retrospectivos; es decir, modelar hacia el pasado, o del pasado al presente, con la finalidad de tener datos en los dos tiempos para poder hacer validaciones de los modelos (Aguirre-Gutiérrez et al. 2013).

### **Cambio climático en las islas de mayor tamaño**

La biodiversidad en islas es intrínsecamente más vulnerable comparada con su contraparte continental debido a su relativamente bajo tamaño poblacional, dada la restricción de espacio para expandir sus poblaciones. Además, las perturbaciones, como el impacto de las especies invasoras o los patógenos, se ven frecuentemente exacerbadas en las islas, porque la propagación de estos agentes puede ser más fácil en las islas que en el continente (Blackburn et al. 2004).

Para conocer el posible impacto del cambio climático en 11 islas de mayor tamaño de México realizamos, en un SIG, una sobreposición de los mapas de las 46 especies analizadas, tanto para el presente como para cada tiempo y escenario futuro, con el propósito de generar un mapa de riqueza potencial para cada escenario. En estos mapas de riqueza potencial el valor de cada pixel representa el número de especies que su presencia fue predicha en dicho pixel. Lo que hicimos fue comparar las riquezas potenciales bajo los distintos escenarios de cambio climático con respecto a la riqueza potencial del presente. Las islas consideradas fueron:

1. Pacífico: Guadalupe, Cedros, Marías y Socorro.
2. Golfo de California: Tiburón, Ángel de la Guarda, Carmen, San José, Espíritu Santo y Cerralvo.

### 3. Caribe: Cozumel.

Es muy importante aclarar que esta riqueza potencial no refleja necesariamente el número de especies que en realidad existen en las islas, pues un modelo puede predecir condiciones favorables para la presencia de una especie en una isla determinada, pero en verdad no encontrarse allí por razones históricas, biogeográficas o ecológicas (Peterson et al. 2011). Los modelos de nicho no deben de interpretarse como modelos de distribución geográfica, pues lo que hacen es identificar sitios con las condiciones ambientales apropiadas para que una especie se pueda establecer, pero no necesariamente significa que se ha establecido. Entonces, las riquezas potenciales generalmente sobreestiman la riqueza real (Aranda & Lobo 2011), pero aún así tienen un valor informativo, pues aunque no sería correcto interpretar los cambios en las riquezas potenciales a través de los escenarios futuros como una pérdida o ganancia de especies –como ocurre en el continente–, los cambios en las riquezas potenciales permiten tener una idea del nivel de sensibilidad de cada isla al cambio climático. Por ejemplo, si una isla pierde un 60% de sus especies potenciales bajo un escenario de cambio climático y otra sólo 20%, no quiere decir que la primera verá más extinciones en el futuro que la segunda, pero sí que es más sensible a esos cambios climáticos y sus efectos podrían ser más drásticos. De esta forma, los modelos de nicho son una herramienta útil si se les da una interpretación adecuada. Una vez aclarado este punto, presentamos los resultados de la riqueza potencial de 11 islas mayores de México.

En términos de la riqueza potencial total, los modelos indican, en primer lugar, que en general hay una reducción del número de especies en los diferentes escenarios y tiempos; es decir, para la mayoría de las islas el número potencial de especies disminuye o se mantiene, pero casi nunca aumenta, excepto para Isla Socorro en un escenario, Guadalupe en dos escenarios y Ángel de la Guarda en tres escenarios (Cuadro 4). Además, estos aumentos en el número potencial de especies fueron de menor magnitud que las disminuciones. Segundo, las islas del Pacífico mostraron menores efectos negativos que las islas del Golfo de California y Cozumel, en el Caribe. Las islas con una mayor proporción de pérdida potencial de especies fueron Isla Carmen (53.3%) y Tiburón (46.4%) en el Golfo de California, y Cozumel (50%), en el Caribe (Cuadro 4).

A nivel de grupos taxonómicos, los anfibios fueron los menos representados en las islas, con un máximo de dos especies potenciales en Isla Guadalupe y Cerralvo. Tal vez por esta misma razón éste fue el grupo que observó menos pérdidas de especies potenciales en los diferentes escenarios de cambio climático. Guadalupe fue la única isla que presentó un incremento potencial de especies en tres grupos: reptiles, aves y mamíferos en la mayoría de los escenarios (Cuadro 4). Finalmente, las aves y los mamíferos fueron los grupos con mayores pérdidas potenciales de especies, particularmente en las islas del Golfo de California (Cuadro 4).



