



Environment
Canada

Environnement
Canada

SEMARNAT
SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



INECC
INSTITUTO NACIONAL
DE ECOLOGÍA
Y CAMBIO CLIMÁTICO



Al servicio
de las personas
y las naciones

Evaluación de impactos del cambio climático sobre algunas especies relevantes de las islas de México

Informe Final

2016

Documento generado a
partir de los resultados
de la consultoría
realizada por:

Carolina Ureta Sánchez

Serie

2

Evaluación y mapeo de la vulnerabilidad
y los riesgos climáticos



Derechos Reservados © 2018

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)

Montes Urales 440, Colonia Lomas de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo, CP.11000, Ciudad de México.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209, Colonia Jardines en la Montaña, Delegación Tlalpan, CP. 14210, Ciudad de México.

Todos los derechos están reservados. Ni esta publicación ni partes de ella pueden ser reproducidas, almacenadas mediante cualquier sistema o transmitidas, en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, de fotocopiado, de grabado o de otro tipo, sin el permiso previo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

El análisis y las conclusiones aquí expresadas no reflejan necesariamente las opiniones del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, de su Junta Ejecutiva, de sus Estados Miembros, o del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

Documento generado a partir de los resultados de la consultoría realizada por: Carolina Ureta Sánchez.

Citar como:

PNUD México-INECC. 2016. *Evaluación de impactos del cambio climático sobre algunas especies relevantes de las islas de México*. Proyecto 86487 “Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México”. 43 pp. Carolina Ureta Sánchez. México.

Esta publicación fue desarrollada en el marco del proyecto 86487 “Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México” del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

Agradecimiento:

Al gobierno de Canadá a través de Environment Canada por el apoyo financiero recibido para el desarrollo del proyecto 86487 “Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México”, durante 2014-2018. Al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático por el apoyo prestado para el buen desarrollo de la Plataforma.

Contenido

1. ANTECEDENTES	4
1.1 Biodiversidad y cambio climático	4
1.2 Biodiversidad de islas y cambio climático.....	5
2. ANTECEDENTES METODOLÓGICOS	6
2.1 ¿Qué es el famoso modelado de nicho ecológico?.....	6
2.2 ¿Por qué usar la plataforma de BIOMOD para correr los modelos de nicho ecológico? 6	
2.3 ¿Qué variables se utilizan y por qué?.....	7
2.4 Variables del clima	7
2.4.1 19 variables bioclimáticas.....	8
2.5 Clima presente	9
2.6 Clima futuro	9
3. OBJETIVO GENERAL.....	11
4. METODOLOGÍA	11
4.1 Datos de presencia	11
4.2 Escenarios de cambio climático utilizados en la consultoría	12
5. RESULTADOS.....	14
5.1 Impactos del cambio climático sobre los mamíferos de islas mexicanas.....	14
5.1.1 Vulnerabilidad de mamíferos para el futuro cercano (2015-2039).....	14
5.1.2 Vulnerabilidad de mamíferos para el futuro lejano (2075-2099).....	15
5.2 Impactos del cambio climático sobre las aves de islas mexicanas	16
5.3 Impactos del cambio climático sobre las reptiles de islas mexicanas	20
5.4 Impactos del cambio climático sobre anfibios de islas mexicanas.....	22
5.5 Impactos del cambio climático sobre las plantas de islas mexicanas.....	25
6. DISCUSIÓN.....	30
6.1 Discusión General.....	30
6.2 Estudios de caso: Mamíferos.....	30
6.3 Estudio de caso: Aves.....	32
6.4 Estudio de caso: Reptiles	33
6.5 Estudios de caso: Anfibios	34
6.6 Estudios de caso: Plantas	36
6.7 Discusión Metodológica.....	37
7. REFERENCIAS.....	38

Lista de Figuras

Figura 1: Este es el ejemplo de uno de los metadatos para una especie de ave: *Sula sula*. Los campos que se llenaron fueron: Title, Tags, Summary, Description (Abstract) y Credits. El sistema de coordenadas es geográfico con DATUM WGS84. 13

Figura 2. Porcentaje de pérdida de distribución potencial de algunas de las especies de reptiles que se distribuyen en islas y el continente mexicano. Este grafica resume la evaluación que se realizó para dos tiempos; futuro cercano (2015-2039), futuro lejano (2075-2099) y los correspondiente RCP; un escenario medianamente positivo (RCP 4.5) y otro extremo (RCP 8.5) 21

1. ANTECEDENTES

1.1 Biodiversidad y cambio climático

A una escala global, el clima es el principal determinante de la distribución de las especies (Peterson et al. 2011b). Esto se debe a que las especies viven bajo cierto límite de tolerancia climática que puede expandirse a través de procesos de evolución. El clima también facilita a través de ciertos cambios cíclicos que las especies lo utilicen como claves ambientales para iniciar procesos como la floración, la ovoposición, la migración, la hibernación y el apareamiento. Por lo tanto, cuando el clima cambia, las especies responden (Parmesan et al. 2003, Hannah 2011). Por estas razones es que el cambio climático puede tener impactos negativos a cualquier nivel de la biodiversidad (individuos, poblaciones, comunidades y hasta en el funcionamiento de los ecosistemas (McCarty 2001)). Algunos de estos impactos ya se han documentado:

1. Eventos fenológicos en las especies: La migración, la floración o la ovoposición son desencadenados por señales relacionadas con cambios estacionales, como temperatura, precipitación, número de horas de luz, etc. Se ha observado que eventos que inician con la primavera se han adelantado, como la llegada de aves migratorias así como la floración de primavera (Coppack and Pulido 2004). Adicional a esto es importante resaltar que los cambios entre grupos taxonómicos no necesariamente son sincrónicos, lo cual puede tener profundas consecuencias en interacciones ecológicas (Memmott et al. 2007).
2. Disminución en el tamaño de las poblaciones o eventos de extinciones locales: Se ha documentado el declive de las poblaciones de anfibios a nivel global, lo que ha sido asociado en parte a efectos del cambio climático puesto que la temperatura y la humedad son dos componentes que tienen un gran impacto en la biología de este grupo de organismos (Carey and Alexander 2003).
3. Cambio en la abundancia de las especies y en la estructura de las comunidades: Se ha registrado por ejemplo el movimiento o desplazamiento de especies para ubicarse en sitios que estén dentro de sus límites de tolerancia de variables climáticas, con lo que se están colonizando nuevos sitios y se están modificando tanto sus rangos de distribución como sus patrones de abundancia y por consecuencia la estructura de las comunidades (Michalet et al. 2014).

No obstante, el nivel de impacto que el cambio climático pueda tener sobre la biodiversidad dependerá de la magnitud de los cambios, y de qué tan vulnerables son los sistemas al cambio del clima. En el último reporte del IPCC (IPCC 2014) se definen varios conceptos importantes que facilitan el saber qué tanto impacto negativo se puede esperar en un sistema por cuestiones de cambio climático. Introducen un nuevo concepto que es el “riesgo” y define como “una probabilidad de que ocurra un evento o tendencia peligrosa, multiplicado por el impacto de estos eventos o tendencias si es que llegan a ocurrir”. También se puede establecer como una función de la exposición, la vulnerabilidad y el peligro:

$$\text{Riesgo} = f[\text{exposición, vulnerabilidad (suceptibilidad + capacidad adaptativa), peligro}],$$

Donde la exposición se refiere a encontrarse en lugares que serán impactados por el cambio climático, la vulnerabilidad es la predisposición de un sistema a ser impactado por cambios en el clima y peligro es un evento o tendencia física relacionada con el clima que puede causar un daño (IPCC 2014). Lo ideal sería conocer el riesgo de las especies, pero para lograr esto se necesita un conocimiento basto de la biología de cada una de las especies estudiadas y desafortunadamente no se cuenta con esa información. Sin embargo, una primera aproximación sobre la vulnerabilidad concebida como susceptibilidad únicamente (puesto que es muy complicado conocer la capacidad adaptativa de las especies) es lo que se pretende lograr con el presente estudio tomando a las especies de islas mexicanas.

1.2 Biodiversidad de islas y cambio climático

La Secretaría de Gobernación de México define a las islas como “extensión de tierra rodeada de agua que está sobre el nivel del mar” y se calcula que hay alrededor de 3210 islas principales pero un total de 4111 cuerpos insulares que cubren una superficie equivalente al 0.3% del país (Catálogo Insular en proceso de publicación, Secretaría de Gobernación). En términos de diversidad, las islas mexicanas son de los territorios más ricos del mundo (Aguirre Muñoz et al. 2009), pues aunque no representan un territorio muy amplio, son hogar de aproximadamente 2066 especies terrestres con un 10% de endemismos (CONABIO 2015). La mayoría de estas islas se encuentran en el Océano Pacífico y el Golfo de California, pero existen islas en otras partes de la República cubriendo una importante diversidad de climas que van desde el clima templado, hasta el desértico y tropical (CONABIO 2015). En el Catálogo Insular los territorios insulares se clasifican en 7 regiones: Océanos Pacífico Norte, Océano Pacífico Sur, Golfo de California, Golfo de Tehuantepec, Golfo de México, Mar Caribe y Cayos del Sur del Golfo de México y Mar Caribe (Catálogo Insular en proceso de publicación, Secretaría de Gobernación).

Dada la importancia que tienen las islas en términos de diversidad, su conservación debe ser una prioridad. Sin embargo, las islas son sistemas que están siendo fuertemente amenazados por presiones de cambio de uso de suelo, especies introducidas y otros factores como el cambio climático (Aguirre- Muñoz et al. 2008, Aguirre Muñoz et al. 2009). En México se han hecho grandes esfuerzos para reducir la problemática de las especies introducidas (Aguirre Muñoz et al. 2008, Aguirre Muñoz et al. 2009), pero el impacto de otros factores como el cambio climático ha sido poco estudiado. Por lo tanto, es indispensable empezar a generar información que nos de guía de los posibles impactos que el cambio climático pueda tener sobre las especies que habitan estos sistemas tan vulnerables.

Como un paso previo a la creación de planes de manejo es necesario conocer qué especies pudieran estar amenazadas por las condiciones cambiantes en el clima. El modelado de nicho ecológico es una herramienta que permite identificar sitios ambientalmente viables para la permanencia de las especies, ya sea en los sitios que actualmente habita o incluso en otros sitios a mediano y largo plazo. A pesar de la importancia de generar este tipo de información existen dos puntos relevantes que se deben tomar en cuenta: 1) Con el modelado de nicho no es posible modelar inundaciones o incluso la desaparición de islas ocasionado por el aumento en el nivel del mar, lo cual tendría un impacto dramático en la biota. No obstante, con base en la caracterización bioclimática de las islas será posible analizar si para el año 2050 existen áreas continentales o en islas de mayor tamaño donde se predigan condiciones climáticas adecuadas para una especie (es decir, sitios a donde la

especie pudiera migrar o ser trasladada). 2) El segundo punto está relacionado con el hecho de que actualmente se cuenta con datos de biodiversidad de únicamente alrededor del 15% de los cuerpos insulares (CONABIO 2015), sin embargo es necesario comenzar a generar información a pesar de la escasez de datos para facilitar que los tomadores de decisiones tengan de dónde apoyarse. Dado que al modelado de nicho es una primera buena aproximación para conocer tendencias de vulnerabilidad, en este estudio se analizaron 93 especies de vertebrados terrestres y plantas.

2. ANTECEDENTES METODOLÓGICOS

2.1 ¿Qué es el famoso modelado de nicho ecológico?

La definición de nicho ecológico más aceptada en la actualidad es la de Hutchinson (1957), quien fue el primer ecólogo en lograr plasmar en una fórmula matemática el concepto: “El nicho ecológico es el hypervolumen de “n” condiciones”. Por lo tanto, el modelado de nicho ecológico tiene como objetivo caracterizar las condiciones ambientales adecuadas para la especie y delinear en la geografía los lugares donde pueden estar los organismos, es decir el área “abióticamente” adecuada, comúnmente denominada: *distribución potencial* (Soberón 2010). Los modelos de nicho buscan una correlación entre observaciones de presencia (algunas veces también ausencias) y aquellas variables ambientales que no son afectadas por la presencia del especie (Soberón and Nakamura 2009), denominadas *variables no dinámicas* (Peterson et al. 2011a). Históricamente fueron denominadas por Hutchinson como variables *scenopéticas*. Sin embargo, tanto el nombre de variables no dinámicamente ligadas, o aquellas que sirven para poner la escena representan de forma general, los factores ambientales independientes a la densidad de la especie que permiten tasas de crecimiento poblacional positivas (Anderson 2013).

Las diversas aplicaciones que tienen los MNE van desde la prueba de hipótesis biogeográficas (Kreft and Jetz 2010, Fei et al. 2012) para mejorar los atlas florísticos y faunísticos (Koleff and Soberón 2009, Anderson 2013), así como para establecer prioridades de conservación (Rodríguez-Soto 2010, Sánchez-Fernández et al. 2013). También para evaluar el impacto del uso de suelo (Ficetola et al. 2010, Shirley et al. 2013) y el cambio climático sobre la distribución de los organismos (Vanderwel and Purves 2013, Serra-Diaz et al. 2014). En términos de cambio climático esta herramienta ha sido evaluada para predecir posibles impactos negativos sobre especies obteniendo resultados favorables (Araújo et al. 2005). Existen varios algoritmos de modelado de nicho que pueden trabajarse de manera individual (Peterson et al. 2011), pero en este estudio se propone trabajar con BIOMOD que es una plataforma de modelado que incorpora varios algoritmos de manera simultánea.

