

Servicios de consultoría para la modelación de la distribución potencial actual y futura de las especies invasoras de mayor riesgo para México

Número y Título del Proyecto: 00089333 “Aumentar las Capacidades Nacionales para el Manejo de las Especies Exóticas Invasoras (EEI) a través de la Implementación de la Estrategia Nacional de EEI”.

REPORTE FINAL

Realizado por: Dr. Enrique Martínez Meyer
Colaboradores: Dra. Ángela P. Cuervo-Robayo
Biol. G. Abisay Ortiz Haro
M. en C. Luis A. Osorio-Olvera

Institución Proponente: CONABIO, GEF Y PNUD

Fecha de elaboración: noviembre 30 de 2016

Correo electrónico: emm@ib.unam.mx



Resumen

Título: Aumentar las Capacidades Nacionales para el Manejo de las Especies Exóticas Invasoras (EEI) a través de la Implementación de la Estrategia Nacional de EEI.

Objetivo: Desarrollar un esquema de modelación que permita obtener mapas de la distribución potencial actual y bajo diferentes escenarios de cambio climático en México para 60 especies identificadas de alto riesgo de invasión.

Autor: Enrique Martínez Meyer

Modo de citar: **PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo).** 2017. Modelación de la distribución potencial actual y futura de las especies invasoras de mayor riesgo para México. Elaborado en el marco del proyecto GEF-PNUD 089333 “Aumentar las capacidades de México para manejar especies exóticas invasoras a través de la implementación de la Estrategia Nacional de Especies Invasoras”. Martínez-Meyer, E., A.P. Cuervo-Robayo, G.A. Ortiz-Haro y L.A. Osorio-Olvera. Instituto de Biología, UNAM. 39 pp.

Área objeto del informe: Especies invasoras.

Fecha de inicio: Junio 2016

Fecha de terminación: Noviembre 2016

Resumen: En este estudio se modeló la distribución potencial actual y futura de 60 especies reconocidas en el mundo como de alta invasividad e identificadas de alto riesgo para México, con el fin de identificar las zonas más susceptibles a la invasión en el país. Para ello, se siguió el método de la distancia al centroide y la construcción de un elipsoide multidimensional de volumen mínimo que representa el nicho ecológico de la especie con base en los registros mundiales. El nicho de cada especie fue proyectado a escenarios climáticos de alta resolución (1 km) en México para el presente y bajo dos escenarios futuros de emisiones, uno conservador (RCP 4.5) y uno drástico (RCP 8.5) y para dos períodos temporales, uno cercano (2050) y otro lejano (2070). Los escenarios climáticos futuros fueron construidos promediando los modelos generales de circulación: MPI-ESM-LR, GFDL-CM3, HADGEM2-ES y CNRM. Los resultados obtenidos indicaron que 57 de las 60

especies encuentran condiciones favorables para establecerse en el país, siendo *Hedychium coronarium*, *Melinis minutiflora*, *Pennisetum setaceum* y *Arundo donax* las que presentaron una mayor cobertura potencial en el país, con una extensión de más del 90% del territorio nacional. Las regiones áridas del norte de México son las zonas más vulnerables a la invasión de las especies analizadas, alcanzando una riqueza potencial de hasta 47 especies. Finalmente, el cambio climático parece no ser una amenaza importante para el establecimiento de la mayoría de las especies estudiadas, ya que 48 de las 60 especies mostraron una tendencia a reducir el área favorable para su establecimiento bajo los escenarios analizados y sólo *Deroceras reticulatum* mostró una tendencia a incrementar considerablemente su área potencialmente favorable. Los resultados de este trabajo identificaron a las especies más peligrosas y las áreas más vulnerables a la invasión, lo que contribuye a la implementación de acciones de prevención y control puntuales y dirigidas, como lo establece la Estrategia Nacional sobre Especies Invasoras.

Tabla de contenido

1	Introducción	4
2	Antecedentes	5
	Especies invasoras y el cambio climático	5
	Especies invasoras en México	6
	Modelos de nicho ecológico: ventajas y desventajas	6
	La estructura interna del nicho ecológico	7
3	Objetivo general	8
4	Métodos	8
	i. Bases de datos de las especies invasoras	9
	ii. Modelación de la distribución potencial actual y futura	11
	iii. Riqueza de especies invasoras	14
5	Resultados	15
	Riqueza potencial de especies	23
	Riqueza potencial en áreas naturales protegidas (ANP)	30
6	Conclusiones y Recomendaciones	32
	Referencias bibliográficas	35
	ANEXOS	39

1 Introducción

Esta consultoría tuvo como propósito identificar las áreas más susceptibles de invasión por efecto de cambio climático. Se utilizó el método de la distancia al centroide, el cual permite identificar los óptimos climáticos que en la actualidad favorecen la presencia de las especies, y que permiten detectar áreas susceptibles a potencial invasión en el futuro (Martínez-Meyer et al. 2013).

Las especies invasoras representan una de las principales amenazas para la conservación de la biodiversidad, el aprovechamiento de los servicios ecosistémicos y la producción agrícola de un país (Zavaleta et al. 2001, Lobell et al. 2011). También pueden generar grandes daños económicos e impactos significativos a la salud pública (Andersen et al. 2004) (Hellmann et al. 2008, Thuiller et al. 2008). Asimismo, las especies invasoras interactúan con otros elementos de cambio global, como la deforestación y el cambio climático; dicha interacción puede incrementar la probabilidad de presencia y abundancia de algunas de estas especies, potenciando su posible daño a los sistemas naturales y a las sociedades humanas.

México es un país megadiverso y vulnerable a la presencia de las especies invasoras. Es por esta razón que en el año 2010 se desarrolló la Estrategia Nacional sobre Especies Invasoras (CANEI 2010), la cual tiene el propósito de prevenir el establecimiento, controlar y erradicar a las especies invasoras del país. Dentro del marco preventivo de la estrategia, se estableció como objetivo principal generar el conocimiento sobre la interacción de las especies invasoras y el cambio climático, lo cual permite diseñar estrategias para el monitoreo y manejo de estas especies. Existen varias aproximaciones matemáticas para evaluar el potencial de propagación de las especies invasoras (Veech et al. 2011). Estos métodos requieren de datos muy precisos sobre la capacidad de dispersión, éxito reproductivo y crecimiento poblacional de las especies (Veech et al. 2011). Desafortunadamente, en la actualidad no se cuenta con toda esta información para la mayoría de las especies, sin embargo, se han desarrollado métodos que permiten aproximar las áreas de invasión de las especies, como los modelos de nicho ecológico, que es un enfoque correlativo entre los sitios de la presencia de una especie y sus condicionantes ambientales para producir mapas de favorabilidad y, por ende, de distribución potencial (Peterson et al. 2011). Los modelos de nichos ecológicos han sido ampliamente utilizados para el monitoreo de las invasiones biológicas bajo el efecto del cambio climático (Jeschke & Strayer. 2008, Thuiller et al. 2008, Vicente et al. 2016).

2 Antecedentes

Especies invasoras y el cambio climático

Las especies invasoras se definen como especies no nativas, que representan una de las principales causas de pérdida de la biodiversidad en el mundo (Pejchar & Mooney 2009). Las propagaciones de estas especies en nuevos ambientes pueden causar daños económicos (Zavaleta et al. 2001), cambios ecológicos irreversibles (Andersen et al. 2004), pérdida de los servicios ecosistémicos (Pechjar & Moohey. 2009) e impactos en la salud pública (McMichael & Beaglehole 2000). Algunas especies no nativas logran establecerse sin generar disturbios en el ambiente. No obstante, otras son consideradas como perjudiciales ya que logran traspasar barreras geográficas y ambientales, reproducirse e impactar a las poblaciones nativas (Andersen et al. 2004). Sus impactos modifican la funcionalidad de los ecosistemas, alteran a las comunidades y abundancias de las especies nativas, y en algunos casos pueden incrementar la probabilidad de extinción de las poblaciones de éstas (Andersen et al. 2004, Pejchar & Mooney 2009, CANEI 2010). Estas cadenas de efectos negativos se pueden exacerbar por otros factores de presión, como el cambio climático (Hellmann et al. 2008).

El cambio climático ha generado cambios en la fenología, abundancia y distribución de las especies y la composición de las comunidades bióticas (Parmesan & Yohe 2003, Peterson et al. 2015). También se estima que podría causar grandes pérdidas económicas en el sector agrícola (Lobell et al. 2011), y potencialmente favorecer la expansión de especies transmisoras de enfermedades, como los mosquitos del género *Aedes* causantes del dengue y chikungunya (Campbell et al. 2015). El cambio climático también puede potenciar la pérdida de hábitat debido al incremento del nivel del mar, el aumento en la frecuencia de incendios y la recesión de los glaciares. También puede incrementar la probabilidad de expansión de poblaciones de un gran número de especies exóticas, incluyendo plantas, animales y patógenos, que compiten con o infectan a especies nativas (Mawdsley et al. 2009). En el caso de las especies invasoras, si en la actualidad estas especies ocupan climas que en el futuro sean más frecuentes, esto favorecería su propagación y potencial de invasión. Por lo anterior, es necesario realizar evaluaciones que caractericen la exposición al cambio climático y así poder detectar de forma temprana aquellas áreas más susceptibles de ser invadidas por especies exóticas.