**Cuadro 4.** Riqueza potencial de especies por grupos taxonómicos y total, para el presente y los escenarios futuros en 11 islas de mayor tamaño en México.

Región	Nombre	Presente	RCP 5.5		RCP 8.5			
			2015-2039	2045-2069	2075-2099	2015-2039	2045-2069	2075-2099
<b>Anfibios</b>								
Pacífico	Isla Guadalupe	2	1	0	1	1	0	1
	Isla Cedros	0	0	0	0	0	0	0
	Islas Mariás	1	1	1	1	1	2	1
	Isla Socorro	0	1	1	1	1	1	1
Golfo de California	Isla Tiburón	1	1	1	1	1	1	1
	Isla Ángel de la Guarda	0	0	1	1	0	1	1
	Isla Carmen	0	0	0	0	0	0	0
	Isla San José	1	2	2	2	2	2	1
	Isla Espíritu Santo	2	2	2	2	2	2	1
	Isla Cerralvo	2	2	2	2	2	2	1
Caribe	Cozumel	0	0	0	0	0	0	0
<b>Reptiles</b>								
Pacífico	Isla Guadalupe	4	4	5	5	5	4	3
	Isla Cedros	6	6	5	6	5	5	6
	Islas Mariás	3	3	3	3	3	4	2
	Isla Socorro	0	0	0	0	0	0	0
Golfo de California	Isla Tiburón	11	7	7	6	8	7	6
	Isla Ángel de la Guarda	5	6	6	6	6	7	6
	Isla Carmen	11	8	8	8	8	8	6
	Isla San José	9	7	7	8	7	7	4
	Isla Espíritu Santo	9	8	7	8	7	8	4
	Isla Cerralvo	9	8	8	8	8	8	7
Caribe	Cozumel	0	0	0	0	0	0	0
<b>Aves</b>								
Pacífico	Isla Guadalupe	4	4	4	4	4	5	5
	Isla Cedros	6	6	6	5	5	5	4
	Islas Mariás	6	6	5	6	6	5	5
	Isla Socorro	6	6	6	6	6	6	5
Golfo de California	Isla Tiburón	5	4	4	2	4	3	1
	Isla Ángel de la Guarda	5	4	4	4	4	4	2
	Isla Carmen	5	5	6	4	5	5	2
	Isla San José	6	5	5	4	4	5	3
	Isla Espíritu Santo	6	5	5	4	6	5	4
	Isla Cerralvo	5	5	4	3	4	3	3
Caribe	Cozumel	4	2	2	3	2	3	3
<b>Mamíferos</b>								
Pacífico	Isla Guadalupe	2	3	3	3	3	3	3
	Isla Cedros	4	4	4	4	4	4	4
	Islas Mariás	2	1	1	1	1	0	1
	Isla Socorro	3	2	2	2	2	2	1
Golfo de California	Isla Tiburón	9	9	8	8	8	8	4
	Isla Ángel de la Guarda	6	6	6	5	7	6	4
	Isla Carmen	9	6	6	6	6	6	5
	Isla San José	6	4	4	5	6	4	5
	Isla Espíritu Santo	6	5	5	5	6	5	4
	Isla Cerralvo	7	6	5	5	5	5	5
Caribe	Cozumel	1	0	0	0	0	0	0
<b>Plantas</b>								
Pacífico	Isla Guadalupe	3	3	2	2	2	3	4
	Isla Cedros	1	0	0	0	1	1	1
	Islas Mariás	8	7	7	6	7	7	6
	Isla Socorro	5	5	5	5	5	6	4
Golfo de California	Isla Tiburón	2	1	0	1	2	1	1
	Isla Ángel de la Guarda	1	1	1	1	1	1	1
	Isla Carmen	5	3	3	3	3	3	3
	Isla San José	3	3	3	3	3	4	4
	Isla Espíritu Santo	3	3	3	4	3	4	4
	Isla Cerralvo	3	3	3	3	3	3	3
Caribe	Cozumel	3	2	2	1	2	1	1
<b>TOTAL</b>								
Pacífico	Isla Guadalupe	15	16	14	15	15	15	16
	Isla Cedros	17	13	15	15	15	15	15
	Islas Mariás	20	17	17	17	18	18	15
	Isla Socorro	14	14	14	14	14	15	11
Golfo de California	Isla Tiburón	28	19	20	18	23	20	13
	Isla Ángel de la Guarda	17	17	18	17	18	19	14
	Isla Carmen	30	20	23	21	22	22	16
	Isla San José	25	22	21	22	22	22	17
	Isla Espíritu Santo	26	24	22	23	24	24	17
	Isla Cerralvo	26	18	22	21	22	21	19
Caribe	Cozumel	8	4	4	4	4	4	4