2.2 ¿Por qué usar la plataforma de BIOMOD para correr los modelos de nicho ecológico?

Análisis recientes han demostrado que las diferencias entre algoritmos pueden ser muy grandes. Esto es particularmente cierto cuando se utilizan modelos para transferir las

condiciones presentes a condiciones climáticas futuras análogas y no análogas (Araújo and Pearson 2005, Williams and Jackson 2007). Por esta razón Araújo y New (2007), propusieron un marco conceptual en el que buscaban reducir la variación asociadas a los algoritmos en los análisis de cambio climático. En este marco apoyan el uso de múltiples algoritmos para predicciones hacia el futuro, pero proponen que la variación en las respuestas debe ser consensada en una sola respuesta. Es así como a partir del año 2008 se inicia el desarrollo de diferentes plataformas para el ensamble de modelos, por ejemplo: OpenModeller (de Souza Muñoz et al. 2011), ModEco (Guo and Liu 2010) y Bioensambles (Diniz-Filho et al. 2009).

Entre estas plataformas se destaca BIOMOD por ser una plataforma estable, gratuita y de código abierto que está en constante actualización (Thuiller 2003, Thuiller et al. 2009). A partir de este programa es posible realizar un consenso de las distribuciones e informar sobre las variaciones en las proyecciones de los diferentes algoritmos. También es posible generar curvas de respuesta de cada algoritmo y medir la importancia de las variables ambientales. La parametrización de los algoritmos implementados en BIOMOD aunque están por defecto, puede ser modificada por usuarios con mayor experiencia. Permite modificar los parámetros iniciales de calibración, como el número de puntos para evaluar el modelo, cambiar el número de repeticiones, así como escoger cómo crear pseudo-ausencias.

BIOMOD incluye alrededor de 9 algoritmos de modelado y más de 5 reglas para ensamblar las respuestas de cada algoritmo. Entre los algoritmos que incluyen, están catalogados como aquéllos de solo presencia, los de presencia- ausencia, así como los de presencia entorno. Cada grupo se define por el tipo de registro que utiliza para generar las predicciones. Entre los algoritmos de presencia, está disponible un método de cobertura climática envolvente, el cual se basa solo en los registros de presencia de las especies, denominado Surface Range Envelope (SRE). El siguiente grupo son los métodos de presencia- ausencia. Básicamente son aquellos algoritmos de regresión, paramétricos y no paramétricos que permiten hacer inferencias sobre la distribución de las especies a partir de datos dependientes de presencia ausencia y una serie de variables independiente, como el clima. En la última actualización de BIOMOD (biomod2) se incluyó a uno de los algoritmos que depende del entorno como Maxent. Este algoritmo estima una distribución de probabilidad mediante la búsqueda de la máxima entropía (es decir, la más cerca a la uniformidad), sujeto a un conjunto de restricciones que representan la información incompleta acerca de la distribución conocida, o registros de presencia (Phillips et al. 2006b, Phillips and Dudik 2009).

2.3 ¿Qué variables se utilizan y por qué?

Desde que surgió el concepto de nicho ecológico, surgió también el tratar de contestar cuáles son las variables que van a permitir la existencia de una especie a lo largo del tiempo en una región geográfica determinada. Claro está, que estas variables van a depender mucho de la escala a la que estemos trabajando. Elton por ejemplo, nos habla de una escala en la que las interacciones bióticas toman un papel fundamental sobre la distribución de los organismos. Esta escala de interacciones es local, mientras que el clima u otras variables ambientales tienen una mayor influencia en escalas geográficas (Pearson and Dawson 2003b, Peterson et al. 2011b)

2.4 Variables del clima

Una vez entendido que vamos a utilizar las variables del clima porque son las que explican

mejor los patrones de distribución a una escala geográfica, hay que identificar qué variables del clima son con las que podemos trabajar. El clima está representado por cinco propiedades de la atmósfera que son la precipitación, la temperatura, la evaporación, la insolación, el viento y la presión atmosférica. Puede definirse como el estado promedio de la atmósfera en lapsos de tiempo de alrededor de 30 años y que es modulado por un conjunto de fenómenos que caracterizan el estado del medio atmosférico (IPCC 2014). Por lo tanto, el cambio climático se entiende como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observado durante periodos de tiempo comparables” (PNUD 2015).

A pesar de que existen varias variables definiendo el clima, dos de estas variables resultan indispensables para la descripción de los patrones de distribución de la biota a una escala geográfica: la precipitación y la temperatura (Stenseth et al. 2002). El estrés hídrico o el estrés térmico en cualquiera de sus extremos, son fundamentales en limitar la distribución de las especies y por lo tanto en el entendimiento de los patrones de distribución (Hijmans and Graham 2006). Es por esta razón que son dos de las variables más utilizadas para correr modelos de nicho ecológico (Pearson and Dawson 2003a, Peterson et al. 2011b). Y a pesar de que existen otras variables importantes que a gran escala pueden determinar de manera importante patrones de distribución (como por ejemplo el suelo en el caso de plantas (Ureta et al. 2013)), en este estudio se va a trabajar con cambio climático y por tanto creemos importante basarnos exclusivamente en las variables que se van a ver modificadas por este fenómeno y cómo es que esta modificación se va a ver reflejada en la distribución de los vertebrados y plantas de las islas mexicanas.

2.4.1 19 variables bioclimáticas

Hasta el momento se sabe que se va a utilizar la precipitación y la temperatura para modelar los posibles impactos del cambio climático sobre la distribución potencial de las especies de islas mexicanas. Sin embargo, no se ha aclarado si sólo se utilizará la precipitación anual y la temperatura media anual, los extremos o qué otro tipo de variables. Existe una propuesta de capas de 19 variables bioclimáticas (WorldClim 2015) que son ampliamente utilizadas por modeladores de nicho ecológico. Estas variables representan tendencias anuales, variaciones temporales y valores extremos y pretenden dar al resultado un sentido más biológico. Las 19 variables se muestran a continuación

- BIO1= Temperatura media anual
- BIO2= Rango promedio diurno
- BIO3= Isotermalidad
- BIO4= Variabilidad temporal
- BIO5= Temperatura máxima del mes más cálido
- BIO6= Temperatura mínima del mes más frío

- BIO7= Rango anual de temperatura
- BIO8= Temperatura promedio del cuarto más húmedo
- BIO9= Temperatura promedio del cuarto más seco
- BIO10= Temperatura promedio del cuarto más cálido
- BIO11= Temperatura promedio del cuarto más frío
- BIO12= Precipitación anual
- BIO13= Precipitación del mes más húmedo
- BIO14= Precipitación del mes más seco
- BIO15= Variabilidad en la precipitación
- BIO16= Precipitación del cuarto más húmedo
- BIO17= Precipitación del cuarto más seco
- BIO18= Precipitación del cuarto más cálido
- BIO19= Precipitación del cuarto más frío

Muchas de estas variables se correlacionan dependiendo del área en la que se proyectará el modelado y en muchos ejercicios de modelado de nicho se escogen unas sobre otras dependiendo de la pregunta y el conocimiento de la importancia de la variable sobre la especie. En este estudio, el área geográfica sobre la que se va a hacer la proyección será el territorio nacional incluyendo islas así como un fragmento de Norte y Centroamérica. A esta área geográfica que puede verse proyectada en los mapas entregados se le conoce como *M*. En esta *M* es posible evaluar la correlación de las 19 variables y descartar algunas en caso de ser necesario.

2.5 Clima presente

La climatología del presente se obtendrá de la página de UNIATMOS: http://atlasclimatico.unam.mx/AECC_descargas/ (Fernandez-Eguiarte et al. 2014). En esta página está la información para crear de las 19 variables bioclimáticas de la climatología base que proviene del Centro Meteorológico Nacional, se llama SMN 1961-2000 y está a una resolución de 1km². Esta es la climatología base de la que se basaron para hacer los escenarios de cambio climático para México.

2.6 Clima futuro

Las variables del clima futuro son modeladas por Modelos de Circulación General (MCG). Los MCG de un país dependen mucho de su capacidad técnica y científica. Ningún país en vías de desarrollo tiene algún modelo avanzado que se equipare a los MCG. Por tanto, México es usuario de las salidas de modelos complejos desarrollados en países de primer mundo (Trejo et al. 2011, Ureta et al. 2012, Ibarra-Cardena et al. 2013). Estos modelos se basan en las leyes fundamentales de la física y simulan una gran variedad de procesos que

ocurren en un rango amplio de escalas espaciales y temporales. Dichos modelos poseen resoluciones espaciales variadas que se han venido refinando en el transcurso del tiempo (IPCC 2014). Las variables a las que se les presta mayor atención son la temperatura de superficie y la precipitación. Sin embargo, para algunos estudios es necesario tener una mayor resolución y tomar en cuenta los factores que afectan el clima a un nivel regional y local.

La generación de escenarios regionales de cambio climático es necesaria para poder hacer evaluaciones de impactos, vulnerabilidad y adaptación a un nivel de país. La regionalización requiere de una aproximación adecuada del uso de métodos estadísticos y funciones de transferencia que permitan conocer las relaciones entre la baja y alta escala espacial. Los distintos métodos que existen para regionalizar escenarios se basan en cierta interpretación del problema del posible clima futuro y de cómo se maneje la incertidumbre en las proyecciones de los sistemas complejos a largo plazo.

“Los escenarios son una representación posible y simplificada del clima futuro, basada en un conjunto de relaciones climatológicas que ha sido construida expresamente para investigar posibles consecuencias del cambio climático antropogénico, y que en muchas ocasiones sirve como materia prima para modelos de impacto”
(IPCC 2009)

En México se usaron métricas climáticas a escala mensual para evaluar el desempeño de diferentes MCG en predecir el clima de nuestro país. Se evaluaron variables promedio y también índices climáticos extremos. En general, tanto el GFDL como el ECHAM tuvieron un buen desempeño para México, por lo que ya se regionalizaron y serán dos de los modelos utilizados para buscar patrones de distribución potencial en el futuro.

Sin embargo, existe un enfoque distinto al sólo evaluar el desempeño de un MCG en toda la República y es mediante un “ensamble ponderado” de modelos. Resulta que la diferencia de desempeño de los 15 MGCs dependiendo de la región del país es muy grande, por lo que por cada región del país se toma el modelo que mejor desempeño tuvo creando un REA (Reliability Ensemble Averaging). El ensamble realizado por el método de la REA, logró integrar la información de todos los modelos y mejoró el desempeño individual.

Este ensamble se llevó a cabo por el periodo histórico (1961-2000) y para los nuevos nuevos escenarios de forzamiento radiativo: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 y RCP 8.5 (Ibarra-Cardena et al. 2013). Los RCPs por sus siglas en inglés Representative Concentration Pathways fueron nombrados por sus posibles fuerzas radioactivas en el año 2100 en comparación a los valores que se tenían en la época preindustrial (+2.6, +4.5, + 6.0 y +8.5 W/m²). Son 4 distintas trayectorias de las concentraciones de gases con efecto invernadero que están relacionados con la diferencia de energía proveniente del sol que es absorbida por el planeta y la energía radiada al espacio. El aumento de gases con efecto invernadero en la atmósfera aumenta la energía que permanece en la Tierra provocando un aumento en la temperatura (IPCC 2014). El RCP 2.6 asume que los gases con efecto invernadero llegarán a su máximo entre 2010-2020 y posteriormente declinarán las concentraciones. En el caso del escenario RCP 4.5 se predice una máxima concentración de gases para el año 2040 que posteriormente decrece. El escenario RCP 6 alcanza su máximo en 2080 y finalmente el escenario RCP 8.5 proyecta que las concentraciones de gases con efecto invernadero nunca dejarán de incrementarse en todo el siglo 21. Todos los escenarios propuestos para proyectar la distribución potencial de

nuestras especies a evaluar fueron escogidos con la finalidad de que nuestros resultados sean comparables con los resultados de otros estudios realizados por el INECC y puedan servir como insumos directos a mapas de vulnerabilidad.

3. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el impacto del cambio climático sobre especies de vertebrados terrestres y plantas de islas mexicanas.

4. METODOLOGÍA

4.1 Datos de presencia

Para correr los modelos de nicho ecológico se necesitan presencias únicas georreferenciadas. En un principio se pidió toda la información que estuviera accesible por parte de la CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). Se nos hizo entrega de un total de 259 especies de vertebrados terrestres de islas mexicanas. Este número de especies está lejos del número real de especies que se han registrado en estas áreas geográficas. Al recurrir a diferentes fuentes de información de artículos científicos, reportes de programas, tesis, información de áreas naturales protegidas... Se encontraron alrededor de 285 especies de aves (de las que 226 tienen un hábito mayormente migratorio), 118 mamíferos (de las que 33 eran marinos), 163 reptiles, 42 anfibios y 229 plantas. El hecho de encontrar tantas especies más en islas que no estaban registradas en gobierno sino desperdigadas en diferentes fuentes de información nos da una idea de lo poco que se sabe en términos generales sobre la biodiversidad de islas. Este primer listado de especies consideramos que es una compilación importante.