Especies invasoras en México

La Estrategia Nacional sobre Especies Invasoras (CANEI 2010) se basa en el principio preventivo y entre sus objetivos busca generar conocimiento en torno a las sinergias que ocurren entre factores de cambio global (como cambio climático y deforestación) y la invasión de especies. Esto con el propósito de mejorar la toma de decisiones. El sistema de alerta temprana o de prevención también tiene como objetivo generar un sistema de monitoreo que permita priorizar los costos y el tiempo que se deben invertir para las acciones de prevención del establecimiento y erradicación de las especies invasoras, razón por lo cual es necesario generar información espacial de alta calidad que permita identificar las zonas más susceptibles a invasión bajo los efectos de cambio climático.

Modelos de nicho ecológico: ventajas y desventajas

Los modelos de nicho ecológico han jugado un papel importante en las evaluaciones preventivas de riesgos por efecto del cambio climático. Permiten entender los rangos geográficos de las especies, e identificar aquellos factores que limitan sus distribuciones (Jeschke & Strayer 2008, Peterson et al. 2011). Existen también los modelos denominados mecanísticos o basados en procesos, que requieren información sobre las tolerancias fisiológicas de las especies, relacionados con aspectos demográficos de las mismas (ej., dispersión, madurez reproductiva) para inferir su respuesta al ambiente y sus cambios (Kearney & Porter 2009, Peterson et al. 2011, Lira-Noriega et al. 2013). Sin embargo, estos modelos requieren de una gran cantidad de información inexistente o difícil de conseguir para la mayoría de las especies; por lo tanto, no son muy ampliamente utilizados.

Otro tipo de modelos son los métodos correlativos. Son métodos sencillos, que sólo requieren de información sobre la presencia de las especies y una serie de parámetros climáticos actuales para generar un modelo de las condiciones que favorecen la presencia de una especie (i.e., un modelo de su nicho ecológico). Este modelo es proyectado al espacio geográfico para generar un mapa que representa la distribución de las condiciones favorables para la especie, o su distribución potencial (Peterson et al. 2011). El modelo de nicho también puede ser proyectado en escenarios de cambio climático o en otras regiones susceptibles a la invasión (Jeschke & Strayer 2008, Peterson et al. 2011). Por esta razón es posible evaluar una amplia gama de especies con estos modelos, como por ejemplo especies de cultivos, plagas, enfermedades y agentes de control biológico (Zambrano et al. 2006, Jeschke & Strayer 2008, Peterson et al. 2011, Vicente et al. 2016). Las proyecciones geográficas de estos modelos se pueden utilizar como insumos en la

búsqueda de estrategias para monitorear el riesgo de invasión en condiciones ambientales actuales y futuras (Vicente et al. 2016).

Entre las desventajas de este tipo de métodos está el hecho de que las correlaciones encontradas no incorporan los mecanismos de interacción de la presencia de la especie con las variables y, por tanto, su respuesta a los cambios ambientales; tampoco consideran las interacciones biológicas (Peterson et al. 2011).

La estructura interna del nicho ecológico

Recientemente, se ha explorado la relación que pueden tener las salidas de los modelos de nicho con aspectos más relacionados a la biología y adecuación de las especies, como los patrones geográficos de abundancia (VanDerWal et al. 2009, Tôrres et al. 2012). Los resultados indican que los modelos de nicho ecológico en su estado actual tienen cierta (VanDerWal et al. 2009, Oliver et al. 2012, Tôrres et al. 2012) o nula (Jiménez-Valverde et al. 2009) capacidad de capturar la relación que existe entre las condiciones ecológicas y la adecuación de una especie y, por lo tanto, no es conveniente interpretar los mapas resultantes –incluso de algoritmos que producen modelos probabilísticos– como información que refleje los patrones de abundancia de las especies, aunque los resultados no son concluyentes todavía.

Hace casi medio siglo, Maguire (1973) propuso que el nicho ecológico de las especies — entendido como un hipervolumen n -dimensional en donde se reúnen las condiciones ambientales favorables para que una especie pueda sobrevivir (Hutchinson 1957) — tiene una estructura interna determinada por las condiciones del ambiente y que influyen en su adecuación, existiendo condiciones óptimas, subóptimas y marginales dentro del hipervolumen. Él, propuso que el óptimo se encontraría hacia el centroide del nicho, en donde la tasa de natalidad sería máxima y la de mortalidad mínima, por lo tanto, los tamaños poblacionales tenderían a ser mayores.

Investigaciones recientes desarrolladas por nuestro grupo de trabajo han encontrado que la distribución geográfica de la abundancia de las especies es mejor explicada por las características del nicho ecológico de las especies en el espacio ambiental que por las características geográficas del paisaje (Martínez-Meyer et al. 2013). En esos estudios comprobamos empíricamente que las abundancias de las poblaciones se relacionan inversamente con la distancia ambiental que guardan con el centroide del nicho ecológico (Yañez-Arenas et al. 2012, Ureña-Aranda et al. 2015).

3 Objetivo general

En este trabajo proponemos desarrollar un esquema de modelación con base en la distancia al centroide del nicho ecológico que permita obtener mapas de la distribución potencial actual y bajo diferentes escenarios de cambio climático centrados en 2050 y 2070 en México para 60 especies identificadas de alto riesgo de invasión.

4 Métodos

El análisis comprende dos fases: (1) La conformación de las bases de datos de las especies invasoras, que implica: (a) la selección de las especies a analizar, (b) la recopilación de datos de presencia de las especies seleccionadas y (c) la verificación y limpieza de las bases de datos. (2) El modelado de la distribución potencial actual y futura en México de las especies, con base en el método de la distancia al centroide del nicho ecológico (Martínez-Meyer et al. 2013). A continuación, se detalla cada una de las dos fases (Fig. 1).

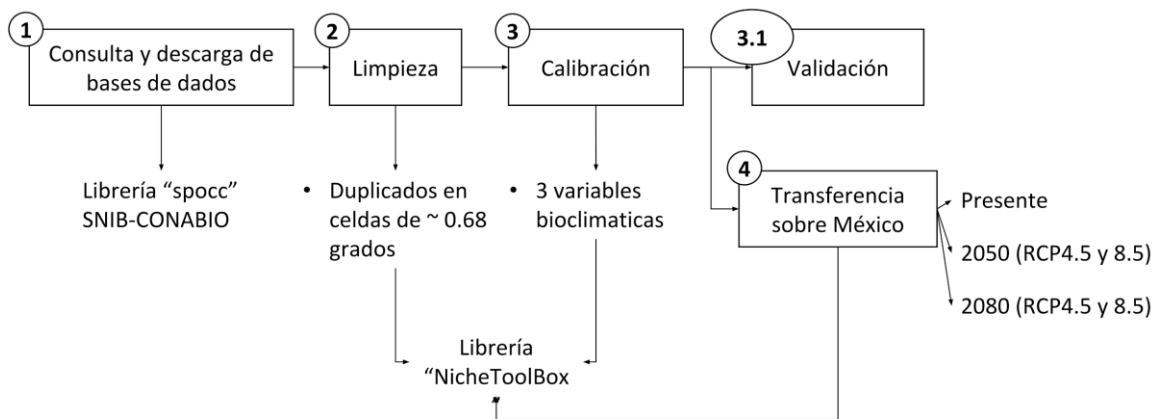


Figura 1. Esquema general de los pasos para realizar la limpieza de bases de datos, calibración y validación de los modelos de nicho ecológicos de 60 especies con potencial de invasión en México.

i. Bases de datos de las especies invasoras

La CONABIO ha identificado y priorizado a las especies invasoras con base en su nivel de invasividad. Algunas de las especies de la lista son especies domésticas o asociadas a las poblaciones humanas, como el gato o la rata gris, que han logrado colonizar diversos ambientes no nativos gracias a su interacción con el ser humano, por lo tanto, están presentes en gran parte del planeta. Este grupo de especies está conformado por dos aves y nueve mamíferos; *Columba livia*, *Passer domesticus*, *Rattus rattus*, *Mus musculus*, *Rattus norvegicus*, *Axis axis*, *Capra hircus*, *Cervus elaphus*, *Felis catus*, *Canis lupus familiaris* y *Ovis aries*. Estas especies no fueron consideradas dentro de este análisis.

Para el caso de las 60 especies que se modelaron en esta consultoría, se consideraron los siguientes criterios: (1) que fueran terrestres, ya que no existen escenarios climáticos al futuro para los mares mexicanos; (2) que representen un riesgo para una porción importante del país y no sólo para algunos sitios específicos, como algunas islas; y (3) que existan por lo menos 100 registros únicos de presencia de la especie en su área nativa de distribución y en sitios en donde ya se ha demostrado que es una especie invasora. Para hacer la selección de las 60 especies se tomaron de la lista de las especies más peligrosas identificadas por Conabio en orden decreciente con base en su puntaje de invasividad y al cumplimiento de los criterios mencionados.

Para cada especie se consultaron diferentes repositorios de datos y se descargaron los registros de presencia correspondientes. Para esto se utilizó la librería Spocc (Chamberlain et al. 2016) del programa R Core Team (2015), la cual permite acceder a diferentes repositorios en línea, incluyendo: Global Biodiversity Information Facility (GBIF), Bekerly Ecogine, iNaturalista, VertNet, Biodiversity Informations Serving Our Nation (BISON), eBird y AntWeb.