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las posibles consecuencias del cambio climático para las especies no es consistentemente negativo. Así como hay especies que se podrían ver seriamente afectadas, hay otras que se verían beneficiadas. En este estudio el balance fue relativamente simétrico, pues de las especies analizadas, 22 presentaron una tendencia a reducir sus áreas potenciales de distribución y 19 a incrementarlas.

Las aves y los anfibios fueron los grupos taxonómicos con el mayor número de especies con reducciones de área de distribución potencial, y los mamíferos y plantas los grupos con más especies que mostraron aumentos.

Las especies que podrían ser potencialmente más afectadas por el cambio climático fueron: anfibios: *Aneides lugubris*, *Pseudacris cadaverina*; reptiles: *Crotaphytus dickersonae* y *Phyllodactylus uncus*; aves: *Ptycoramphus aleuticus* y *Sula leucogaster*; mamíferos: *Reithrodontomys spectabilis* y *Neotma lepida*; y plantas: *Echites yucatanensis* y *Opuntia karswinskiana*.

Las especies potencialmente beneficiadas con los cambios en el clima fueron: anfibios: *Incilius alvarius* y *Lithobates forreri*; reptiles: *Eridiphas selvini*, *Crotalus cerastes* y *Phyllorhynchus decurtatus*; aves: *Egreta rufescens* y *Synthliboramphus craveri*; mamíferos: *Myotis vivesi* y *Chaetodipus bailey*; y plantas: *Carlowrightia arizonica* y *Pachycereus pecten-aboriginus*.

En las 11 islas de mayor tamaño de México analizadas en este estudio la tendencia general fue negativa; es decir, los modelos mostraron mayores pérdidas que ganancias potenciales de especies en los escenarios de cambio climático futuro. Las islas del Golfo de México y el Caribe fueron las regiones en donde los efectos del cambio climático podrían ser más severos. En particular en Carmen, Tiburón y Cozumel.

Con base en los resultados de este análisis, recomendamos lo siguiente:

Establecer un sistema de monitoreo de las poblaciones de las especies que se han identificado como más sensibles a los posibles efectos del cambio climático. Se recomienda la toma de datos demográficos básicos que permitan conocer si las poblaciones se encuentran estables o presentan una tendencia a declinar.

Establecer observatorios de la biodiversidad en las islas más sensibles que permitan detectar señales tempranas de cambio en las especies que allí habitan, como cambios demográficos o fenológicos.

Llevar a cabo análisis históricos del comportamiento del clima en las estaciones climáticas en o cercanas a las islas en todas las regiones insulares del país (Pacífico Norte, Pacífico Sur, Golfo de California, Istmo de Tehuantepec, Golfo de México y Caribe), con el fin de detectar las zonas y las islas en donde hay señales claras de cambios en el clima.

Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático - INECC

Periférico Sur 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, Coyoacán, México D.F.

Promover el estudio de la biodiversidad insular para aumentar el número de registros de las especies en las islas, que permita llevar a cabo modelaciones más finas y confiables.