De este listado, para que las especies pudieran ser consideradas óptimas para su modelación era necesario que cumplieran con ciertos criterios: (i) que fueran terrestres, (ii) que fueran principalmente residentes y (iii) que contaran con un número de registros únicos georreferenciados. En un principio se pretendía eliminar a todas las aves que tuvieran en cierta parte de su distribución algún tipo de hábito migratorio. Sin embargo, de las aves que teníamos en la lista únicamente 5 tenían un hábito 100% residente, por lo que decidimos incorporar a especies que tuvieran un hábito principalmente residente.

En términos de registros únicos se decidió que en aves, mamíferos y plantas el número mínimo sería 20, mientras que para reptiles y anfibios sería de 10. Bajamos el número en el caso de estos dos últimos grupos pues se cuenta con menos información para la mayoría de sus especies.

Se agregó un análisis para aquellas especies que tuvieran muy pocos datos a un número excesivo. Para las especies que tuvieran un número de datos menor a 20 usamos el método de jackknife propuesto por Pearson et al. (2007). Este es un método para validar si los modelos construidos con una muestra inferior a 20 registros de presencia son mejores que un modelo aleatorio, y si esta diferencia es estadísticamente significativa. En el caso de las especies que tuvieran un número de registros mayor a 700 se utilizó el paquete SpThin (Aiello-Lammens et al. 2015) del software libre R (R Core Team 2015). Esta librería elimina

cierta cantidad de puntos para reducir el sesgo por sobremuestro de la especie, y al mismo tiempo mantiene la mayor cantidad de registros útiles. Calcula la distancia mínima entre los puntos y aleatoriamente elimina aquellos que tengan una distancia menor o igual a la distancia impuesta. Se usó una distancia superior a 10 km y generamos 100 repeticiones para alcanzar el número óptimo de registros.

Finalmente, se escogieron 20 especies por grupo estudiado, con excepción de los anfibios que únicamente contaban con 14 especies que podían ser modeladas. Para el caso de las aves y los mamíferos, solicitamos la colaboración de expertos dentro del INECC para hacer nuestra muestra y para el resto de los grupos se escogieron a las especies de manera aleatoria asumiendo que de esta manera podíamos tener representatividad en cuanto a distribuciones (amplias *vs* restringidas), categoría de riesgo y otros atributos biológicos como estado de las poblaciones o capacidad de dispersión. Al final, se modelaron un total de 94 especies.

4.2 Escenarios de cambio climático utilizados en la consultoría

Cada especie fue modelada bajo el escenario de clima actual (1961-2000) y dos series de tiempo (2015-2039 y 2075-2099) con dos diferentes RCPs (4.5 y 8.5) a una resolución de 1km². Se hicieron proyecciones en escenarios contrastante para tener una idea de las posibilidades. Un escenario pesimista nos permite conocer qué es lo peor que puede pasar en términos de impactos del cambio climático y biodiversidad de islas si no hay mitigación y reducción de emisiones y contrastarlo con lo que pasaría si se toma acción desde ahora. No se hizo uso del escenario más optimista (RCP 2.5), porque prácticamente refleja nuestra situación actual y porque de momento no hay disponibilidad de las capas bioclimáticas de REA con este escenario. Por estas razones, se utilizó como “best case scenario” el escenario intermedio-optimista RCP 4.5. De las 19 variables normalmente utilizadas para el modelado de nicho ecológico, nos quedamos con 9 posterior a hacer un análisis de correlación dentro del área geográfica de modelado (que es México con un área extensiva hacia el norte y hacia el sur. Ver mapas): Bio 1, Bio 2, Bio 4, Bio 6, Bio 7, Bio 12, Bio 13, Bio 18 y Bio 19.

Al final se obtuvieron 5 mapas por cada especie, uno representando la distribución potencial en el escenario actual, dos diferentes posibilidades para el futuro cercano y dos para el futuro lejano. Los algoritmos de nicho ecológico utilizados fueron Maxent y GAM. Se crearon 10 repeticiones por algoritmo y se realizó un ensamble para generar un mapa binario. Cada mapa binario cuenta con información de metadatos de qué fue lo que se hizo y cómo se hizo. La plantilla que se encuentra en los metadatos es la North American Profile of ISO19115 2003 (Figura 1).

Sula sula / 2015-2039 RCP4.5

Raster Dataset

Thumbnail Not Available

Tags
Cambio climático, Islas, Vertebrados, México

Summary
Delimitar la distribución potencial

Description
Estos mapas de distribución potencial fueron creados con datos georeferenciados únicos de especies que están presentes en islas mexicanas. Los criterios utilizados para elegir las especies a modelar fueron: a) más de 10 datos únicos y b) que la especie no fuera de hábito migratorio o marina. Se utilizó la plataforma de modelado de BIOMOD para crear un ensamble ponderado de proyecciones con los algoritmos Maxent y GAM, el que consiste en promediar de manera ponderada los modelos con un desempeño superior o igual a un 0.7 (TSS). Los escenarios de cambio climático usados fueron los del REA (Reliability Ensemble Averaging) http://atlasclimatico.unam.mx/AECC_descargas/, creados para México a una escala de 1km2; El escenario base va de 1961-2000 y se proyectó a dos series de tiempo (2015-2039 y 2075-2099) bajo dos distintos escenarios de forzamiento radiativo o RCP (4.5 W/m2 y 8.5 W/m2). A partir de esta información generamos las 19 variables bioclimáticas ampliamente utilizadas en el modelado de nicho y se hizo un análisis de correlación para conocer qué variables podíamos dejar fuera. Finalmente se trabajó con 9 variables bioclimáticas: bio1, bio2, bio4, bio6, bio12, bio13, bio18 y bio19: <http://www.worldclim.org/bioclim>.

Credits
Ureta C., Calixto-Pérez E. y Cuervo-Robayo A. 2016. Evaluación de impactos del cambio climático sobre la biodiversidad de las islas de México. PNUD-INECC

Figura 1: Este es el ejemplo de uno de los metadatos para una especie de ave: Sula sula. Los campos que se llenaron fueron: Title, Tags, Summary, Description (Abstract) y Credits. El sistema de coordenadas es geográfico con DATUM WGS84.

5. RESULTADOS

5.1 Impactos del cambio climático sobre los mamíferos de islas mexicanas

5.1.1 Vulnerabilidad de mamíferos para el futuro cercano (2015-2039)

En el futuro cercano *Chaetodipus baileyi* es la única especie que tiene un balance final negativo, es decir que pierde más área de la que gana. Considerando el RCP 4.5, se pierde poco más de 3% de su área de distribución, y considerando el RCP 8.5 se pierde alrededor de 1.27%. Para el resto de las especies el balance es positivo, es decir, se gana más área de la que se pierde. Si no se considera la capacidad de dispersión de las especies en un escenario de cambio climático moderado (RCP 4.5), el 80% de las especies pierden más del 10% de su área de distribución, siendo *Chaetodipus penicillatus* la especie que más área de distribución pierde (24%). En un escenario de cambio climático más drástico (RCP 8.5) el 90% de las especies pierde más del 10% de su área de distribución, siendo *Peromyscus eva* la especie más afectada perdiendo 24.627% de su área de distribución.

Especie	RCP 4.5 % de Cambio Total	RCP 8.5 % de Cambio Total
<i>Chaetodipus arenarius</i>	86.943	93.985
<i>Chaetodipus baileyi</i>	-3.515	-1.274
<i>Chaetodipus intermedius</i>	32.747	31.238
<i>Lepus californicus</i>	17.090	13.071
<i>Macrotus californicus</i>	13.551	15.052
<i>Myotis californicus</i>	14.182	16.873
<i>Myotis vivesi</i>	307.471	349.923
<i>Neotoma lepida</i>	58.629	57.423
<i>Peromyscus eremicus</i>	21.487	17.034
<i>Peromyscus eva</i>	53.652	38.370
<i>Peromyscus merriami</i>	58.155	53.482
<i>Reithrodontomys spectabilis</i>	862.746	1173.427
<i>Spermophilus tereticaudus</i>	42.612	47.991
<i>Thomomys bottae</i>	18.353	17.332
<i>Chaetodipus penicillatus</i>	1.356	4.384
<i>Dipodomys merriami</i>	10.798	10.918
<i>Ammospermophilus leucurus</i>	19.199	22.616
<i>Leptonycteris yerbabuena</i>	24.914	26.191
<i>Sylvilagus bachmani</i>	60.779	59.816
<i>Lepus alleni</i>	42.819	47.442

5.1.2 Vulnerabilidad de mamíferos para el futuro lejano (2075-2099)

Hacia el futuro lejano *Chaetodipus baileyi* sigue siendo la única especie con un balance negativo, y el área perdida es mayor. Considerando el RCP 4.5, pierde alrededor del 14% de su área de distribución, y considerando el RCP 8.5 se pierde poco más del 15%.

Especie	RCP 4.5 % de Cambio Total	RCP 8.5 % de Cambio Total
<i>Chaetodipus arenarius</i>	98.575	125.198
<i>Chaetodipus baileyi</i>	-14.670	-15.731
<i>Chaetodipus intermedius</i>	66.190	136.593
<i>Lepus californicus</i>	8.770	-5.341
<i>Macrotus californicus</i>	24.797	87.354
<i>Myotis californicus</i>	24.009	35.010
<i>Myotis vivesi</i>	788.299	1777.510
<i>Neotoma lepida</i>	52.711	34.909
<i>Peromyscus eremicus</i>	21.495	21.254
<i>Peromyscus eva</i>	94.824	36.285
<i>Peromyscus merriami</i>	123.448	341.046
<i>Reithrodontomys spectabilis</i>	3126.891	13771.392
<i>Spermophilus tereticaudus</i>	106.510	261.100
<i>Thomomys bottae</i>	20.791	31.508
<i>Chaetodipus penicillatus</i>	15.183	30.110
<i>Dipodomys merriami</i>	16.469	16.467
<i>Ammospermophilus leucurus</i>	7.376	14.323
<i>Leptoncycteris yerbabuenae</i>	47.118	83.893
<i>Sylvilagus bachmani</i>	40.281	54.438
<i>Lepus alleni</i>	62.800	78.861

Si no se considera la capacidad de dispersión el 90% de las especies pierden más del 10% de su área de distribución potencial tanto para el escenario de cambio climático moderado, como para el drástico. En un escenario de cambio climático moderado *Chaetodipus baileyi* es la especie más afectada, perdiendo poco más del 30% de su área de distribución, mientras que para el escenario drástico *Peromyscus eva* es la especie más afectada, perdiendo 88% de su área de distribución actual.

5.2 Impactos del cambio climático sobre las aves de islas mexicanas

Las especies de aves que se modelaron fueron: *Egretta thula*, *Pandion haliaetus*, *Pelecanus occidentalis*, *Phalacrocorax penicillatus*, *Phalacrocorax auritus*, *Sterna elegans*, *Sterna maxima*, *Sternula antillarum*, *Sula leucogaster*, *Sula nebouxii*, *Synthliboramphus craveri*, *Larus occidentalis*, *Coragyps atratus*, *Himantopus mexicanus*, *Phalacrocorax brasilianus*, *Sula sula*, *Egretta caerulea*, *Bubulcus ibis*, *Egretta rufescens* y *Ptychoramphus aleuticus*. En todas las especies de aves hay una disminución en el área de distribución potencial hacia el futuro si no consideramos posibilidades de dispersión. A pesar de que se podría pensar que las especies de aves por su capacidad de volar tienen grandes alcances en términos de dispersión, la realidad es que varias aves difícilmente se establecen en nuevos sitios. Si se considera una total de capacidad biológica y ambiental de dispersión (es decir que no haya barreras que le impidan dispersarse como montañas o urbanización) el área de distribución potencial incrementa de manera importante en todos los tiempos y escenarios modelados. En el caso de que las especies no tengan ningún tipo de capacidad de dispersión tendríamos que la más vulnerable es *Pandion haliaetus* (hasta más del 75% de pérdida), seguida por *Sula nebouxii* (hasta 32% de pérdida) y finalmente *Ptychoramphus aleuticus* (31.77%).