En el caso del Sistema de Información de la Biodiversidad (SNIB) de México, se utilizó el programa sqlite3. Los registros duplicados fueron eliminados en R utilizando la librería NicheToolBox (Osorio-Olvera 2016). Las 60 especies seleccionadas se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Lista de especies (por orden de valor de invasividad) que fueron modeladas para esta consultoría, con el número de registros únicos en celdas de aproximadamente 10 km. Las especies marcadas con un asterisco tienen presencia confirmada en México, según CONABIO (2016).

Nombre científico	Número de registros	Valor de invasividad
<i>Deroceras reticulatum</i>	1024	0.746875
<i>Aegilops cylindrica</i> *	633	0.7265625
<i>Agrostis gigantea</i> *	3033	0.71015625
<i>Commelina benghalensis</i>	643	0.70859375
<i>Sus scrofa</i> *	2867	0.6984375
<i>Oryctolagus cuniculus</i> *	3760	0.68828125
<i>Fallopia convolvulus</i>	3456	0.6875
<i>Cotula australis</i> *	808	0.6875
<i>Casuarina cunninghamiana</i> *	496	0.68125
<i>Conium maculatum</i> *	2975	0.67109375
<i>Anthemis cotula</i> *	2125	0.66328125
<i>Cenchrus ciliaris</i> *	1788	0.66328125
<i>Agrostemma githago</i> *	1820	0.6625
<i>Digitaria sanguinalis</i> *	2752	0.65390625
<i>Euphorbia esula</i> *	1326	0.65234375
<i>Myiopsitta monachus</i> *	1163	0.6515625
<i>Vaccaria hispanica</i>	1162	0.64375
<i>Melaleuca quinquenervia</i> *	235	0.64375
<i>Leonotis nepetifolia</i> *	568	0.6421875
<i>Poa pratensis</i> *	1079	0.640625
<i>Rottboellia cochinchinensis</i> *	421	0.6328125
<i>Tamarix aphylla</i> *	173	0.61953125
<i>Agrostis stolonifera</i> *	2225	0.61796875
<i>Tomicus piniperda</i>	469	0.61328125
<i>Eucalyptus globulus</i> *	417	0.61328125
<i>Centella asiatica</i> *	841	0.6078125
<i>Arundo donax</i> *	1256	0.60703125
<i>Lepidium latifolium</i> *	876	0.6046875

Nombre científico	Número de registros	Valor de invasividad
<i>Heracleum mantegazzianum</i>	1472	0.60234375
<i>Tamarix ramosissima</i> *	303	0.596875
<i>Zantedeschia aethiopica</i> *	507	0.58515625
<i>Securigera varia</i> *	1613	0.5828125
<i>Catharanthus roseus</i> *	619	0.578125
<i>Abutilon theophrasti</i> *	973	0.57734375
<i>Acacia melanoxylon</i> *	672	0.57578125
<i>Bromus rubens</i> *	1569	0.5703125
<i>Melinis minutiflora</i> *	526	0.56796875
<i>Soliva sessilis</i> *	421	0.565625
<i>Passiflora mollissima</i> *	174	0.5640625
<i>Hedychium coronarium</i> *	409	0.5625
<i>Lepidium draba</i> *	2097	0.56171875
<i>Bromus tectorum</i> *	3016	0.55703125
<i>Hedera helix</i> *	2269	0.55234375
<i>Melinis repens</i> *	1933	0.5515625
<i>Pennisetum setaceum</i> *	401	0.5515625
<i>Varanus niloticus</i>	358	0.5515625
<i>Geranium dissectum</i>	2622	0.55078125
<i>Cortaderia selloana</i> *	743	0.5484375
<i>Eragrostis curvula</i> *	1648	0.54765625
<i>Carpobrotus edulis</i> *	448	0.54375
<i>Sturnus vulgaris</i> *	5036	0.5390625
<i>Galium spurium</i>	930	0.5375
<i>Cryptostegia grandiflora</i> *	284	0.53125
<i>Vespula germanica</i>	732	0.52734375
<i>Carthamus lanatus</i>	1506	0.5265625
<i>Atriplex semibaccata</i> *	907	0.525

Nombre científico	Número de registros	Valor de invasividad
<i>Hemidactylus frenatus</i> *	931	0.5203125
<i>Foeniculum vulgare</i> *	2001	0.51953125
<i>Anthoxanthum odoratum</i> *	4595	0.51484375
<i>Cardamine hirsuta</i> *	3122	0.50703125

ii. Modelación de la distribución potencial actual y futura

Los modelos de distribución potencial se produjeron con base en la reconstrucción del nicho ecológico de las especies (Peterson et al. 2011) bajo el método de distancia al centroide del nicho (Yañez-Arenas et al. 2012; Martínez-Meyer et al. 2013) a través de la construcción de un elipsoide de volumen mínimo (Qiao et al. 2016). El mapa resultante de esta modelación presenta valores de 0 a 1, que son valores normalizados de distancias de Mahalanobis y representan un índice de favorabilidad ambiental que para algunas especies se ha encontrado una asociación con la abundancia (Martínez-Meyer et al. 2013). Los valores cercanos a 1 representan zonas con mejores condiciones ambientales para el establecimiento de una especie en donde sus abundancias podrían ser altas, mientras que los valores cercanos a 0 son condiciones ambientales favorables pero marginales, en donde se esperarían abundancias bajas. El procedimiento seguido para la modelación de la distribución potencial bajo el método de distancias al centroide fue el siguiente:

1. Los registros de cada una de las especies, tanto de su distribución nativa como de sus áreas de invasión, fueron divididos aleatoriamente en dos conjuntos, uno de calibración y otro de validación en una proporción de 70:30. En los casos en que las especies tuvieran registros de presencia en México, se utilizaron estos puntos para validar los modelos calibrados con información del resto del mundo.
2. Los datos de presencia usados para la calibración de los modelos se usaron con la base de datos ambientales WorldClim (Hijmans et al. 2005) para extraer los valores de las variables climáticas para cada registro. WorldClim tiene una cobertura temporal de 1961-1990 y los análisis se hicieron a una resolución espacial de 10 minutos (aprox. 18.5 km).
3. Se usó el sistema de modelación MaxEnt para identificar las tres variables ambientales más importantes para cada especie, mediante el método de permutación (Phillips & Dudik 2008).

4. Con esa información se construyó un elipsoide multidimensional de volumen mínimo (Qiao et al. 2016) cuyo centroide es la media de las tres variables, y sus dimensiones fueron calculadas a partir de la matriz de covarianza de los datos. Este elipsoide representa, en efecto, el nicho ecológico (climático) de la especie.
5. Este nicho fue proyectado al espacio geográfico para obtener un mapa de distribución potencial mundial que fue evaluado con los registros de validación usando la prueba de ROC parcial (Peterson et al. 2008).
6. El elipsoide obtenido a partir de los registros mundiales representa los límites de tolerancia climática de la especie, es decir, una aproximación a su nicho ecológico fundamental. Para conocer el potencial invasivo actual y futuro de esas especies en México, el elipsoide fue proyectado a un escenario climático actual para el país (1961-1990; a una resolución de 1 km) y posteriormente a escenarios climáticos futuros, uno cercano con su centro en 2050 (2041-2060) y otro lejano centrado en 2070 (2061-2080), bajo dos escenarios de concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, uno conservador (RCP 4.5) y otro extremo (RCP 8.5). Los escenarios futuros se obtuvieron promediando los cuatro escenarios que de acuerdo con el CCAUNAM-INECC, son los que mejor representan las tendencias climáticas históricas del país: MPI-ESM-LR (Alemania), GFDL-CM3 (Estados Unidos), HADGEM2-ES (Reino Unido) y CNRM (Francia) (Fernández Eguiarte et al. 2015).
7. De esta forma, los productos obtenidos de la modelación para cada especie fueron:
 - i. Un mapa de distribución potencial mundial actual (1961-1990) a una resolución espacial de 10 minutos (18.5 km).
 - ii. Un mapa de distribución potencial actual (1961-1990) para México a una resolución espacial de 1 km.
 - iii. Un mapa de distribución potencial para México para cada uno de los siguientes escenarios futuros: RCP 4.5 2050, RCP 4.5 2070, RCP 8.5 2050 y RCP 8.5 2070, a una resolución espacial de 1 km.
 - iv. Un mapa de la desviación estándar resultado del promedio de los cuatro MGC de la distribución potencial para cada uno de los siguientes escenarios futuros: RCP 4.5 2050, RCP 4.5 2070, RCP 8.5 2050 y RCP 8.5 2070, a una resolución espacial de 1 km.
 - v. Un mapa binario, donde 0 representa ausencia y 1 presencia de la distribución potencial para el presente y cada uno de los siguientes escenarios futuros: RCP 4.5 2050, RCP 4.5 2070, RCP 8.5 2050 y RCP 8.5 2070, a una resolución espacial de 1 km.

iii. Riqueza de especies invasoras

Con el propósito de identificar las zonas de mayor vulnerabilidad de invasión actual y futura se identificaron las Ecoregiones (nivel I), entidades federativas y áreas naturales protegidas (ANP) con una alta riqueza de especies de vertebrados, plantas e insectos invasores. Para esto se transformaron los mapas continuos de idoneidad a mapas binarios de presencia-ausencia, utilizando como umbral de corte el décimo percentil de los datos de calibración.