Incorporar los escenarios de aumento del nivel del mar a los escenarios futuros en el estudio de las islas, pues reducciones en el área insular puede tener efectos importantes en la biodiversidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre-Gutiérrez, J., L.G. Carvalheiro, C. Polce, E.E. van Loon, N. Raes, M. Reemer & J.C. Biesmeijer. 2013. Fit-for-purpose: species distribution model performance depends on evaluation criteria—Dutch hoverflies as a case study. *PLoS one* 8(5): e63708.
- Aguirre-Muñoz, A., D. A. Croll, C. J. Donlan, R. W. Henry III, M. A. Hermsillo, G. R. Howald, B. S. Keitt, L. Luna-Mendoza, M. Rodríguez-Malagón & L. M. Salas-Flores. 2008. High-impact conservation: invasive mammal eradications from the islands of western Mexico. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 37:101-107.
- Aguirre Muñoz, A., J. Bezaury Creel, H. De la Cueva, I. March Mifust & E. Peters Recagno. 2009. Islas de México. Un recurso estratégico. INECC, SEMARNAT, The Nature Conservancy, Conservación de Islas, CICESE.
- Allouche, O., A. Tsoar, & R. Kadmon. 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology* 43(6): 1223-1232.
- Aranda, S.C. and J.M. Lobo. 2011. How well does presence - only - based species distribution modelling predict assemblage diversity? A case study of the Tenerife flora. *Ecography* 34(1): 31-38.
- BirdLife International (BI) & NatureServe (NS). 2015. *Bird species distribution maps of the world*. BirdLife International, Cambridge, UK and NatureServe, Arlington, USA.
- Blackburn, T.M., P. Cassey, R.P. Duncan, K.L. Evans, & K.J. Gaston. 2004. Avian extinction and mammalian introductions on oceanic islands. *Science* 305(5692): 1955-1958.
- Buisson L., Thuiller W., Casajus N., Lek S. & Grenouillet, G. 2010. Uncertainty in ensemble forecasting of species distribution. *Global Change Biology* 16: 1145-1157.
- Castro-Franco, R, & G. Gaviño. 1990. Reptiles de la isla La Peña, Nayarit, México. *Anales del Instituto de Biología, UNAM. Serie Zoología* 61: 175-187.
- Cavazos, T., J. A. Salinas, B. Martínez, G. Colorado, P. De Grau, R. Prieto González, A. C. Conde Álvarez, A. Quintanar Isaías, J. S. Santana Sepúlveda, R. Romero Centeno, M. E. Maya

Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático - INECC

Periférico Sur 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, Coyoacán, México D.F.

- Magaña, J. G. Rosario De La Cruz, Ma. Del R. Ayala Enríquez, H. Carrillo Tlazazanatza, O. Santiesteban Y M. E. Bravo. 2013. Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional. Informe Final del proyecto al INECC. 150 Pp. Con Resultados Disponibles En:  
[Http://Escenarios.Inecc.Gob.Mx/Index2.Html](http://Escenarios.Inecc.Gob.Mx/Index2.Html)
- Ceballos, G. and Oliva, G., 2005. *Los mamíferos silvestres de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2016. *Biodiversidad Mexicana*. [www.biodiversidad.gob.mx](http://www.biodiversidad.gob.mx).
- Fernandez-Eguiarte, A., J. Zavala-Hidalgo, R. Romero-Centeno & I. Trejo- Vázquez. 2014. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Fernandez-Eguiarte, A., J. Zavala-Hidalgo, R. Romero-Centeno & I. Trejo- Vázquez. 2015. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Reserva al Título: INDAUTOR en trámite. Obtenido de: <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>.
- Fielding, A.H. & J.F. Bell. 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation* 24: 38-49.
- Flores-Villela, O. 1993. Herpetofauna Mexicana: Lista anotada de las especies de anfibios y reptiles de México, cambios taxonómicos recientes, y nuevas especies. *Carnegie Museum of Natural History. Special Publication* 17: 1-73.
- Grismer, L. 1999. Checklist of Amphibians and Reptiles on Islands in the Gulf of California, Mexico. *Bulletin of the Southern California Academy of Sciences* 98: 45-56.
- Grismer, L.L. 2002. *Amphibians and reptiles of Baja California, including its Pacific islands and the islands in the Sea of Cortés*. Vol. 4. University of California Press. Berkely and Los Angeles, USA.
- Guzmán, U., S. Arias & P. Dávila. 2003. Catálogo de cactáceas mexicanas. CONABIO-UNAM. México, D.F.
- Harter, D.E., S.D. Irl, B. Seo, M.J. Steinbauer, R. Gillespie, K.A. Triantis & C. Beierkuhnlein. 2015. Impacts of global climate change on the floras of oceanic islands—Projections, implications