Lista de Vulnerabilidad RCP 4.5 (2015-2039)

AVES Especie	45C %Perdido	%Ganado	% de Cambio Total
<i>Egretta thula</i>	0.236	195.342	195.106
<i>Pandion haliaetus</i>	70.457	184.213	113.757
<i>Pelecanus occidentalis</i>	10.159	363.932	353.773
<i>Phalacrocorax penicillatus</i>	15.599	130.106	114.507
<i>Phalacrocorax auritus</i>	5.352	218.205	212.853
<i>Sterna elegans</i>	9.833	158.801	148.968
<i>Sterna maxima</i>	10.290	116.713	106.423
<i>Sternula antillarum</i>	1.689	30.297	28.607
<i>Sula leucogaster</i>	4.963	632.651	627.688
<i>Sula nebouxii</i>	28.320	285.746	257.426
<i>Synthliboramphus craveri</i>	1.806	165.756	163.949
<i>Larus occidentalis</i>	15.264	121.588	106.324
<i>Coragyps atratus</i>	13.946	1470.243	1456.298
<i>Phalacrocorax brasilianus</i>	0.919	143.350	142.431
<i>Sula sula</i>	0.488	77.753	77.265
<i>Egretta caerulea</i>	7.204	30.706	23.502
<i>Egretta rufescens</i>	5.772	38.303	32.532
<i>Ptychoramphus aleuticus</i>	20.804	88.696	67.892
<i>Bubulcus ibis</i>	13.411	1153.584	1140.172
<i>Chadriarius nivosus</i>	0.867	83.596	82.729

Lista de Vulnerabilidad RCP 8.5 (2015-2039)

Especie	AVES	85C	
	%Perdido	%Ganado	% de Cambio Total
<i>Egretta thula</i>	0.839	196.265	195.426
<i>Pandion haliaetus</i>	27.861	339.388	311.527
<i>Pelecanus occidentalis</i>	11.683	382.632	370.949
<i>Phalacrocorax penicillatus</i>	19.247	150.047	130.800
<i>Phalacrocorax auritus</i>	5.684	232.728	227.044
<i>Sterna elegans</i>	10.205	136.691	126.485
<i>Sterna maxima</i>	10.217	120.049	109.832
<i>Sternula antillarum</i>	0.769	33.861	33.092
<i>Sula leucogaster</i>	5.037	644.734	639.697
<i>Sula nebouxii</i>	21.115	118.152	97.037
<i>Synthliboramphus craveri</i>	2.101	158.984	156.883
<i>Larus occidentalis</i>	16.775	122.625	105.851
<i>Coragyps atratus</i>	13.821	1827.945	1814.123
<i>Phalacrocorax brasilianus</i>	0.277	161.992	161.715
<i>Sula sula</i>	0.568	80.334	79.766
<i>Egretta caerulea</i>	3.275	36.579	33.304
<i>Egretta rufescens</i>	3.073	46.463	43.390
<i>Ptychoramphus aleuticus</i>	24.213	77.610	53.397
<i>Bubulcus ibis</i>	13.442	1300.4	1286.958
<i>Chadrius nivosus</i>	0.734	86.978	86.244

Lista de Vulnerabilidad RCP 4.5 (2075-2099)

AVES	45L		
Especie	%Perdido	%Ganado	% de Cambio Total
<i>Egretta thula</i>	0.152	284.481	284.329
<i>Pandion haliaetus</i>	75.868	212.892	137.023
<i>Pelecanus occidentalis</i>	7.913	930.965	923.052
<i>Phalacrocorax penicillatus</i>	15.003	569.030	554.027
<i>Phalacrocorax auritus</i>	3.561	369.898	366.337
<i>Sterna elegans</i>	9.860	222.791	212.931
<i>Sterna maxima</i>	12.071	138.970	126.898
<i>Sternula antillarum</i>	0.342	60.253	59.911
<i>Sula leucogaster</i>	4.893	1081.512	1076.620
<i>Sula nebouxii</i>	22.556	191.992	169.436
<i>Synthliboramphus craveri</i>	0.972	314.373	313.401
<i>Larus occidentalis</i>	8.160	217.136	208.976
<i>Coragyps atratus</i>	10.801	3243.667	3232.866
<i>Phalacrocorax brasilianus</i>	0.840	273.737	272.897
<i>Sula sula</i>	0.045	130.184	130.140
<i>Egretta caerulea</i>	7.010	52.753	45.744
<i>Egretta rufescens</i>	4.412	66.411	61.999
<i>Ptychoramphus aleuticus</i>	27.902	67.460	39.558
<i>Bubulcus ibis</i>	4.891	4246.97	4242.079
<i>Chadrius nivosus</i>	0.211	120.147	119.936

Lista de Vulnerabilidad RCP 4.5 (2075-2099)

AVES Especie	85L		
	%Perdido	%Ganado	% de Cambio Total
<i>Egretta thula</i>	0.141	401.595	401.454
<i>Pandion haliaetus</i>	42.740	376.426	333.686
<i>Pelecanus occidentalis</i>	19.650	928.459	908.809
<i>Phalacrocorax penicillatus</i>	18.215	426.589	408.374
<i>Phalacrocorax auritus</i>	3.756	497.795	494.039
<i>Sterna elegans</i>	25.060	302.761	277.701
<i>Sterna maxima</i>	17.313	189.427	172.114
<i>Sternula antillarum</i>	0.933	97.067	96.133
<i>Sula leucogaster</i>	3.660	2061.639	2057.980
<i>Sula neboxii</i>	32.662	300.638	267.976
<i>Synthliboramphus craveri</i>	0.613	744.909	744.296
<i>Larus occidentalis</i>	4.453	488.088	483.635
<i>Coragyps atratus</i>	6.324	6527.216	6520.892
<i>Phalacrocorax brasilianus</i>	1.283	452.646	451.363
<i>Sula sula</i>	4.020	20.004	15.983
<i>Egretta caerulea</i>	4.609	85.616	81.007
<i>Egretta rufescens</i>	2.667	101.122	98.454
<i>Ptychoramphus aleuticus</i>	31.771	72.843	41.072
<i>Bubulcus ibis</i>	3.384	10669.76	10666.38
<i>Chadrius nivosus</i>	75.711	339.270	263.559

5.3 Impactos del cambio climático sobre las reptiles de islas mexicanas

Las 20 especies de reptiles modelas fueron: *Aspidoscelis hyperythra*, *Crotaphytus dickersonae*, *Ctenosaura hemilopha*, *Drymarchon corais*, *Eridiphas slevini*, *Lampropeltis zonata*, *Masticophis bilineatus*, *Mastigodryas melanolomus*, *Phyllodactylus bomolepidurus*, *Petrosaurus thalassinus*, *Phyllodactylus xanti*, *Phyllodactylus unctus*, *Boa constrictor*, *Ctenosaura pectinata*, *Oxybelis aeneus*, *Pituophis catenifer*, *Phyllorhynchus decurtatus*, *Crotalus molossus*, *Crotalus cerastes* y *Cnemidophorus tigris*. Se espera que en el futuro las condiciones que son óptimas en la actualidad para la especie cambien o desaparezcan. Para algunas especies estas condiciones cambiarán de forma favorable, pero para otras pueden disminuir de manera en la que se verán muy restringidas a ciertas áreas, lo que potencialmente las hará más vulnerables. Para aquellas especies que puedan ganar área con condiciones climáticas óptimas, es necesario tener en cuenta la capacidad de dispersión de las especies. Los reptiles junto con los anfibios son aquellos taxones que se caracterizan por tener una escasa vagilidad. La capacidad de dispersión de estas especies junto con las barreras impuesta por el ser humano; agricultura, zonas urbanas así como barreras geográficas incrementan la vulnerabilidad de las especies al cambio climático.

Si no se considera ningún tipo de capacidad de dispersión, todas las especies de reptiles evaluadas en este proyecto pierden área de distribución potencial (Figura 2). A lo largo del tiempo esta pérdida se agudizara, lo que también se ve reflejado entre los dos escenarios de cambio climático; RCP 4.5 y RCP 8.5. Entre más lejano en el tiempo (futuro lejano: 2075-2099) y más extremo sea el escenario (RCP 8.5) mayor vulnerabilidad presentara la especie.

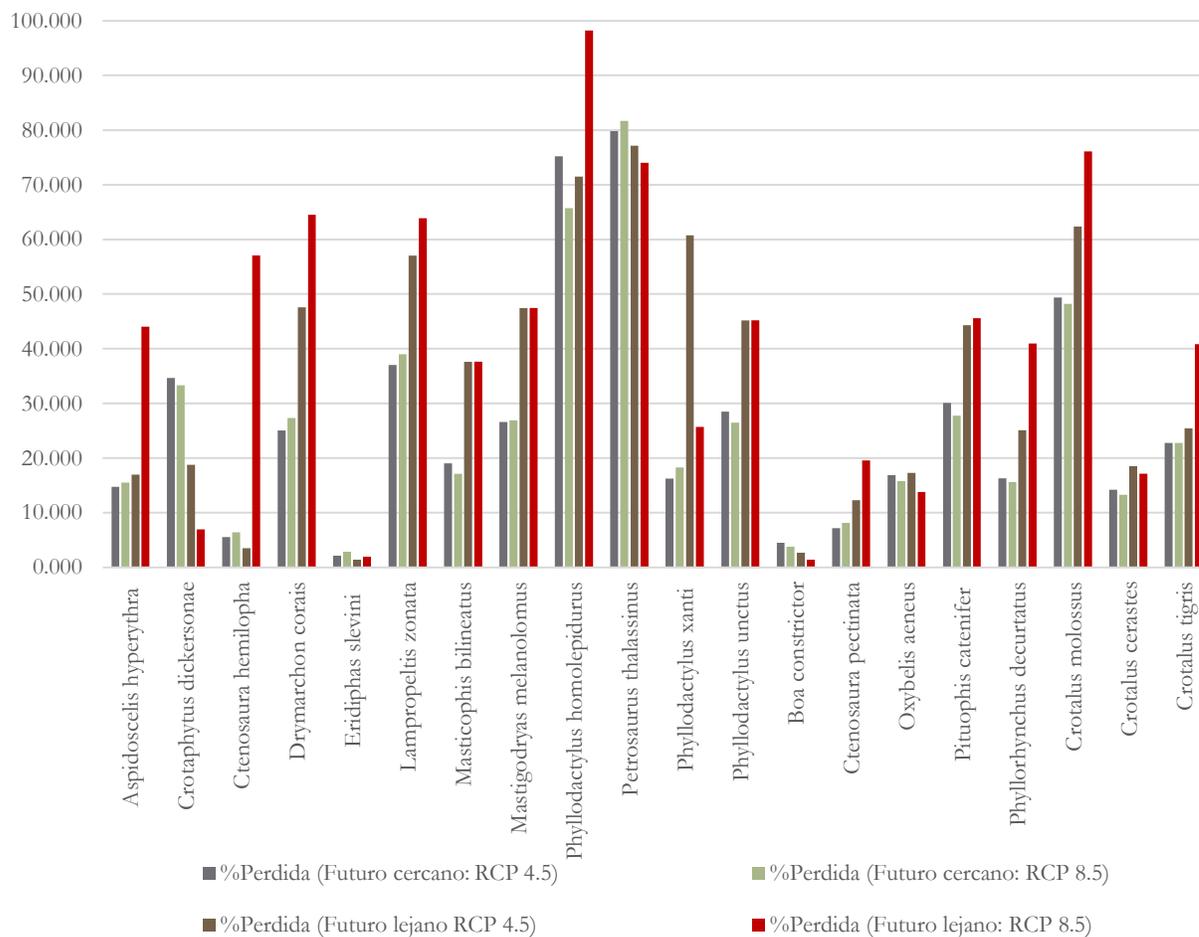


Figura 2. Porcentaje de pérdida de distribución potencial de algunas de las especies de reptiles que se distribuyen en islas y el continente mexicano. Este grafica resume la evaluación que se realizó para dos tiempos; futuro cercano (2015-2039), futuro lejano (2075-2099) y los correspondiente RCP; un escenario medianamente positivo (RCP 4.5) y otro extremo (RCP 8.5).

Las especies que perderán (sin dispersión) más del 70% de área de condiciones climáticas optimas son *Phyllodactylus homolepidurus* y *Petrosaurus thalassinus* (Figura 2). Estas dos especies se caracterizan por ser endémicas de México y están protegidas por la norma oficial mexicana. Hacia final del siglo XXI y bajo el escenario más extremo (RCP 8.5), *Crotalus molossus* perderá condiciones en una proporción (76%) similar a las dos especies señaladas anteriormente. Esta especie de cascabel, que se puede encontrar en la mayoría de las islas del Golfo de California, aunque se distribuye en gran parte del territorio mexicano es de las pocas especies en las que el balance de pérdida y ganancia es negativo, es decir que presenta un mayor porcentaje de perdida de las condiciones climáticas optimas hacia el futuro (Cuadro 1). Otras de las especies con un balance de pérdida y ganancia negativo son: *Lampropeltis zonata* y *Mastigodryas melanolomus*. Para estas dos especies la pérdida se incrementa a lo largo del tiempo y entre escenarios. *L. zonata* se distribuye en el norte de Baja California, mientras que *M. Melanolomus* presenta una distribución por gran parte de la costa del pacifico y el golfo mexicano, y se registra en las islas de de la cuenca de las Tres Marías. En el caso de *Drymarchon corais*, una especie de culebra que también se distribuye por la Costa del Pacifico y el Golfo de México, el balance es negativo solo hasta final de siglo y se agudiza ante un de RCP 8.5 (-30.285%).

5.4 Impactos del cambio climático sobre anfibios de islas mexicanas

Las especies de anfibios evaluadas fueron *Anaxyrus cognatus*, *Spea hammondi*, *Anaxyrus woodhousii*, *Aneides lugubris*, *Anaxyrus californicus*, *Anaxyrus punctatus*, *Batrachoseps major*, *Incilius alvarius*, *Lithobates berlandiere*, *Lithobates catesbeianus*, *Lithobates forreri*, *Lithobates yavapaiensis*, *Pseudacris cadaverina* y *Pseudacris regilla*. Todas las especies tuvieron pérdidas en su área de distribución potencial, por lo que si no se considera dispersión, todas tendrían un impacto negativo por parte del cambio climático. Sin embargo, al considerar dispersión se abren también las posibilidades de llegar a otras áreas que en el futuro tendrán las condiciones ambientales (específicamente climáticas) para que la especie pueda establecerse ahí. En ese caso, todas las especies muestran nuevas áreas de distribución potencial al futuro. Las tres especies más vulnerables de este grupo son *Spea hammondi*, *Anaxyrus californicus* y *Anaxyrus punctatus*. Conforme va pasando el tiempo y los escenarios se vuelven más pesimistas en cuanto al calentamiento de la Tierra, los porcentajes de disminución neta en el área de distribución son mayores.