Los mapas de riqueza se calcularon con la herramienta SDMToolBox de ArcGis 10.1. Esta herramienta permite sumar todos los mapas binarios de las especies evaluadas. La riqueza fue estimada para el presente, dos futuros (2050 y 2070) y sus correspondiente RCP (4.5 y 8.5). Como resultado se obtuvieron mapas para el total de las especies, el grupo de plantas y vertebrados.

5 Resultados

En este trabajo se modeló un grupo de 60 especies que cumplieron las siguientes características que las hicieron aptas para desarrollar modelos de distribución potencial en el presente y en el futuro: (a) que se encontraran dentro de las 100 especies con mayor valor de invasividad; (b) que fueran terrestres, es decir, no se seleccionaron especies marinas ni acuáticas por falta de información ambiental en esos dominios; (c) que no fueran especies domésticas o asociadas a centros de población humana, como el perro o la rata gris; y (d) que su distribución y riesgo de invasividad no estuviera limitado sólo a islas, como el caso de las cabras o los gatos. Así, de las 60 especies seleccionadas, 51 son plantas, 6 vertebrados (2 reptiles, 2 aves y 2 mamíferos) y 3 invertebrados. De acuerdo con el sistema de información sobre las especies invasoras en México (CONABIO 2016), 49 de las 60 especies analizadas en esta consultoría tienen presencia confirmada en México: 45 plantas y 4 vertebrados; ninguno de los 3 invertebrados de la lista y el reptil *Varanus niloticus* han sido registrados como especies invasoras en México (Cuadro 1).

Los resultados de la modelación indican que, de las 60 especies invasoras analizadas, 57 encuentran condiciones ambientales actualmente favorables en México, aunque con gran variación en su extensión potencial. La validación de los modelos bajo el método de la curva ROC parcial (Peterson et al. 2008) indicaron que los modelos para todas las especies fueron mejores que lo esperado por el azar (AUC ratio: 1.23-1.78, $p < 0.05$). Las especies con mayor extensión potencial en México son: *Hedychium coronarium*, *Melinis minutiflora*, *Pennisetum setaceum* y *Arundo donax*, todas ellas encuentran condiciones

favorables para su establecimiento en más del 90% del territorio nacional (100, 98.6, 93.7 y 92.4%, respectivamente) (Cuadro 2). Por otro lado, tres especies (*Heracleum mantegazzianum*, *Tomicus piniperda* y *Vespula germanica*) no encuentran condiciones ambientales en el presente para establecerse en México y de éstas, sólo *Vespula germanica* presenta la posibilidad de establecerse en una extensión muy limitada bajo los escenarios de cambio climático en 2050 y 2070. Otras 11 especies (*Anthoxanthum odoratum*, *Poa pratensis*, *Agrostemma githago*, *Euphorbia esula*, *Bromus tectorum*, *Agrostis gigantea*, *Carpobrotus edulis*, *Cardamine hirsuta*, *Deroceras reticulatum*, *Aegilops cylindrica* y *Securigera varia*) presentan un área de distribución potencial en el presente menor al 10% del tamaño del territorio nacional (Cuadro 2).

En general, los resultados muestran que el cambio climático no favorecerá la expansión de la mayor parte de las especies analizadas, de acuerdo con los escenarios usados para la transferencia de los modelos. De hecho, 48 de las 60 especies muestran una tendencia a reducir su área de distribución potencial en México bajo los diferentes escenarios a futuro con respecto al escenario del presente. *Bromum tectorum*, *Agrostis gigantea* y *Fallopia convovulus* son las tres especies que de acuerdo con los modelos perderían mayor proporción de área de distribución potencial, observando reducciones de más del 70% en relación a su área de distribución potencial actual en todos los escenarios futuros. Otras tres especies (*Hedychium coronarium*, *Melinis minutiflora* y *Arundo donax*) prácticamente no mostraron cambios bajo los escenarios climáticos del futuro y 5 especies más presentaron un aumento en sus áreas potenciales de distribución (*Rottboellia cochinchinensis*, *Cenchrus ciliaris*, *Casuarina cunninghamiana*, *Tamarix aphylla* y *Deroceras reticulatum*), siendo esta última la que presenta los mayores incrementos de área, que van de 69 al 290% dependiendo del escenario climático que se analice (Cuadro 2).

Cuadro 2. Extensión (en km²) de la distribución potencial de las 60 especies modeladas en este estudio para el presente y cuatro escenarios a futuro (RCP 4.5 2050 y 2070 y RCP 8.5 2050 y 2070) en celdas de 1x1 km. El valor en paréntesis de la columna del Presente se refiere al porcentaje del área que ocupa la especie en todo el territorio de México. El valor en paréntesis de los escenarios al futuro corresponde a los cambios en porcentaje del área con respecto a la extensión en el presente. Los valores negativos indican reducción y los positivos aumentos.

Extensión en km ² en los distintos escenarios climáticos (% del territorio)					
Nombre científico	Presente	RCP 4.5 2050	RCP 4.5 2070	RCP 8.5 2050	RCP 8.5 2070
<i>Hedychium coronarium</i>	1997831 (100)	1995893 (-0.1)	1994926 (0)	1997773 (-0.15)	1997831 (0)
<i>Melinis minutiflora</i>	1970863 (98.65)	1973856 (0.15)	1976063 (0.28)	1976426 (0.26)	1979461 (0.44)
<i>Pennisetum setaceum</i>	1872805 (93.74)	1710347 (-8.67)	1608538 (-16.85)	1557289 (-14.11)	1297288 (-30.73)
<i>Arundo donax</i>	1845566 (92.38)	1855228 (0.52)	1849121 (0.13)	1848047 (0.19)	1828661 (-0.92)
<i>Centella asiatica</i>	1683636 (84.27)	1445966 (-14.12)	1432076 (-18.35)	1374663 (-14.94)	1109561 (-34.1)
<i>Cenchrus ciliaris</i>	1644907 (82.33)	1706408 (3.74)	1710420 (4.18)	1713599 (3.98)	1731705 (5.28)
<i>Melinis repens</i>	1629344	1400582	1380361	1331363	1095485

Extensión en km ² en los distintos escenarios climáticos (% del territorio)					
Nombre científico	Presente	RCP 4.5 2050	RCP 4.5 2070	RCP 8.5 2050	RCP 8.5 2070
	(81.55)	(-14.04)	(-18.29)	(-15.28)	(-32.77)
<i>Abutilon theophrasti</i>	1620818 (81.13)	1379787 (-14.87)	1305746 (-20.79)	1283898 (-19.44)	1039434 (-35.87)
<i>Sus scrofa</i>	1618102 (80.99)	1522951 (-5.88)	1466370 (-8.82)	1475431 (-9.38)	1245555 (-23.02)
<i>Commelina benghalensis</i>	1386545 (69.4)	1293332 (-6.72)	1311222 (-8.48)	1268947 (-5.43)	1186829 (-14.4)
<i>Galium spurium</i>	1372281 (68.69)	1056125 (-23.04)	1014051 (-27.12)	1000169 (-26.1)	774954 (-43.53)
<i>Eucalyptus globulus</i>	1330010 (66.57)	991075 (-25.48)	934573 (-30.7)	921677 (-29.73)	729022 (-45.19)
<i>Eragrostis curvula</i>	1326629 (66.4)	1027230 (-22.57)	957922 (-27.6)	960513 (-27.79)	747664 (-43.64)
<i>Myiopsitta monachus</i>	1316326 (65.89)	1248672 (-5.14)	1208071 (-8.13)	1209270 (-8.22)	978436 (-25.67)
<i>Cryptostegia grandiflora</i>	1283171 (64.23)	1247385 (-2.79)	1256455 (-4.34)	1227461 (-2.08)	1233920 (-3.84)
<i>Varanus niloticus</i>	1240097 (62.07)	1122191 (-9.51)	1131075 (-12.56)	1084386 (-8.79)	981781 (-20.83)
<i>Catharanthus roseus</i>	1227241 (61.43)	1058933 (-13.71)	1068315 (-12.5)	1073787 (-12.95)	1011976 (-17.54)
<i>Melaleuca quinquenervia</i>	1201551 (60.14)	1028946 (-14.37)	1028507 (-17.21)	994719 (-14.4)	987359 (-17.83)
<i>Casuarina cunninghamiana</i>	1190195 (59.57)	1260696 (5.92)	1252603 (4.82)	1247592 (5.24)	1105212 (-7.14)