- and current knowledge. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 17(2): 160-183.
- Heikkinen, R.K., M. Luoto, M.B. Araújo, R. Virkkala, W. Thuiller, & M.T. Sykes. 2006. Methods and uncertainties in bioclimatic envelope modelling under climate change. *Progress in Physical Geography* 30(6): 751-777.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G. & Jarvis, A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 25(15): 1965-1978.
- Hijmans, R. J., S. Phillips, J. Leathwick, & J. Elith. 2015. Dismo: Species distribution modeling. R package version 1.0-12. The R Foundation for Statistical Computing, Vienna <http://cran.r-project.org>.
- Huntley, B., Collingham, Y.C., Willis, S.G. & Green, R. E. 2008. Potential impacts of climate change on European breeding birds. *PlosOne* 3: e1439.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México). 2010. Norma Técnica para la elaboración de Metadatos Geográficos (NTM). Diario Oficial de la Federación.
- Jeschke, J.M. & D.L. Strayer. 2008. Usefulness of bioclimatic models for studying climate change and invasive species. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1134 (1): 1-24.
- Kays, R.W. & D.E. Wilson. 2009. *Mammals of North America*. Princeton University Press, Princeton, N.J.
- Parmesan, C., & G. Yohe. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421 (6918): 37-42.
- Pearson, R.G., W. Thuiller, M.B. Araújo, E. Martinez - Meyer, L. Brotons, C. McClean, L. Miles, P. Segurado, T.P. Dawson & D.C. Lees. 2006. Model - based uncertainty in species range prediction. *Journal of Biogeography* 33(10): 1704-1711.
- Peterson, A.T. Ortega-Huerta, M.A., Bartley, J., Sánchez-Cordero, V., Soberón, J. & Buddemeier, R.H. 2002. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature* 416: 626-629.
- Peterson, A.T., M. Papes & J. Soberón. 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling* 213(1): 63-72.
- Peterson, A.T., J. Soberón, R.G. Pearson, R.P. Anderson, E. Martínez-Meyer, M. Nakamura & M.B. Araújo. 2011. *Ecological Niches and Geographic Distributions*. Monographs in Population Biology. Princeton University Press, Princeton, N.J.

- Phillips, S.J. & Dudík, M. 2009. Modeling of species distributions with MaxEnt: New extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31: 161-175.
- Qiao, H., Soberón, J., & Peterson, A.T. 2015. No silver bullets in correlative ecological niche modelling: insights from testing among many potential algorithms for niche estimation. *Methods in Ecology and Evolution* 6(10): 1126-1136.
- Rocchini, D., J. Hortal, S. Lengyel, J.M. Lobo, A. Jiménez-Valverde, C. Ricotta & A. Chiarucci. 2011. Accounting for uncertainty when mapping species distributions: the need for maps of ignorance. *Progress in Physical Geography* 35(2), 211-226.
- Stockwell, D.R.B. & Peters, D.P. 1999. The GARP modelling system: Problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographic Information Systems* 13: 143-158.
- Team, R. C. 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M.B., Sykes, M.T. & Prentice, I.C. 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 102: 8245-8250.
- Thuiller, W., Lafourcade, B., Engler, R. & Araújo, M.B., 2009. BIOMOD—a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography* 32(3): 369-373.
- Ureta SC, C. 2016. Servicios de consultoría para la evaluación de impactos del cambio climático sobre la biodiversidad de las islas de México. Proyecto: 00086487 Plataforma de colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México 2013-2016. PNUD-INECC. México.
- Wilson, D.E. & S. Ruff. 1999. *The Smithsonian book of North American mammals*. Smithsonian Institute, Washington, USA.

## ENTREGABLES

### Listado de especies y registros de presencia

Las localidades revisadas de las especies se entregan en archivos separados por grupos y guardadas en formato plano delimitado por comas (.csv). Son cinco archivos: *Anfibios.csv*, *Aves.csv*, *Mamíferos.csv*, *Reptiles.csv* y *Plantas.csv*. Están ubicados en la carpeta: Registros de presencias por grupo. En el Cuadro 1 se presenta el número de registros únicos por especie.