Lista de Vulnerabilidad RCP 4.5 (2015-2039)

45C			
	%Perdido	%Ganado	% de Cambio Total
<i>Anaxyrus cognatus</i>	23.592	51.711	28.119
<i>Spea hammondi</i>	14.801	8.758	-6.043
<i>Anaxyrus woodhousii</i>	0.874	104.168	103.294
<i>Aneides lugubris</i>	5.563	192.055	186.493
<i>Anaxyrus californicus</i>	26.357	29.9	3.543
<i>Anaxyrus punctatus</i>	16.02	17.546	1.525
<i>Batrachoseps major</i>	26.927	93.116	66.189
<i>Incilius alvarius</i>	11.823	116.217	104.395
<i>Lithobates berlandieri</i>	15.183	47.762	32.579
<i>Lithobates catesbeianus</i>	21.803	107.789	85.986
<i>Lithobates forreri</i>	9.391	66.389	56.999
<i>Lithobates yavapaiensis</i>	0.082	55.856	55.774
<i>Pseudacris cadaverina</i>	16.073	119.398	103.324
<i>Pseudacris regilla</i>	13.531	97.387	83.855

Lista de Vulnerabilidad RCP 8.5 (2015-2039)

85C			
	%Perdido	%Ganado	% de Cambio Total
Anaxyrus cognatus	25.5	48.985	23.485
Spea hammondi	15.477	8.388	-7.088
Anaxyrus woodhousii	0.794	94.706	93.912
Aneides lugubris	6.715	174.868	168.153
Anaxyrus californicus	25.968	23.795	-2.172
Anaxyrus punctatus	16.93	17.56	0.63
Batrachoseps major	27.317	86.381	59.064
Incilius alvarius	9.775	112.176	102.402
Lithobates berlandieri	15.017	46.451	31.434
Lithobates catesbeianus	22.93	103.447	80.516
Lithobates forreri	10.624	66.913	56.29
Lithobates yavapaiensis	0.131	57.043	56.913
Pseudacris cadaverina	16.985	119.385	102.401
Pseudacris regilla	14.527	89.96	75.433

Lista de Vulnerabilidad RCP 4.5 (2075-2099)

45L			
	%Perdido	%Ganado	% de Cambio Total
Anaxyrus cognatus	23.59	67.292	43.702
Spea hammondi	25.67	8.129	-17.541
Anaxyrus woodhousii	0.739	130.259	129.520
Aneides lugubris	6.085	198.170	192.084
Anaxyrus californicus	38.17	8.277	-29.893
Anaxyrus punctatus	24.798	23.305	-1.493
Batrachoseps major	38.937	90.591	51.655
Incilius alvarius	4.549	208.205	203.656
Lithobates berlandieri	15.15	85.358	70.208
Lithobates catesbeianus	23.402	138.82	115.418
Lithobates forreri	11.121	109.023	97.902
Lithobates yavapaiensis	0.013	99.219	99.206
Pseudacris cadaverina	21.607	152.22	130.613
Pseudacris regilla	17.343	110.793	93.451

Lista de Vulnerabilidad RCP 4.5 (2075-2099)

85L			
	%Perdido	%Ganado	% de Cambio Total
Anaxyrus cognatus	33.019	79.709	46.69
Spea hammondii	43.36	4.805	-38.555
Anaxyrus woodhousii	0.551	170.024	169.472
Aneides lugubris	8.293	240.592	232.299
Anaxyrus californicus	68.45	0.956	-67.495
Anaxyrus punctatus	43.544	25.975	-17.57
Batrachoseps major	49.24	108.839	59.599
Incilius alvarius	1.792	496.838	495.045
Lithobates berlandieri	15.765	152.782	137.017
Lithobates catesbeianus	19.531	189.904	170.374
Lithobates forreri	8.529	166.597	158.069
Lithobates yavapaiensis	0.001	159.511	159.51
Pseudacris cadaverina	30.177	274.83	244.654
Pseudacris regilla	26.661	180.666	154.005

Los anfibios en varios estudios han mostrado vulnerabilidad importante a cambios en su ambiente. En este caso, a comparación de otros grupos de vertebrados como aves y reptiles, su vulnerabilidad fue mayor. Sin embargo, con excepción de la especie *A. californicus* no hay más especies de anfibios cuyo peligro ante el cambio climático sea tan evidente. Hay que considerar por supuesto, que existen muchos otros factores ambientales importantes para las especies y que en este caso únicamente tomamos en cuenta al clima. Además las cuestiones relacionadas con la precipitación tienen consigo mucha mayor incertidumbre. Asimismo, se debe encontrar una manera de integrar nivel del mar para realmente considerar el riesgo de estas especies que se encuentran distribuidas principalmente en costas.

5.5 Impactos del cambio climático sobre las plantas de islas mexicanas

Las 20 especies modeladas de plantas fueron: *Ardisia revoluta*, *Bernardia mexicana*, *Bunchosia palmeri*, *Canavalia rosea*, *Carlowrightia arizonica*, *Dalea carthagenensis*, *Echites yucatanensis*, *Elaeodendron trichotomum*, *Hofmeisteria fasciculata*, *Myriocarpa longipes*, *Nopalea karwinskiana*, *Pachycereus pecten-aboriginum*, *Phyllanthus nobilis*, *Tabernaemontana chrysocarpa*, *Talisia oliviformis*, *Cochlospermum vitifolium*, *Oplismenus burmanni*, *Prosopis laevigata*, *Xylosma flexuosa* y *Chiococca alba*. Si no se considera ningún tipo de capacidad de dispersión, todas las especies pierden área de distribución potencial. Es decir, en el futuro se espera que las condiciones óptimas de la actualidad para todas estas especies de aves se vean reducidas. Sin embargo, si se considera capacidad de dispersión el impacto del cambio climático sobre las condiciones óptimas es menor porque existen nuevas regiones con perfiles bioclimáticos óptimos. En ese caso, a pesar de que se proyecta que se perderá área óptima del presente, también se predicen nuevas áreas con un perfil bioclimático óptimo que en las condiciones actuales no lo son. Claro que hay que considerar que estas nuevas áreas con perfil bioclimático óptimo son útiles para las especies siempre y cuando puedan ser alcanzadas por las especies, es decir, que no haya barreras ambientales ni biológicas. Por supuesto un libre acceso a la dispersión es difícil, sobre todo considerando las tasas de dispersión de varias plantas, pero al menos podemos saber por medio de estos modelos que existen alternativas de translocación en caso de ser necesario.

En términos de porcentaje total de cambio existen varias especies que aun cuando obtuvieron ganancias en áreas de distribución potencial, el porcentaje neto de cambio es negativo. Para el caso del RCP 4.5 cercano (2015-2039) 8 de las 20 especies modeladas obtuvieron una disminución en áreas de distribución potencial. La misma cantidad de especies con disminución en el área de distribución potencial se mantuvo en el RCP 8.5, pero aumenta a 9 especies para el RCP 4.5 lejano (2075-2099) y a 11 para el RCP 8.5 lejano. Es decir, conforme se va calentando más el planeta en el tiempo el impacto será mayor. También será mayor en el escenario pesimista con respecto a uno más optimista.

En el futuro cercano RCP 4.5, las especies de plantas de islas evaluadas más vulnerables al cambio climático serán: *E. yucatanensis* (-39.921%), *E. trichotomum* (-35.619%) y *C. vitifolium* (-22.739%).

Lista de Vulnerabilidad RCP 4.5 (2015-2039)

45C			
	%Perdido	%Ganado	% de Cambio Total
<i>Ardisia revoluta</i>	24.316	27.914	3.598
<i>Bernardia mexicana</i>	30.535	42.999	12.464
<i>Bunchosia palmeri</i>	19.42	57.786	38.366
<i>Canavalia rosea</i>	100	5015	4915
<i>Carlowrightia arizonica</i>	63.716	60.4	-3.316
<i>Dalea carthagenensis</i>	73.633	63.948	-9.685
<i>Echites yucatanensis</i>	65.514	25.593	-39.921
<i>Elaeodendron trichotomum</i>	45.583	9.965	-35.619
<i>Hofmeisteria fasciculata</i>	27.715	96.816	69.1
<i>Myriocarpa longipes</i>	30.764	21.325	-9.439
<i>Nopalea karwinskiana</i>	8.782	41.186	32.404
<i>Pachycereus pecten-aboriginum</i>	13.489	57.896	44.407
<i>Phyllanthus nobilis</i>	10.461	17.008	6.547
<i>Tabernaemontana chrysocarpa</i>	3.956	18.55	14.594
<i>Talisia oliviformis</i>	1.255	33.489	32.235
<i>Cochlospermum vitifolium</i>	37.627	14.889	-22.739
<i>Oplismenus burmannii</i>	21.758	19.405	-2.353
<i>Prosopis laevigata</i>	11.751	41.79	30.04
<i>Xylosma flexuosa</i>	32.452	12.017	-20.436
<i>Chiococca alba</i>	18.191	23.632	5.441

En el futuro cercano con el escenario RCP 8.5, las especies de plantas de islas evaluadas más vulnerables al cambio climático siguieron siendo las mismas pero con una mayor reducción neta: *E. yucatanensis* (-43.447%), *E. trichotomum* (-37.639%) y *C. vitifolium* (-26.045%).

Lista de Vulnerabilidad RCP 8.5 (2015-2039)

85C			
	%Perdido	%Ganado	% de Cambio Total
<i>Ardisia revoluta</i>	24.413	30.972	6.559
<i>Bernardia mexicana</i>	33.492	40.629	7.137
<i>Bunchosia palmeri</i>	20.303	59.643	39.34
<i>Canavalia rosea</i>	100	4766.387	4666.387
<i>Carlowrightia arizonica</i>	68.553	60.433	-8.12
<i>Dalea carthagenensis</i>	73.609	70.986	-2.623
<i>Echites yucatanensis</i>	68.13	24.682	-43.447
<i>Elaeodendron trichotomum</i>	47.201	9.561	-37.639
<i>Hofmeisteria fasciculata</i>	30.38	87.316	56.936
<i>Myriocarpa longipes</i>	33.721	18.17	-15.551
<i>Nopalea karwinskiana</i>	9.681	41.419	31.738
<i>Pachycereus pecten-aboriginum</i>	12.995	65.485	52.49
<i>Phyllanthus nobilis</i>	9.956	20.329	10.373
<i>Tabernaemontana chrysocarpa</i>	3.391	21.127	17.736
<i>Talisia oliviformis</i>	0.893	42.852	41.959
<i>Cochlospermum vitifolium</i>	40.1	14.055	-26.045
<i>Oplismenus burmannii</i>	22.411	21.233	-1.178
<i>Prosopis laevigata</i>	13.77	40.955	27.185
<i>Xylosma flexuosa</i>	34.476	12.216	-22.26
<i>Chiococca alba</i>	17.389	24.867	7.478

Conforme nos alejamos más en el tiempo, los impactos en las especies son mayores por lo que las disminuciones en el porcentaje de área de distribución potencial es mucho mayor. Para el escenario lejano con un RCP de 4.5 las tres especies más vulnerables cambian por una. En vez de tener a *C. vitifolium* (- 41.013%) en la lista como anteriormente, se tiene a *A. revoluta* con un porcentaje de -55.648%. Las primeras dos especies más vulnerables siguen siendo *E. yucatanensis* con -74.898% y *E. trichotomum* con -74.898%.

Lista de Vulnerabilidad RCP 4.5 (2075-2099)

45L			
	%Perdido	%Ganado	% de Cambio Total
<i>Ardisia revoluta</i>	99.655	44.008	-55.648
<i>Bernardia mexicana</i>	43.276	45.128	1.852
<i>Bunchosia palmeri</i>	32.44	74.479	42.039
<i>Canavalia rosea</i>	73.916	86.992	13.076
<i>Carlowrightia arizonica</i>	100	2.18	-97.82
<i>Dalea carthagenensis</i>	78.822	69.222	-9.6
<i>Echites yucatanensis</i>	94.657	19.759	-74.898
<i>Elaeodendron trichotomum</i>	62.365	9.366	-52.999
<i>Hofmeisteria fasciculata</i>	44.383	110.713	66.331
<i>Myriocarpa longipes</i>	49.238	21.954	-27.285
<i>Nopalea karwinskiana</i>	17.263	56.709	39.446
<i>Pachycereus pecten-aboriginum</i>	10.288	143.427	133.139
<i>Phyllanthus nobilis</i>	17.902	24.122	6.221
<i>Tabernaemontana chrysocarpa</i>	4.357	35.279	30.922
<i>Talisia oliviformis</i>	0.469	92.009	91.54
<i>Cochlospermum vitifolium</i>	54.983	13.97	-41.013
<i>Oplismenus burmannii</i>	31.338	24.733	-6.605
<i>Prosopis laevigata</i>	18.728	53.169	34.441
<i>Xylosma flexuosa</i>	45.857	13.274	-32.583
<i>Chiococca alba</i>	25.757	36.001	10.244

Por último, la proyección a un tiempo más lejano con el RCP más pesimista nos indica aún un decremento en los % de disminución. Las especies más vulnerables siguen siendo las de los primeros dos escenarios pero ahora las reducciones en el área de distribución potencial alcanzan hasta un -82.662%.