Extensión en km ² en los distintos escenarios climáticos (% del territorio)					
Nombre científico	Presente	RCP 4.5 2050	RCP 4.5 2070	RCP 8.5 2050	RCP 8.5 2070
<i>Rottboellia cochinchinensis</i>	1183626 (59.25)	1202125 (1.56)	1234022 (1.5)	1201393 (4.26)	1165401 (-1.54)
<i>Foeniculum vulgare</i>	1156771 (57.9)	791022 (-31.62)	709480 (-39.63)	698370 (-38.67)	530040 (-54.18)
<i>Digitaria sanguinalis</i>	1149258 (57.52)	901433 (-21.56)	824202 (-28.08)	826562 (-28.28)	612769 (-46.68)
<i>Leonotis nepetifolia</i>	1144932 (57.31)	1118965 (-2.27)	1128236 (-3.25)	1107694 (-1.46)	1121918 (-2.01)
<i>Tamarix aphylla</i>	1076325 (53.87)	1190034 (10.56)	1166136 (9.68)	1180496 (8.34)	1277210 (18.66)
<i>Cotula australis</i>	921154 (46.11)	830516 (-9.84)	750454 (-19.7)	739730 (-18.53)	599693 (-34.9)
<i>Soliva sessilis</i>	897447 (44.92)	822090 (-8.4)	766713 (-16.65)	748005 (-14.57)	642135 (-28.45)
<i>Passiflora mollissima</i>	867710 (43.43)	843149 (-2.83)	843662 (-4.18)	831422 (-2.77)	821519 (-5.32)
<i>Carthamus lanatus</i>	861290 (43.11)	606310 (-29.6)	549793 (-37.3)	540062 (-36.17)	368365 (-57.23)
<i>Tamarix ramosissima</i>	858130 (42.95)	768342 (-10.46)	709421 (-20.23)	684547 (-17.33)	569750 (-33.61)
<i>Hemidactylus frenatus</i>	819892 (41.04)	761201 (-7.16)	748532 (-8.06)	753772 (-8.7)	733628 (-10.52)
<i>Vaccaria hispanica</i>	774040 (38.74)	496656 (-35.84)	422054 (-47.11)	409393 (-45.47)	235814 (-69.53)

Extensión en km ² en los distintos escenarios climáticos (% del territorio)					
Nombre científico	Presente	RCP 4.5 2050	RCP 4.5 2070	RCP 8.5 2050	RCP 8.5 2070
<i>Atriplex semibaccata</i>	725018 (36.29)	547784 (-24.45)	507747 (-33.52)	481960 (-29.97)	348568 (-51.92)
<i>Acacia melanoxylon</i>	696996 (34.89)	496637 (-28.75)	447129 (-37.95)	432511 (-35.85)	323440 (-53.6)
<i>Lepidium latifolium</i>	677891 (33.93)	396799 (-41.47)	345154 (-50.48)	335670 (-49.08)	201335 (-70.3)
<i>Bromus rubens</i>	676933 (33.88)	1549280 (128.87)	493314 (-29.38)	478077 (-27.13)	366085 (-45.92)
<i>Anthemis cotula</i>	557933 (27.93)	259765 (-53.44)	212388 (-63.5)	203673 (-61.93)	138426 (-75.19)
<i>Zantedeschia aethiopica</i>	505975 (25.33)	213718 (-57.76)	216593 (-57.19)	216614 (-57.19)	144032 (-71.53)
<i>Sturnus vulgaris</i>	465026 (23.28)	287730 (-38.13)	212048 (-54.66)	210825 (-54.4)	115429 (-75.18)
<i>Oryctolagus cuniculus</i>	416438 (20.84)	411701 (-1.14)	326157 (-20.77)	329951 (-21.68)	230916 (-44.55)
<i>Lepidium draba</i>	388939 (19.47)	197828 (-49.14)	157538 (-59.72)	156657 (-59.5)	95348 (-75.49)
<i>Conium maculatum</i>	361043 (18.07)	186374 (-48.38)	146585 (-60.85)	141344 (-59.4)	84071 (-76.71)
<i>Agrostis stolonifera</i>	265705 (13.3)	142448 (-46.39)	112291 (-58.84)	109372 (-57.74)	50438 (-81.02)
<i>Cortaderia selloana</i>	255698 (12.8)	208412 (-18.49)	175341 (-39.18)	155512 (-31.43)	120215 (-52.99)
<i>Hedera helix</i>	240909 (12.06)	125909 (-47.74)	97776 (-61.13)	93631 (-59.41)	40843 (-83.05)

Extensión en km ² en los distintos escenarios climáticos (% del territorio)					
Nombre científico	Presente	RCP 4.5 2050	RCP 4.5 2070	RCP 8.5 2050	RCP 8.5 2070
<i>Geranium dissectum</i>	233482 (11.69)	111871 (-52.09)	81098 (-66.05)	79264 (-65.27)	38191 (-83.64)
<i>Fallopia convolvulus</i>	202202 (10.12)	54741 (-72.93)	41258 (-81.54)	37334 (-79.6)	16010 (-92.08)
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	199772 (10)	120823 (-39.52)	92885 (-55.82)	88269 (-53.5)	34011 (-82.98)
<i>Poa pratensis</i>	180044 (9.01)	81574 (-54.69)	59074 (-68.95)	55901 (-67.19)	16746 (-90.7)
<i>Agrostemma githago</i>	150065 (7.51)	60890 (-59.42)	43543 (-67.1)	49370 (-70.98)	31175 (-79.23)
<i>Euphorbia esula</i>	114056 (5.71)	112768 (-1.13)	109318 (-4.08)	109404 (-4.15)	120552 (5.69)
<i>Bromus tectorum</i>	105139 (5.26)	19340 (-81.6)	15135 (-85.89)	14836 (-85.6)	6983 (-93.36)
<i>Agrostis gigantea</i>	53095 (2.66)	13847 (-73.92)	10402 (-81.21)	9977 (-80.41)	3750 (-92.94)
<i>Carpobrotus edulis</i>	33906 (1.7)	29212 (-13.85)	23247 (-30.07)	23709 (-31.44)	18062 (-46.73)
<i>Cardamine hirsuta</i>	17745 (0.89)	21219 (19.58)	18362 (-2)	17390 (3.48)	14845 (-16.34)
<i>Deroceras reticulatum</i>	11467 (0.57)	19443 (69.55)	10197 (68.43)	19315 (-11.08)	44769 (290.41)
<i>Aegilops cylindrica</i>	1790 (0.09)	882 (-50.7)	534 (-55.73)	792 (-70.16)	0 (-100)
<i>Securigera varia</i>	137 (0.01)	56 (-58.82)	131 (-31.18)	94 (-4.12)	276 (101.76)

Extensión en km ² en los distintos escenarios climáticos (% del territorio)						
Nombre científico	Presente	RCP 4.5 2050	RCP 4.5 2070	RCP 8.5 2050	RCP 8.5 2070	
<i>Heracleum mantegazzianum</i>	0	0	0	0	0	
<i>Tomicus piniperda</i>	0	0	0	0	0	
<i>Vespula germanica</i>	0	31	319	353	554	

Riqueza potencial de especies

El patrón de la distribución de riqueza potencial de las especies invasoras analizadas muestra que los desiertos del norte del país son las zonas más vulnerables al establecimiento de las especies analizadas en el presente (Fig. 2). Es interesante que los patrones de riqueza potencial muestran una reducción potencial de especies invasoras en la región del Desierto Chihuahuense en todos los escenarios de cambio climático, concentrándose la mayor riqueza potencial en la región de la Sierra Madre Occidental, Oriental y norte de la Península de Baja California (Fig. 2).

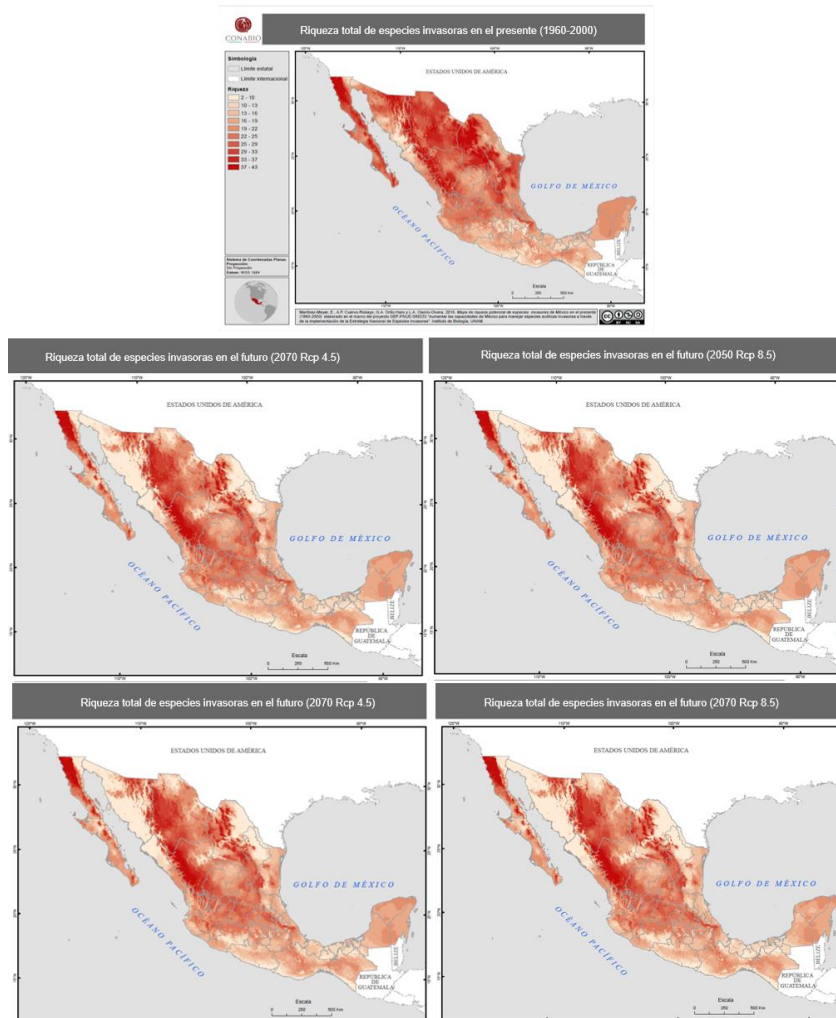


Figura 2. Riqueza potencial de 60 especies de alta invasividad en México para el presente (1960-2000) y para dos tiempos futuros (2050 y 2070), con sus respectivos escenarios de cambio climático: RCP 4.5 (moderado) y RCP 8.5 (extremo).