### Mapas de distribución potencial presente y futura

Los mapas de distribución potencial para el presente y los diferentes escenarios al futuro de las 46 especies se entregan en dos carpetas (PRESENTE y FUTURO), cada una con cinco carpetas separadas por grupo: Anfibios, Aves, Mamíferos, Reptiles y Plantas. Los archivos dentro de cada carpeta presentan la siguiente información para cada especie:

- i. Mapa de distribución potencial para el presente en formato raster (TIF)
- ii. Metadato del mapa de distribución potencial según la Norma Técnica para la Elaboración de Metadatos Geográficos” (INEGI, 2010), en los formatos html, xml y txt.
- iii. Mapa temático en formato PDF, JPG, y MXD

Los archivos de cada especie se identifican con el nombre científico de la especie (género y especie) para los mapas del presente, por ejemplo, *Anaxyrus\_californicus*. En el caso de los mapas al futuro se incluye además un sufijo con el RCP y el horizonte temporal; por ejemplo, *Anaxyrus\_californicus\_45\_30*, en donde 45 se refiere al RCP 4.5 y 30 al horizonte temporal 2030. Se presenta un ejemplo de los 7 archivos principales que corresponde a cada especie para el presente:

1. *Anaxyrus\_californicus.tif* (mapa de distribución potencial en formato raster)
2. *Anaxyrus\_californicus.pdf* (mapa temático)
3. *Anaxyrus\_californicus.jpg* (mapa temático)
4. *Anaxyrus\_californicus.mxd* (cartografía)
5. *Anaxyrus\_californicus.html* (metadato)
6. *Anaxyrus\_californicus.xml* (metadato)
7. *Anaxyrus\_californicus.txt* (metadato)

Para la captura de metadatos se utilizó el Sistema de Captura de Metadatos (SICAM), cliente - servidor, versión 1.0 – Actualizado el 18 de mayo de 2016. Descargado de la página de internet: [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/metadatos/aplicaciones\\_conversion.aspx](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/metadatos/aplicaciones_conversion.aspx). Los archivos que se utilizaron para los mapas temáticos se anexan en las carpetas “1Shape\_basicos” y “6Logos”. A continuación se presenta un ejemplo de los mapas temáticos generados para cada especie.

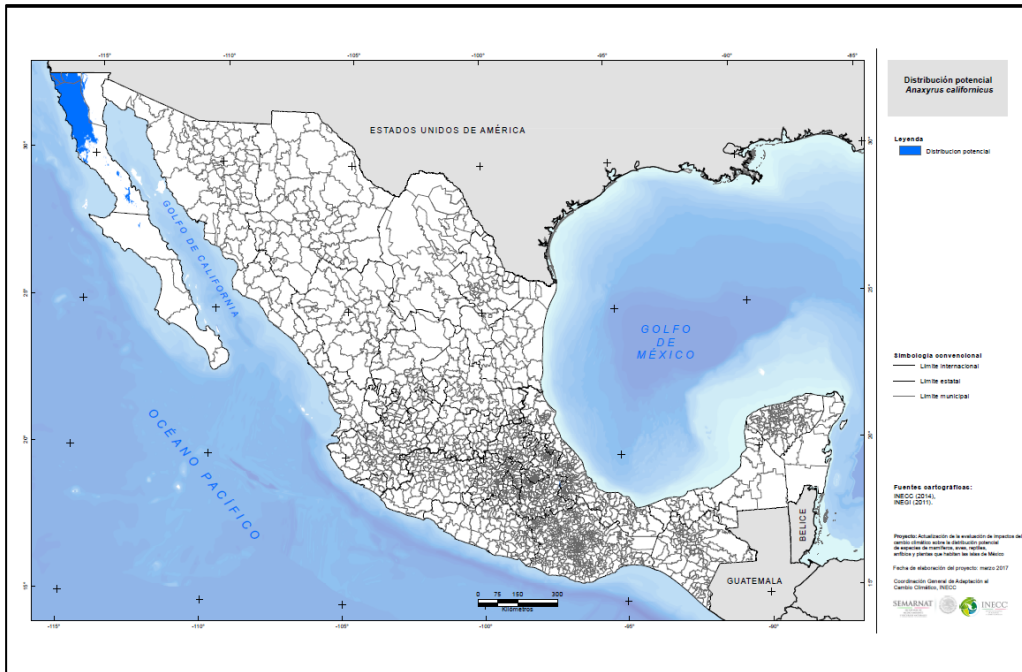
Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático - INECC

Periférico Sur 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, Coyoacán, México D.F.



Ejemplo del mapa de distribución potencial actual de *Anaxyrus californicus*.



Ejemplo del mapa de distribución potencial de *Anaxyrus californicus* bajo el escenario RCP 4.5 hacia 2030.