Lista de Vulnerabilidad RCP 8.5 (2075-2099)

85L			
	%Perdido	%Ganado	% de Cambio Total
<i>Ardisia revoluta</i>	12.848	155.903	143.055
<i>Bernardia mexicana</i>	52.785	47.212	-5.573
<i>Bunchosia palmeri</i>	44.149	94.314	50.165
<i>Canavalia rosea</i>	100	1894.42	1794.42
<i>Carlowrightia arizonica</i>	97.242	33.76	-63.482
<i>Dalea carthagenensis</i>	84.036	80.521	-3.514
<i>Echites yucatanensis</i>	98.566	15.903	-82.662
<i>Elaeodendron trichotomum</i>	78.072	10.291	-67.781
<i>Hofmeisteria fasciculata</i>	71.114	70.418	-0.696
<i>Myriocarpa longipes</i>	65.699	20.753	-44.946
<i>Nopalea karwinskiana</i>	29.733	100.926	71.193
<i>Pachycereus pecten-aboriginum</i>	5.096	301.805	296.708
<i>Phyllanthus nobilis</i>	36.797	24.376	-12.42
<i>Tabernaemontana chrysocarpa</i>	9.323	72.957	63.634
<i>Talisia oliviformis</i>	0.057	193.64	193.584
<i>Cochlospermum vitifolium</i>	72.963	12.016	-60.947
<i>Oplismenus burmannii</i>	43.714	32.096	-11.618
<i>Prosopis laevigata</i>	25.334	63.258	37.924
<i>Xylosma flexuosa</i>	54.743	12.017	-42.726
<i>Chiococca alba</i>	20.422	62.457	42.035

Estos resultados nos indican que sí existen diferencias entre las 4 proyecciones (dos de tiempo y dos RCPs) y que conforme más nos alejamos en el tiempo los impactos son mayores, pero que sí existe una diferencia importante entre los escenarios con menores concentraciones de gases con efecto invernadero y los escenarios más pesimistas. Es decir, las decisiones políticas y las acciones que se tomen en estos años sí tendrán un impacto en la vulnerabilidad de estas especies.

6. DISCUSIÓN

6.1 Discusión General

Si consideramos la vulnerabilidad por grupo de organismos, es posible decir que las plantas resultaron ser las más vulnerables porque muestran más porcentajes netos negativos en sus áreas de distribución futura. Este grupo es seguido por los anfibios, posteriormente los reptiles, mamíferos y finalmente las aves. Sin embargo, fueron más las especies evaluadas que resultaron tener un balance neto positivo que negativo. Esto no necesariamente es un resultado favorecedor, puesto que en el balance neto asume que la especie tiene una importante capacidad de dispersión y que no tiene barreras ambientales y/o antrópicas para poder alcanzar las zonas que en el futuro tendrán las condiciones potencialmente óptimas para que la especie pueda estar. Es decir, se proyecta que habrá nuevas áreas con las condiciones climáticas óptimas de la especie pero no tenemos conocimiento de las posibilidades de cada especie para llegar ahí. En cambio, si consideramos que no habrá capacidad de dispersión, la realidad es que todas las especies evaluadas mostraron decrementos en su área de distribución potencial actual. Entonces, las zonas con condiciones óptimas se van a mover en el espacio bajo condiciones de cambio climático y depende de la biología de la especie si esta condición las convierte en vulnerables o no bajo condiciones de cambio climático. Por otro lado, también resulta indispensable considerar el nivel del mar, sobre todo para las especies cuya distribución está sumamente restringida a las islas y a las costas.

6.2 Estudios de caso: Mamíferos

De los cinco grupos taxonómicos analizados, el grupo de los mamíferos es uno de los que resultaron menos vulnerables al cambio climático puesto que la mayoría de las especies mostraron un balance general positivo en términos de cambios en el área de distribución. Es decir, considerando el cambio climático hacia el futuro los mamíferos podrían tener más sitios ambientalmente viables que los que tienen en el presente. Sin embargo, el establecimiento de especies en nuevas zonas no depende únicamente de la disponibilidad de clima viable, si no de características ecológicas como capacidad de dispersión, interacciones con otras especies, barreras naturales, entre otras. Por lo tanto, incluir este tipo de información en los análisis podría ofrecer evaluaciones de vulnerabilidad más detalladas. Debido a que en el marco de este proyecto no es posible realizar esto para todas las especies analizadas, tomaremos como estudios de caso a dos especies que mostraron resultados opuestos, *Chaetodipus baileyi* la especie que más área de distribución pierde y *Reithrodontomys spectabilis* la especie que más área de distribución gana.

Chaetodipus baileyi (Merriam, 1894) es un roedor de hábitos nocturnos, terrestres, y es solitario (Méndez Moreno S. y Ceballos, G. 2005). Su distribución geográfica se restringe al Sur de Arizona y el Noreste de México en los estados de Sonora y Sinaloa, en los que habita zonas de desierto o dunas y se le encuentra principalmente en lugares debajo de arbustos o con algún tipo de cobertura vegetal, posiblemente para evitar a los depredadores (Méndez Moreno

S. y Ceballos, G. 2005). Según los resultados del presente estudio, *C. baileyi* es la especie que presenta mayor vulnerabilidad al cambio climático pues es la única especie que presentó un balance general negativo, es decir es mayor el área de distribución que podría perderse, que aquella que podría ganarse tanto para el futuro cercano como para el futuro lejano. Tener una distribución restringida al desierto le confiere mayor vulnerabilidad puesto que el desierto es uno de los ecosistemas con mayor exposición al cambio climático en México, puesto que los mayores aumentos de temperatura se han proyectado en el norte del país (IPCC 2014). Adicional al aumento en la temperatura las proyecciones indican que en el desierto las condiciones de sequía podrían intensificarse (IPCC 2014), lo cual podría afectar de manera indirecta a *Chaetodipus baileyi* ya que si bien puede pasar grandes periodos de tiempo sin beber agua (Méndez Moreno

S. y Ceballos, G. 2005), se ha observado que el tamaño de sus poblaciones está relacionado a la disponibilidad de semillas de las cuales se alimenta, que dependen de ciertas condiciones de humedad (Linzey, A.V. y col. 2008). No obstante en su alimentación es generalista pues puede consumir diversas especies de semillas además de insectos (Méndez Moreno S. y Ceballos, G. 2005), de hecho es el único roedor del desierto con la capacidad de consumir semillas de Jojoba (*Simmondsia chinensis*), la cual es toxica para la mayoría de los mamíferos (Linzey, A.V. y col. 2008).

Uno de los rasgos de las especies que les confiere mayor vulnerabilidad al cambio climático son hábitos especialistas puesto que las especies responden de manera individualizada al cambio climático, y por lo tanto el desacople de interacciones es uno de los posibles efectos del cambio climático en la biodiversidad (Parmesan, C. 2006). En el caso *C. baileyi* su alimentación generalista podría conferirle mayor plasticidad para adaptarse a diversos tipos de alimentación en condiciones de clima cambiante.

Su estado de conservación no es crítico puesto que es una especie común y no se reporta amenaza en cuanto al tamaño de sus poblaciones, dentro de la lista roja de la Unión para la Conservación de la Naturaleza (IUCN por sus siglas en inglés) se encuentra catalogada bajo la categoría de 'Least concern' o preocupación menor.

C. baileyi cuenta con dos subespecies: *Chaetodipus baileyi baileyi* y *Chaetodipus baileyi insularis*. La subespecie *C. baileyi insularis* es mucho más pequeña que el resto de su especie y habita únicamente en isla tiburón. Dentro de la isla su distribución es amplia, se encuentra en vegetación desértica y puede ser ampliamente encontrada. Está catalogada en peligro de extinción por su distribución restringida, no obstante su hábitat se encuentra en buenas condiciones pues no ha sufrido muchos cambios en los años recientes (Álvarez Castañeda, 2003). De hecho se considera que Isla Tiburón es una de las islas del Golfo con mejores condiciones de hábitat por lo que por el momento su estado de conservación no es crítico. En este sentido la subespecie *C. baileyi insularis* podría tener una vulnerabilidad mayor a la de la especie solo en caso de que la isla a la que está restringida sufriera daños ocasionados por el cambio climático, por ejemplo aumento en el nivel del mar.

Reithrodontomys spectabilis Jones & Lawlor, 1965 es un ratón de tamaño mediano del cual se cuenta con poca información. Según los resultados de nuestro estudio, es una especie que se puede considerar poco vulnerable al cambio climático puesto que es mucha mayor el área que gana hacia el futuro, que aquella que pierde en cualquiera de los escenarios. No obstante, esta especie es endémica de México y su distribución se restringe a la isla de Cozumel en el sureste del país (Cuarón y col. 2008). Tener una distribución restringida a una isla es una característica que aumenta la vulnerabilidad de las especies al cambio climático puesto que limita sus capacidades de dispersión (Young y col. 20015). Adicional a ello, su estado de

conservación actual es crítico puesto que además de ser endémica y de distribución restringida, se le considera una especie rara en términos de abundancia (Tellez-Girón G. y O. Sanchez. 2005). Por lo tanto, a pesar de que la especie podría encontrar condiciones ambientalmente viables en muchos nuevos sitios en el futuro a consecuencia del cambio climático, el decline de sus poblaciones podría llegar a un punto que sea imposible colonizar nuevos sitios. Según Cuarón y col. (2008) es en los últimos 10 años ha perdido el 80% de sus poblaciones, y adicional a ello la introducción de especies depredadoras como perros y gatos han tenido un impacto en sus poblaciones. Se encuentra catalogada como amenazada de extinción en la Norma Oficial Mexicana y críticamente amenazada según la lista roja de la IUCN. Finalmente si se revisa con detenimiento los mapas de distribución (Figura 1) se puede observar que para que la especie pudiera hacer uso de las áreas climáticamente viables hacia el futuro tendría que ser capaz de dispersarse y establecer poblaciones viables fuera de la isla y dentro del continente. Además, hacia el futuro lejano, particularmente en las proyecciones realizadas con el RCP 8.5, los sitios nuevos para la distribución de la especie se ubican hacia el centro y norte del país, lo que resulta prácticamente imposible para la dispersión de la especie. Realizar un estudio enfocado únicamente en esta especie permitiría realizar proyecciones dentro de una región biogeográfica acorde a su historia de vida y capacidades de dispersión, y permitiría comprender con mucho mayor detalle su vulnerabilidad ante el cambio climático.

6.3 Estudio de caso: Aves

En el caso del grupo de las aves, todas tuvieron incrementos en su área neta de distribución potencial, pero ¿este resultado en realidad significa que ninguna corre riesgo ante cambios en el clima? Para empezar, si no consideramos migración todas tuvieron pérdidas en el área de distribución potencial, pero tomando en cuenta la dispersión es que hay un aumento el área con condiciones óptimas. También es importante profundizar un poco más en la biología de estas especies para acercarnos a su verdadera vulnerabilidad ante cambio climático. Tomaremos el caso de dos especies. Una que tuvo incrementos importantes en su área de distribución potencial y otra cuyos incrementos fueron poco a comparación del resto de las especies.

Ptychorampus alentius es una de las especies que se vio más impactada de manera negativa sin contar la dispersión (-20.80%), y también fue de las menos beneficiadas con las nuevas área de distribución potencial. Es una especie que en México es 100% residente. Esta especie tiene un rango de distribución sumamente amplio que va desde Baja California, toda la costa del Pacífico de E.E.U.U. hasta llegar a Canadá (BirdLife 2016). En la provincia de British Columbia existe una de sus poblaciones más abundantes que es de casi tres millones de individuos. Sin embargo, sus poblaciones han declinado de manera muy rápida (en los últimos 40 años) por lo que se sugiere poner especial atención en caso de que sea necesario ponerla en alguna categoría de riesgo. Se alimenta de una importante variedad de invertebrados, especialmente crustáceos. No hay una dependencia fuerte a claves ambientales para su reproducción (BirdLife 2016) y el tipo de vegetación terrestre con el que se asocia (matorral) no es vulnerable al cambio climático. Por lo tanto, a pesar de que las condiciones óptimas de distribución de la especie se van a ver reducidas en el futuro, no resulta vulnerable al cambio climático, pues es bastante plástica en cuestiones de alimentación, tiene una amplia extensión y no depende de claves ambientales. Existen otros factores

que se han documentado afectan a la especie de manera importante como el cambio de uso de suelo, el disturbio antropogénico y las especies introducidas.