Las ecorregiones del país con mayor vulnerabilidad a la invasión (más de 47 especies) son principalmente las áridas y semiáridas, en particular los Desiertos de América del Norte (DAN) con 43 especies de plantas y 6 de vertebrados, así como las regiones de California Mediterránea (CM) y las Grandes Planicies (GP) (Fig. 3).

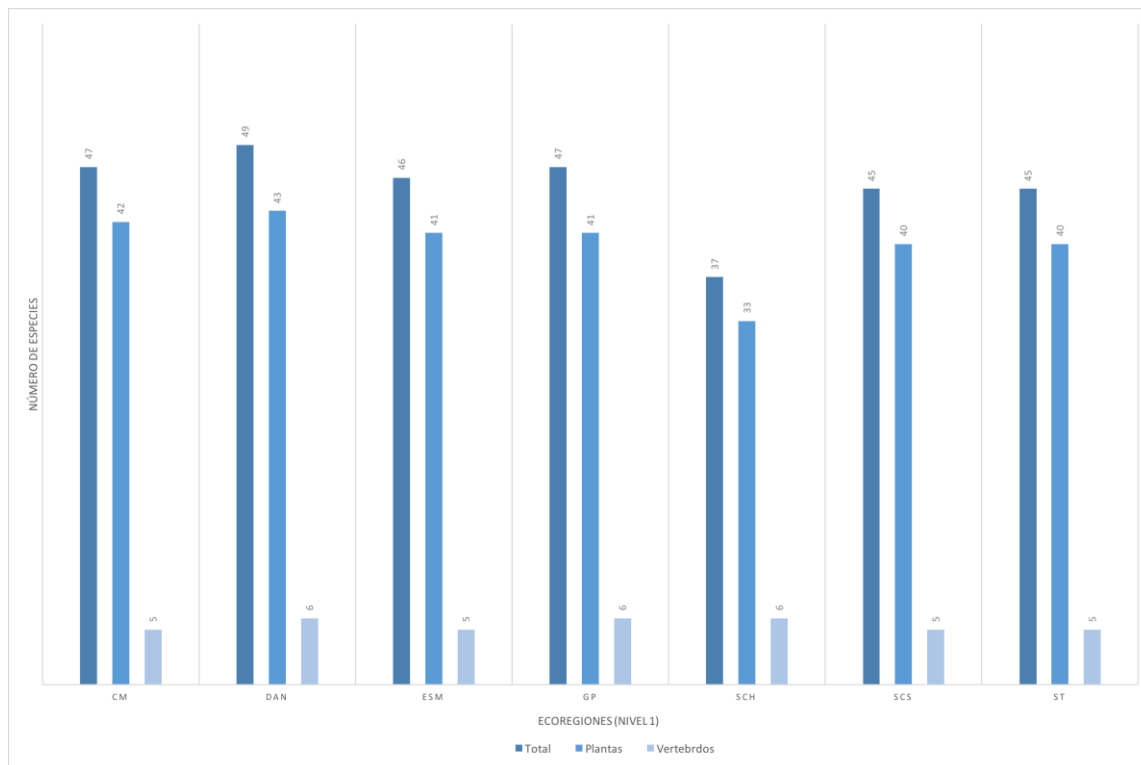


Figura 3. Riqueza potencial de 60 especies de alta invasividad en México para el presente (1960-2000) en las ecorregiones terrestres de México (Nivel I): California Mediterránea (CM), Desiertos de América del Norte (DAN), Elevaciones Semiáridas Meridionales (ESM), Grandes Planicies (GP), Selvas Cálido-Húmedas (SCH), Selvas Cálido-Secas (SCS) y Sierras Templadas (ST).

Asimismo, en el futuro estas regiones mantendrán un número estable de especies, en conjunto con la ecorregión de las Elevaciones Semiáridas Meridionales (ESM). La ganancia potencial de especies de plantas en el tiempo se presenta principalmente en las ecorregiones Sierras Templadas (ST) y California Mediterránea (CM), con una y dos especies, respectivamente. En el caso de los vertebrados existe ganancia potencial de una especie en la región de las ESM, no obstante, esta ganancia potencial sólo se presenta en el periodo del 2050 bajo los dos escenarios (Cuadro 3). Las ecorregiones que presentan una disminución potencial en su vulnerabilidad a ser invadidas bajo los escenarios de cambio climático por especies de plantas terrestres son: DAN (1 especie), GP (6 especies), SCH (2 especies) y SCS (2 especies) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Riqueza potencial de plantas y vertebrados de alta invasividad en México organizada por ecorregiones terrestres (Nivel I): California Mediterránea (CM), Desiertos de América del Norte (DAN), Elevaciones Semiáridas meridionales (ESM), Grandes planicies (GP), Selvas cálido-húmedas (SCH), Selvas cálido-secas (SCS) y Sierras templadas (ST).

Total		Vertebrados					Plantas				
Ecorregiones	Presente	Presente	2050 RCP 4.5	2050 RCP 8.5	2070 RCP 4.5	2070 RCP 8.5	Presente	2050 RCP 4.5	2050 RCP 8.5	2070 RCP 4.5	2070 RCP 8.5
CM	47	5	5	5	5	5	42	44	44	44	44
DAN	49	6	6	6	6	6	43	42	42	42	42
ESM	46	5	6	6	5	5	41	41	41	41	41
GP	47	6	6	6	6	5	41	36	36	36	36
SCH	37	6	5	5	5	4	33	30	30	30	30
SCS	45	5	5	5	5	5	40	38	38	38	38
ST	45	5	5	5	5	5	40	41	41	41	41

En la actualidad los estados con mayor riesgo de invasión por albergar condiciones favorables para la presencia de 6 vertebrados terrestres (Fig. 4) y más de 40 de especies de plantas (Fig. 5) son: Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila, Durango, Nayarit, Nuevo León, Sinaloa, Sonora y Tamaulipas.

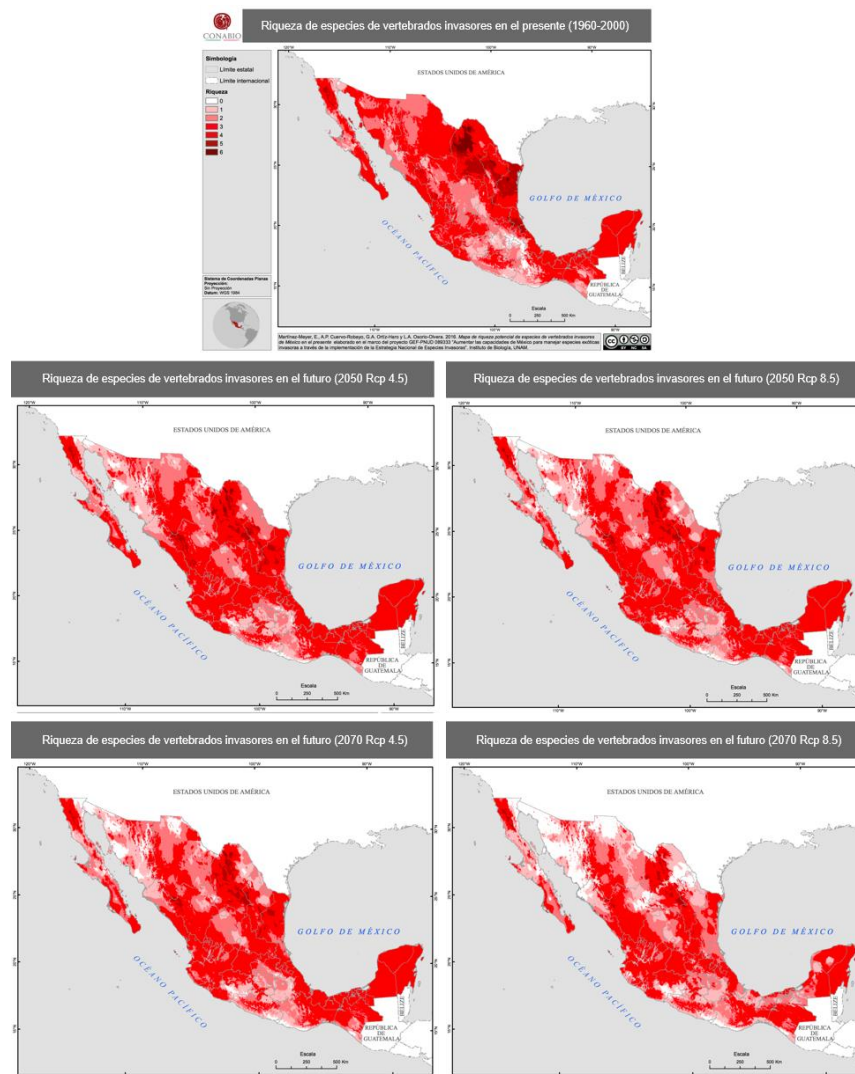


Figura 4. Riqueza potencial de vertebrados (6 especies) de alta invasividad en México para el presente (1960-2000) y para dos tiempos futuros (2050 y 2070), con sus respectivos escenarios de cambio climático: RCP4.5 (moderado) y RCP8.5 (extremo).