Synthliboramphus craveri es una de las especies de aves que mayores incrementos (195%) mostró en su área de distribución potencial con y sin migración. Es una especie 100% residente que se encuentra ubicada en la península de Baja California. Su época para poner huevos es en la primera quincena de febrero, lo que significa que debe haber un tipo de clave ambiental para la reproducción. Los tipos de vegetación en donde habita son secos como el matorral xerófilo, que es un tipo de vegetación poco vulnerable al cambio climático (Trejo et al. 2007). Su alimentación es bastante plástica pues no depende únicamente de uno o un par de organismos para sobrevivir, sino que puede alimentarse de diferentes especies pelágicas, crustáceos y larvas. El número de individuos total oscila entre los 10-20 000. Los disturbios ocasionados por especies introducidas y contaminación han hecho que desaparezcan colonias de anidación. Además tienen muy pequeñas tasas de reproducción y una maduración lenta. Durante la época pos reproductiva, pueden dispersarse hasta 100 km de su sitio de anidación. Dada la biología y ecología de esta especie, es posible intuir que esta especie está más en peligro por otros factores que por el cambio climático. El cambio en el clima que se proyectó no le afectará de manera negativa, pero la constante perturbación

6.4 Estudio de caso: Reptiles

Las especies de reptiles que se modelaron en esta evaluación son todas especies endémicas del país. La mayoría se verán afectadas de forma negativa por el cambio en el clima a lo largo del siglo XXI. Esto es evidente si en los cambios que se estimaron no se consideran todas las áreas potenciales, que dadas las condiciones de vagilidad limitada de las especies no logran ocupar.

La especie de lagartija *Phyllodactylus homolepidurus* es endémica del oeste de México, en particular del estado de Sonora, aunque se ha reportado su presencia en el norte de Sinaloa (Frost et al 2007), esta especie es proveniente de la isla de San Pedro Nolasco. Esta isla se encuentra dentro de las Áreas Naturales Protegidas de flora y fauna, de las Islas de Golfo de California (<http://islasgc.conanp.gob.mx/>). Otra de las especies amenazadas, es *Petrosaurus thalassinus*, una lagartija con patrones muy coloridos, su garganta presenta colores amarillo-anaranjados, y su cabeza es de color turquesa, en el dorso presenta una tonalidad azulada (Jennings 1990). Ya que es una lagartija llamativa, es muy común que se comercialice de forma ilegal. Se distribuye en la Península de Baja California (Grismer 2002). En la región del Cabo, en Baja California, se ha reportado por lo menos la presencia de cuatro poblaciones, estas se encuentran divididas por islas: una en la Sierra la Laguna y sus regiones adjuntas, otra en la Sierra Trinidad, las dos restantes en las islas de Espíritu Santo y Partida Sur (Grismer 2002). Ambas especies actualmente están sujetas a protección especial por parte de la NOM-059-2010.

Dos especies de reptiles, muestran porcentajes de cambio muy positivos. A pesar de ser especies endémicas, presentan un cambio total positivo superior al 100%, el cual va incrementando a lo largo del tiempo y entre más extremo es el escenario. Revisamos el caso de la especie *Eridiphas slevini*. Esta especie de culebra es considerada de hábitos crípticos, se distribuye en el sur de la Península de Baja California, y está representada por unas cuantos ejemplares en colecciones científicas. Lo que más se ha estudiado de esta especie es su

diferenciación de subespecies insulares, y su distribución general, pero de su biología se conoce poco. Básicamente, debido a su distribución se le puede encontrar en cierto tipo de climas, que comprende, desde muy árido a semicálido, en donde el promedio anual de temperatura ronda los 23°C. Debido a estos climas se asocia principalmente a áreas rocosas, como son rocas volcánicas, en arroyos rocosos que se encuentran sobre terrenos arenosos (Grismer, 2002). Está considerada como una especie amenazada por la NOM- 059-2010. Dadas estas características, y principalmente por el bajo número de registros (22) consideramos que antes de generar conclusiones a partir de los modelos de distribución potencial, es necesario completar el muestreo de puntos de presencia de la especie que representen de forma uniforme la distribución conocida de ésta y por lo tanto todas las condiciones ambientales que ocupa. Por otra parte, *Phyllodactylus unctus* es una de las especies más comunes en la región del Cabo, de actividad nocturna principalmente (Grismer 2002), factor que podría favorecer su capacidad de adaptación al cambio climático. Se encuentra en formaciones rocosas o cuevas, es conspicua en invierno, por lo que sus conductas se podrían ver afectadas por el cambio en las señales ambientales; veranos más largos – inviernos cortos. Aunque los modelos de distribución potencial, son muy utilizados para inferir cambios en las distribuciones de las especies a por efecto antrópicos o climáticos, estos solo nos dejan entender el comportamiento del nicho grinelliano de las especies, por lo que se requieren análisis a escalas más finas que permitan conocer la dinámica de las especies con su medio ambiente. Aspectos de la fisiología, comportamiento entre otros, son claves para poder hacer una valoración más completa sobre la vulnerabilidad de las especies de islas al cambio climático. Este trabajo es un aporte importante sobre el grado de vulnerabilidad de las especies, que debe ser completado con información sobre los rasgos intrínsecos y extrínsecos de la biología de las especies.

6.5 Estudios de caso: Anfibios

Los anfibios son organismos muy sensibles al clima puesto que su temperatura corporal está determinada por el intercambio de calor con el aire, el agua y el suelo; y a su vez la temperatura corporal influye en procesos corporales como el metabolismo, entre otros (Carey y Alexander 2003). Diversos estudios han documentado que las variaciones en el clima tienen efectos directos e indirectos en los anfibios tanto a nivel de individuos, poblaciones y comunidades (Blaustein y col. 2010, Carey y Alexander 2003). Por lo tanto, debido a sus características biológicas los anfibios son un grupo vulnerable al cambio climático. En este estudio se revisó como estudio de caso a dos especies de anfibios con la finalidad de complementar los análisis de vulnerabilidad considerando las características biológicas de las especies.

Según los resultados del presente estudio, *Anaxyrus californicus* es una especie poco vulnerable al cambio climático en términos de pérdida de sitios ambientalmente viables para su distribución. Hacia el futuro lejano, considerando un escenario de cambio climático drástico (RCP 8.5), *A. californicus* podría tener 46% más área con condiciones ambientales viables que las que tiene en el presente. Sin embargo, *A. californicus* es una especie con requerimientos de hábitat muy específicos, lo que la vuelve vulnerable por posibles impactos indirectos.

A. californicus se distribuye en una particular conjunción de planicies costeras, montañas y pendientes desérticas del centro y sur de California y noreste de Baja California. Habita en arroyos, matorrales y desierto, y se le puede encontrar también en bancos de arena y en

vegetación riparia. No obstante, en el sureste de los estados unidos se han documentado impactos en los sistemas hídricos de la región, los cuales son atribuibles al cambio climático (IPCC 2014). No se ha documentado que esto esté ocurriendo específicamente en el área de distribución de la especie, sin embargo los impactos están ocurriendo en ríos, lagos, inundaciones y/o sequías (IPCC 2014), y por lo tanto pone a la especie en una situación vulnerable. Adicional a ello, *A. californicus* tiene requerimientos de hábitat muy especializados, pues requiere que los arroyos sean poco profundos y de lento movimiento, además requiere de vegetación riparia ocasionalmente inundada (DRECP 2012), y por lo tanto, alteraciones en el sistema hídrico pone en alto riesgo a la especie. Se ha documentado por ejemplo, que *A. californicus* ha sido extirpada de aproximadamente dos terceras partes de su área de distribución debido a la pérdida de hábitat y a alteraciones en los sistemas de ríos a causa de la construcción de presas (Jennings and Hayes 1994).

En términos de conservación, *A. californicus* se encuentra catalogada dentro de la lista roja de la IUCN como amenazada puesto que sus poblaciones están en declive. Se ha estimado que en los últimos 10 años sus poblaciones disminuyeron en un 50% (Hammerson y Santos-Barrera 2004). Esto no necesariamente está relacionado con el cambio climático, no obstante es importante tomarlo en consideración puesto que por un lado estos procesos pueden actuar en sinérgia con el cambio climático, y por otro, el establecimiento de poblaciones en las nuevas áreas con condiciones ambientales viables requieren en primera instancia de que las especies puedan migrar hacia esos sitios, situación que puede ser muy complicada si las poblaciones continúan en declive.

Por otro lado, *Aneides lugubris* es una especie altamente vulnerable al cambio climático en términos de posibles cambios en el área de distribución según los resultados de nuestro estudio. Para el futuro lejano y en el escenario más drástico, *A. lugubris* podrían tener 68% menos sitios ambientalmente viables para su distribución que lo que tiene en el presente.

A. lugubris es una salamandra de hábitos nocturnos que habita en bosques de encino. Se le encuentra principalmente en la tierra bajo la hojarasca, rocas y troncos, y también trepa en los árboles. Se distribuye en la costa de California y una pequeña porción de Baja California Norte en México. Las proyecciones indican que en esta región habrán aumentos en la temperatura y las sequías podrían intensificarse (IPCC 2014). Al ser los anfibios organismos sensibles a las condiciones de temperatura y humedad del ambiente, esta proyección aumenta la vulnerabilidad de la especie. En el caso específico de *A. lugubris* se ha reportado que es más activa cuando la humedad del suelo es alta. Inicia sus procesos reproductivos a finales de la primavera e inicios del verano y no se ha documentado cambios al respecto. Sin embargo, en otras especies de anfibios se ha observado que la llegada a estanques de reproducción, y/o la iniciación de los cantos que marcan el inicio de la reproducción han comenzado anticipadamente, lo que impacta a las poblaciones (Blaustein y col. 2010). Finalmente en términos de su conservación la especie no se encuentra en un estado crítico. Dentro de la lista roja de la IUCN está catalogada como 'preocupación menor', y aunque se ha reportado que algunas de sus poblaciones se han perdido desde los años 70, se mantiene como una especie común en términos poblacionales (Parra-Olea y col. 2008), por lo tanto su estado de conservación no es algo que aumente su vulnerabilidad al cambio climático. En conclusión, *Aneides lugubris* es una especie vulnerable al cambio climático, tanto por pérdida de sitios con clima viable para su distribución, como por posibles impactos indirectos en su hábitat ocasionados por la intensificación de las sequías, alteraciones en los sistemas hídricos, y aumento en la temperatura.

6.6 Estudios de caso: Plantas

Para el grupo de las plantas se va a revisar el caso de la especie *Echites yucatanensis* y *Pachycereus pecten-aboriginum*. La primera especie fue la que en términos netos más área de distribución potencial perdió en el futuro del grupo de las plantas (-39.92%) y la segunda fue la que más área ganó en comparación del resto de las especies (44.41%).

E. yucatanensis es una especie de planta trepadora con flores blancas y con frutos de hasta 30 cm de largo. Su área de distribución abarca 6 países en los que se incluye México (El Salvador, Belice, Honduras, Guatemala y Nicaragua). Por lo tanto, aunque pierda un porcentaje de área de distribución considerable a futuro, su distribución sigue siendo suficientemente amplia como para mantener poblaciones estables. Los tipos de vegetación en los que crece esta especie son la selva perennifolia, caducifolia y espinosa. Estos tipos de vegetación son relativamente vulnerables al cambio climático (Trejo et al. 2007). La cantidad de precipitación de la zona en la que actualmente se distribuye esta especie se espera se reduzca de manera importante en el futuro. Esta especie es dependiente a ciertas claves ambientales que le indican sobre la floración (marzo-agosto) y cuándo producir frutos (febrero-agosto). En resumidas cuentas, tiene plasticidad en términos de tipo de vegetación en los que puede estar aunque éstos sean relativamente vulnerables a cambios en el clima, sí depende de claves ambientales para la reproducción, pero su etapa de floración y de producción de frutos puede varios meses por lo que un desajuste temporal por cambios en el clima no resultaría sumamente grave para esta etapa del ciclo de vida. Por lo tanto, esta especie a pesar de que se reducirá su área de distribución potencial, no resultaría tan vulnerable al cambio climático.

Por otro lado, *Pachycereus pecten-aboriginum* es una especie perteneciente a la familia de las cactáceas. Esta cactácea columnar, es endémica de México y se encuentra en los estados de Baja California Sur, Oaxaca, Sinaloa, Sonora y el Itzmo de Tehuantepec. Su biología floral puede cambiar a lo largo de su distribución, lo que pareciera indicar que no tiene una relación tan estrecha con las claves ambientales para florecer. Cuenta con varios polinizadores diurnos y nocturnos por lo que es plástica en términos de la relación polinizador-flor. El tipo de vegetación en el que se encuentra es el matorral y la selva caducifolia que son los dos tipos de vegetación menos vulnerables al cambio climático. Todas estas características biológicas y ecológicas nos dejan claro que el cambio climático de primera instancia no representa un factor riesgoso para la especie. El país y por lo tanto otros tipos de vegetación en el territorio nacional se volverán más secos y cálidos, características climáticas de los hábitats de la especie. No depende estrechamente de un único organismo que le permita la reproducción, ni tampoco tiene claves ambientales reproductivas tan estrictas. Por lo tanto, a pesar de que es una especie de la familia de las cactáceas (grupo con varias especies en categoría de riesgo), en primera instancia el cambio climático no parece representar un riesgo importante. Idealmente, se necesitaría un conocimiento más detallado sobre cómo cambia su dinámica poblacional con cambios en el clima, pero con la información que se tiene hasta el momento el riesgo pudiera ser poco. Existe un estudio demográfico de poblaciones de esta especie bajo diferentes condiciones de disturbio, puesto que parece que el cambio de uso de suelo está impactando a las poblaciones, y en los años de estudio sus poblaciones crecieron (Morales-Romero et al.

2012).

6.7 Discusión Metodológica

Hubo una preocupación con la proyección hecha para algunas especies en las que el área de distribución potencial proyectada a futuro fue mucho mayor a comparación del presente. En un principio, se decidió utilizar Maxent y GAM porque nos basamos en resultados de la tesis doctoral de Cuervo-Robayo (2014), en la que se evaluó la capacidad de transferencia de 8 algoritmos de modelado de nicho. Dentro de sus resultados, Maxent y GAM fueron de los algoritmos que con mayor frecuencia predecían correctamente las presencias de las especies. Además, otra conclusión obtenida a partir de este trabajo, fue que era mejor incorporar más de un algoritmo para proyectar a otros tiempos. Sin embargo, hicimos pruebas para algunas de las especies cuyas predicciones eran sumamente mayores a su distribución actual y nos percatamos de que GAM estaba sobreproyectando área en comparación de los resultados obtenidos únicamente con Maxent.

Las diferencias entre las respuestas de los algoritmos pueden ser causados por las diversas suposiciones hechas por cada método al extrapolar las variables ambientales más allá del rango de los datos utilizados para definir la distribución (Pearson et al. 2006). En la literatura encontramos que Maxent es típicamente conocido por su tendencia a sub-ajustar las condiciones ambientales de las especies, esta tendencia es más aguda al realizar extrapolaciones en tiempo o área (Elith y Graham 2009, Elith y Leathwick 2009). Adicionalmente, Maxent tiene implementada una función denominada “clamping” la cual se encarga de limitar la respuesta de los límites inferiores y superiores de las variables al rango en el que es calibrado para evitar la extrapolación sobre condiciones climáticas no-análogas (Phillips et al 2006a). En el caso de GAM, se ha observado que al considerar una capacidad de dispersión ilimitada la respuesta en extrapolaciones en tiempo tiene a predecir más área que otros algoritmos (Pearson et al 2006).

7. REFERENCIAS

- Aguirre-Muñoz, A., D. A. Croll, C. J. Donlan, R. W. Henry III, M. A. Hermosillo, G. R. Howald, B. S. Keitt, L. Luna-Mendoza, M. Rodríguez-Malagón, and 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, and E. Peters Recagno. 2009. Islas de México. Un recurso estratégico. INECC, SEMARNAT, The Nature Conservancy, Conservación de Islas, Cicese.
- Anderson, R. P. 2013. A framework for using niche models to estimate impacts of climate change on species distributions. *Annals of the New York Academy of Sciences* **1297**:8-28.
- Araújo, M. B., and M. New. 2007. Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology & Evolution* **22**:42.
- Araújo, M. B., and R. G. Pearson. 2005. Equilibrium of species' distribution with climate. *Ecography* **28**:693-696.
- BirdLife. 2016. www.birdlife.org.
- Carey, C., and M. A. Alexander. 2003. Climate change and amphibian declines: is there a link? *Diversity and Distributions* **9**:111-121.
- CONABIO. 2015. Biodiversidad Mexicana. www.biodiversidad.gob.mx.
- Cuervo-Robayo, A. 2014. Fortaleciendo los análisis de cambio climático en la aplicación de los modelos de distribución potencial. Tesis para obtener grado de Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Coppack, T., and F. Pulido. 2004. Photoperiodic response and the adaptability of avian life cycles to environmental change. *Advances in Ecological Research* **35**:131-150.
- de Souza Muñoz, M., R. De Giovanni, M. de Siqueira, T. Sutton, P. Brewer, R. Pereira, D. Canhos, and V. Canhos. 2011. openModeller: a generic approach to species' potential distribution modelling. *GeoInformatica* **15**:111-135.
- Diniz-Filho, J. A. F., L. Mauricio Bini, T. Fernando Rangel, R. D. Loyola, C. Hof, D. Nogués-Bravo, and M. B. Araújo. 2009. Partitioning and mapping uncertainties in ensembles of forecasts of species turnover under climate change. *Ecography* **32**:897-906.
- Elith, J., and C. H. Graham. 2009. Do they? How do they? WHY do they differ? On finding reasons for differing performances of species distribution models. *Ecography* **32**:66-77.
- Elith, J., and J. R. Leathwick. 2009. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* **40**:677.
- Fei, S., L. Liang, F. L. Paillet, K. C. Steiner, J. Fang, Z. Shen, Z. Wang, and F. V. Hebard. 2012. Modelling chestnut biogeography for American chestnut restoration. *Diversity and Distributions*:no-no.

- Fernandez-Eguiarte, A., J. Zavala-Hidalgo, R. Romero-Centeno, and 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.
- Frost, D.R., Hammerson, G.A. & Gadsden, H. 2007. *Phyllodactylus homolepidurus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2007: e.T64045A12739488.
<http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2007.RLTS.T64045A12739488.en>.
Consultado el 25 Enero 2016.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México.
- Ficetola, G. F., L. Maiorano, A. Falcucci, N. Dendoncker, L. Boitani, E. Padoa-Schioppa, C. Miaud, and W. Thuiller. 2010. Knowing the past to predict the future: land-use change and the distribution of invasive bullfrogs. *Global Change Biology* **16**:528-537.
- Grismer LL. 2002. Amphibians and reptiles of Baja California including its Pacific Islands and the islands in the Sea of Cortes. Univ. California Press, Berkeley.
- Grismer LL. 2002. Amphibians and reptiles of Baja California including its Pacific Islands and the islands in the Sea of Cortes. Univ. California Press, Berkeley.
- Guo, Q., and Y. Liu. 2010. ModEco: an integrated software package for ecological niche modeling. *Ecography* **33**:637-642.
- Hijmans, R. J., and C. H. Graham. 2006. The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions. *Global Change Biology* **12**:2272-2281.
- Hutchinson, G. E. 1957. Concluding Remarks. *Cold Spring Harbour Symposia on Quantitative Biology* **22**:415-427.
- Ibarra-Cardena, C., T. Cavazos, J. A. Salinas, B. Martínez, G. Colorado, P. De Grau, R. Prieto González, A. C. Conde Álvarez, A. Quintanar, J. S. Santana Sepúlveda, R. Romero Centeno, M. E. Maya Magaña, J. G. Rosario de La Cruz, M. R. Ayala Enríquez, H. Carrillo Tlazazanatza, O. Santiesteban, and M. E. Bravo. 2013. ACTUALIZACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA MÉXICO COMO PARTE DE LOS PRODUCTOS DE LA QUINTA COMUNICACIÓN NACIONAL. INECC.
- Jennings, M.R. 1990. *Petrosaurus thalassinus*. *Catalogue of American Amphibians and Reptiles* (496: 1-3)
- IPCC. 2009. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. 2014. Summary for Policymakers. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. in C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L. L. White, editors. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Koleff, P., and J. Soberón. 2009. Patrones de diversidad espacial en grupos selectos de especies. Pages 323-364 *Capital Natural de México vol. 1: Conocimiento actual de la biodiversidad*. CONABIO, México.
- Kreft, H., and W. Jetz. 2010. A framework for delineating biogeographical regions based on species distributions. *Journal of Biogeography*:1-25.
- Memmott, J., P. G. Craze, N. M. Waser, and M. V. Price. 2007. Global warming and the disruption of plant–pollinator interactions. *Ecology Letters* **10**:710- 717.
- Michalet, R., C. Schöb, C. J. Lortie, R. W. Brooker, and R. M. Callaway. 2014. Partitioning net interactions among plants along altitudinal gradients to study community responses to climate change. *Functional Ecology* **28**:75- 86.
- Morales-Romero, D., H. Godínez-Álvarez, J. Campo-Alves, and F. Molina- Frenaner. 2012. Effects of land conversion on the regeneration of *Pachycereus pecten-aboriginum* and its consequences on the population dynamics in northwestern Mexico. *Journal of Arid Environments* **77**:123- 129.
- Pearson, R. G., and T. Dawson. 2003a. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology & Biogeography* **12**:361-371.
- Pearson, R. G., and T. P. Dawson. 2003b. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography* **12**:361-371.
- Pearson, R. G., W. Thuiller, M. B. Araújo, E. Martínez-Meyer, L. Brotons, C. McClean, L. Miles, P. Segurado, T. P. Dawson, and D. C. Lees. 2006. Model-based uncertainty in species range prediction. *Journal of Biogeography* **33**:1704-1711.
- Peterson, A. T., J. Soberón, R. G. Pearson, R. P. Anderson, E. Martínez-Meyer, M. Nakamura, and M. Araújo. 2011a. *Ecological niches and geographic distributions (Monographs in population biology; no. 49)*. Princeton University Press, United Kingdom.
- Peterson, A. T., J. Soberón, R. G. Pearson, R. P. Anderson, E. Martínez-Meyer, M. Nakamura, and M. B. Araújo. 2011b. *Ecological Niches and Geographic Distributions*. Princeton University Press, Princeton, USA.
- Phillips, S. J., R. P. Anderson, and R. E. Schapire. 2006a. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* **190**:231-259.
- Phillips, S. J., R. P. Anderson, and R. E. Schapire. 2006b. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* **190**:231-259.
- Phillips, S. J., and M. Dudik. 2009. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* **31**:161-175.
- PNUD. 2015. *Glosario de Términos*. <http://www.pnud.org.co/>.
- Rodríguez-Soto, C. 2010. *Distribución potencial del jaguar (Panthera onca) en México: Identificación de zonas prioritarias para su conservación*.

- Universidad Autonoma de Baja California, Mexicali, Baja California, México.
- Sánchez-Fernández, D., P. Abellán, F. Picazo, A. Millán, I. Ribera, and J. M. Lobo. 2013. Do protected areas represent species' optimal climatic conditions? A test using Iberian water beetles. *Diversity and Distributions*:n/a-n/a.
- Serra-Diaz, J. M., J. Franklin, M. Ninyerola, F. W. Davis, A. D. Syphard, H. M. Regan, and M. Ikegami. 2014. Bioclimatic velocity: the pace of species exposure to climate change. *Diversity and Distributions* **20**:169-180.
- Shirley, S. M., Z. Yang, R. A. Hutchinson, J. D. Alexander, K. McGarigal, and M. G. Betts. 2013. Species distribution modelling for the people: unclassified landsat TM imagery predicts bird occurrence at fine resolutions. *Diversity and Distributions*:n/a-n/a.
- Soberón, J., and M. Nakamura. 2009. Niches and distributional areas: Concepts, methods, and assumptions. *PNAS* **106**:19644-19650.
- Soberón, J. M. 2010. Niche and area of distribution modeling: a population ecology perspective. *Ecography* **33**:159-167.
- Stenseth, N. C., A. Mysterud, G. Ottersen, J. W. Hurrell, K.-S. Chan, and M. Lima. 2002. Ecological effects of climate fluctuations. *Science* **297**:1292- 1296.
- Thuiller, W. 2003. BIOMOD - optimizing predictions of species distribution and projecting potential future shifts under global change. *Global Change Biology* **9**:1353-1362.
- Thuiller, W., B. Lafourcade, R. Engler, and M. B. Araujo. 2009. BIOMOD - a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography* **32**:369-373.
- Trejo, I., J. Hernández, and L. Villers. 2007. Afectación de las comunidades vegetales de México ante el cambio climático. XI Encuentro de Geógrafos de America Latina. Geopolítica, globalización y cambio ambiental: retos para el desarrollo Latinoamericano.
- Trejo, I., E. Martínez-Meyer, E. Calixto-Pérez, S. Sánchez-Colón, R. Vázquez de la Torre, and L. Villers-Ruiz. 2011. Analysis of the effects of climate change on plant communities and mammals in México. *Atmósfera* **24**:1- 14.
- Ureta, C., C. González-Salazar, E. J. González, E. R. Álvarez-Buylla, and E. Martínez-Meyer. 2013. Environmental and social factors account for Mexican maize richness and distribution: A data mining approach. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **179**:25-34.
- Ureta, C., C. Martorell, J. Hortal, and J. Fornoni. 2012. Assessing extinction risks under the combined effects of climate change and human disturbance through the analysis of life-history plasticity. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* **14**:393-401.
- Vanderwel, M. C., and D. W. Purves. 2013. How do disturbances and environmental heterogeneity affect the pace of forest distribution shifts under climate change? *Ecography*:no-no.

Williams, J. W., and S. T. Jackson. 2007. Novel climates, no-analog communities, and ecological surprises. *Frontiers in Ecology and the Environment* **5**:475-482.

WorldClim. 2015. WorldClim-Global Climate Data.
<http://www.worldclim.org/bioclimate>.



Plataforma de colaboración sobre
**CAMBIO CLIMÁTICO
Y CRECIMIENTO VERDE**
entre Canadá y México

Este documento fue desarrollado en el marco de la Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México, todos los derechos reservados

Derechos reservados © 2018

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)

Montes Urales 440, Lomas de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo, CDMX C.P. 11000

www.mx.undp.org

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Blvd. Adolfo Ruiz Cortines No. 4209, Colonia Jardines en la Montaña, Delegación Tlalpan, CDMX CP. 14210

www.gob.mx/inecc



Environment
Canada

Environnement
Canada

SEMARNAT
SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



INECC
INSTITUTO NACIONAL
DE ECOLOGÍA
Y CAMBIO CLIMÁTICO



Al servicio
de las personas
y las naciones