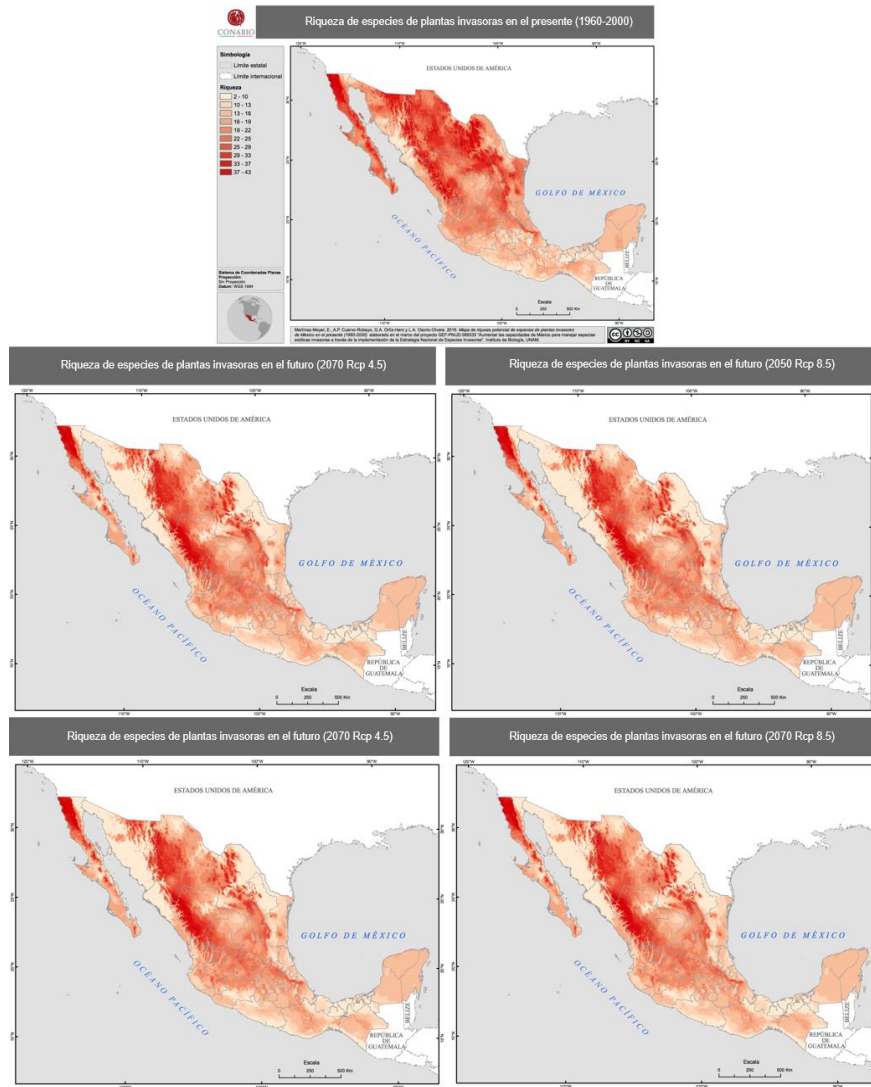


Figura 5. Riqueza potencial de plantas (51 especies) de alta invasividad en México para el presente (1960-2000) y para dos tiempos futuros (2050 y 2070), con sus respectivos escenarios de cambio climático: RCP4.5 (moderado) y RCP8.5 (extremo).

La riqueza potencial de las especies de vertebrados es relativamente estable en el tiempo en las 32 entidades federativas del país (Fig. 6). No obstante, en el caso de los estados de Chihuahua, Hidalgo, Nayarit, Nuevo León, Puebla, Tamaulipas, Veracruz y Zacatecas se reduce de 6 a 5 especies de vertebrados a lo largo de los dos períodos futuros (Cuadro 4). Solo para Sonora y Tlaxcala se incrementa a 6 especies, pero solo en el año 2050 (los dos escenarios) y para el escenario extremo a fin de siglo, respectivamente.

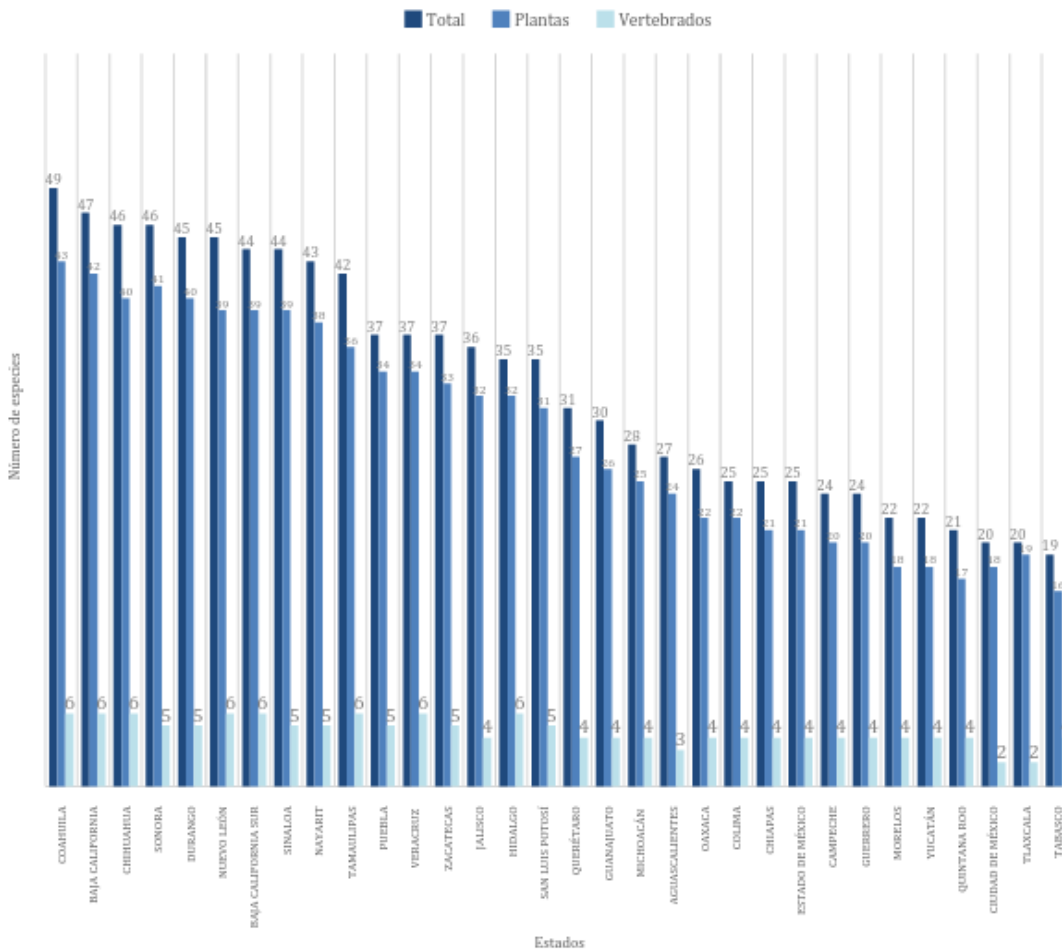


Figura 6. Riqueza potencial actual de especies terrestres de alta invasividad en México por entidad federativa.

En el caso de las plantas evaluadas, los estados en los que se incrementa la riqueza potencial (entre 1 y 2) de especies entre los periodos del futuro son: Aguascalientes, Baja California, Ciudad de México, Colima, Durango, Estado de México, Guanajuato, Guerrero, Michoacán, Morelos, Oaxaca y Sinaloa (Cuadro 4).

Cuadro 4. Riqueza potencial de plantas y vertebrados de alta invasividad en México en las entidades federativas, donde cada grupo describe la riqueza en el tiempo presente, dos tiempos futuros (2050 y 2070) y sus respectivos escenarios, moderado (RCP 4.5) y extremo (RCP 8.5).

Estado	Total	Vertebrados					Plantas				
	Presente	Presente	2050 RCP 4.5	2050 RCP 8.5	2070 RCP 4.5	2070 RCP 8.5	Presente	2050 RCP 4.5	2050 RCP 8.5	2070 RCP 4.5	2070 RCP 8.5
Aguascalientes	27	3	3	3	3	3	24	25	25	25	25
Baja California	47	6	6	6	6	6	42	44	44	44	44
Baja California Sur	44	6	6	6	6	5	39	37	37	37	37
Campeche	24	4	4	4	4	4	20	16	16	16	16
Coahuila	49	6	6	6	6	6	43	42	42	42	42
Colima	25	4	4	4	4	4	22	23	23	23	23
Chiapas	25	4	4	4	4	4	21	21	21	21	21
Chihuahua	46	6	5	6	5	5	40	40	40	40	40
Ciudad de México	20	2	2	2	2	3	18	19	19	19	19
Durango	45	5	5	5	5	5	40	41	41	41	41
Guanajuato	30	4	4	4	4	4	26	27	27	27	27
Guerrero	24	4	4	4	4	4	20	21	21	21	21
Hidalgo	35	6	5	5	5	4	32	29	29	29	29

Proyecto GEF-EEI - Modelación actual y futura de especies invasoras en México



Jalisco	36	4	4	4	4	4	32	30	30	30	30
Estado de México	25	4	4	4	4	4	21	23	23	23	23
Michoacán	28	4	4	4	4	4	25	26	26	26	26
Morelos	22	4	4	4	4	4	18	19	19	19	19
Nayarit	43	5	4	4	4	4	38	34	34	34	34
Nuevo León	45	6	6	5	5	5	39	36	36	36	36
Oaxaca	26	4	4	4	4	4	22	23	23	23	23
Puebla	37	5	5	4	4	4	34	32	32	32	32
Querétaro	31	4	4	4	4	4	27	25	25	25	25
Quintana Roo	21	4	4	4	4	4	17	17	17	17	17
San Luis Potosí	35	5	5	5	5	4	31	29	29	29	29
Sinaloa	44	5	5	5	5	5	39	40	40	40	40
Sonora	46	5	6	6	5	5	41	41	41	41	41
Tabasco	19	4	4	4	4	4	16	14	14	14	14
Tamaulipas	42	6	5	5	5	5	36	32	32	32	32
Tlaxcala	20	2	2	2	2	3	19	21	21	21	21
Veracruz	37	6	5	5	5	4	34	34	34	34	34
Yucatán	22	4	4	4	4	4	18	17	17	17	17
Zacatecas	37	5	4	4	4	4	33	32	32	32	32

Riqueza potencial en áreas naturales protegidas (ANP)

Realizamos un análisis de la vulnerabilidad de las áreas naturales protegidas (ANP) a la invasión de las especies analizadas. De acuerdo con los modelos obtenidos, las 10 ANP más vulnerables a la invasión de estas especies en la actualidad son:

1. Maderas del Carmen
2. C.A.D.N.R. 004 Don Martín
3. Ocampo
4. Cañón de Santa Elena
5. C.A.D.N.R. 043 Estado de Nayarit
6. Constitución 1857
7. Cuatro Ciénegas
8. El Vizcaíno
9. Sierra de San Pedro Mártir
10. Valle de los Cirios

El número de especies presentes en estas ANP oscila entre 40 y 48, tanto en el presente como bajo los diferentes escenarios de cambio climático (Cuadro 5). C.A.D.N.R. 004 Don Martín, Ocampo y Cañón de Santa Elena presentan una reducción en el número de especies en los diferentes escenarios de cambio climático, mientras que Valle de los Cirios y Sierra de San Pedro Mártir muestran un potencial aumento de las especies que pueden invadir hacia el futuro (Cuadro 5).

Cuadro 5. Las 10 áreas naturales protegidas (ANP) federales de México más vulnerables a la invasión de las 60 especies analizadas.

Área natural protegida	Número de especies				
	Presente	2050 RCP 4.5	2050 RCP 8.5	2070 RCP 4.5	2070 RCP 8.5
Maderas del Carmen	49	48	48	48	48
C.A.D.N.R. 004 Don Martín	48	43	43	43	43
Ocampo	47	41	41	41	40
Cañón de Santa Elena	45	41	41	41	40
C.A.D.N.R. 043 Edo. de Nayarit	44	44	43	43	43
Constitución de 1857	44	45	45	45	45
Cuatro Ciénegas	44	38	38	38	38
El Vizcaíno	44	43	43	42	42
Sierra de San Pedro Mártir	44	47	47	47	48
Valle de los Cirios	44	48	48	47	48

6 Conclusiones y recomendaciones

1. Los resultados obtenidos en este trabajo permiten concluir que México es un país vulnerable a la invasión de especies exóticas, ya que 49 de las 60 especies analizadas ya tienen presencia confirmada en el país. Los resultados de los modelos indican que, además de éstas, otras 8 especies que no han sido registradas para México encuentran condiciones favorables para establecerse en el territorio mexicano. De éstas, *Hedychium coronarium*, *Melinis minutiflora*, *Pennisetum setaceum* y *Arundo donax* tienen el potencial de establecer poblaciones en prácticamente todo el país, por lo que se recomienda establecer un programa de monitoreo dirigido para estas especies, particularmente en las zonas en donde los valores de favorabilidad para estas especies son más altos. Asimismo, es recomendable desarrollar programas de prevención en zonas en donde no han llegado estas especies y son altamente favorables para su establecimiento, así como programas de control en las zonas en las que ya se han establecido para evitar su propagación.
2. En general, las plantas son el grupo de mayor preocupación para México porque son, con mucho, el de mayor riqueza de especies invasoras, comparadas con los vertebrados y los invertebrados. De hecho, ninguna de las tres especies de invertebrados analizados tiene presencia registrada en México.
3. *Heracleum mantegazzianum*, *Tomicus piniperda* y *Vespula germanica* son especies de baja preocupación para el país, ya que, de acuerdo con nuestros modelos, no encuentran condiciones ambientales en el presente para establecerse en México. Esto de alguna forma se apoya con el hecho de que en el sistema de información de especies invasoras en México no se ha detectado su presencia en el país. Otras especies de baja prioridad son: *Anthoxanthum odoratum*, *Poa pratensis*, *Agrostemma githago*, *Euphorbia esula*, *Bromus tectorum*, *Agrostis gigantea*, *Carpobrotus edulis*, *Cardamine hirsuta*, *Deroceras reticulatum*, *Aegilops cylindrica* y *Securigera varia*, que, de acuerdo con los modelos, sus áreas de distribución potencial se extienden en menos del 10% del territorio nacional. Sin embargo, es importante mantener registro de su presencia en México como una medida preventiva de su establecimiento y propagación.

4. La región norte del país, principalmente las Sierras Madre Occidental y Oriental, la Sierra de San Pedro Mártir, los pastizales naturales asociados a estas sierras y, en menor medida, los Desiertos Chihuahuense, Sonorense y de Baja California, son las zonas potencialmente más vulnerables a la invasión de un gran número de las plantas invasoras analizadas, pues aquí encuentran condiciones climáticas adecuadas. Los pastizales naturales en estas zonas áridas y, en menor medida los bosques templados, han sido fuertemente impactados para desarrollar actividades agropecuarias, lo que favorece la introducción y establecimiento de especies invasoras. En consecuencia, tanto los estados como las ANP de estas regiones requieren desarrollar programas específicos para la prevención y control de las especies más peligrosas.
5. La riqueza potencial de vertebrados no muestra un patrón claro de distribución geográfica, posiblemente por el bajo número de especies (6). De acuerdo con los resultados, la región norte y noreste de México es en donde hay condiciones climáticas para el establecimiento de todas o la mayoría de estas especies, pero en la mayor parte del país hay condiciones para el establecimiento de al menos 3 especies.
6. El cambio climático no parece ser la amenaza más importante en el futuro cercano para la gran mayoría de las especies analizadas en este trabajo. *Rottboellia cochinchinensis*, *Cenchrus ciliaris*, *Casuarina cunninghamiana*, *Tamarix aphylla* y *Deroceras reticulatum* son las únicas especies para las que los modelos mostraron un aumento de las áreas potencialmente favorables en los diferentes escenarios climáticos futuros. Por ello, se recomienda llevar un seguimiento puntual de poblaciones establecidas de estas especies. *Deroceras reticulatum* fue la especie que mostró mayor incremento, pero no se encuentra registrada para el país, por lo que es importante estar alertas de cualquier registro de esta especie para evitar su establecimiento y propagación.
7. Los resultados arrojados en esta investigación contribuyen a la Estrategia Nacional sobre Especies Invasoras (CANEI 2010), proveyendo información importante y específica sobre las especies más peligrosas y las regiones más vulnerables a la invasión, lo que permitirá una mejor implementación de planes de acción desarrollados en dicha estrategia, para lo que se requiere una coordinación entre la

federación y los estados y entre distintas dependencias gubernamentales, incluyendo la CONABIO, la SAGARPA, la CONANP y el INECC, entre otros. Por ejemplo, en México existen instrumentos de seguimiento de la biodiversidad que se pueden aprovechar para documentar, prevenir y controlar el establecimiento de especies invasoras, como el Inventario Nacional Forestal (INF), que tiene cobertura nacional y una temporalidad específica de monitoreo en campo. Con una adecuada coordinación con la Comisión Nacional Forestal y un entrenamiento relativamente sencillo de las brigadas de campo del INF se puede establecer un sistema de monitoreo a nivel nacional de las especies invasoras cuando se hacen los muestreos en los sitios establecidos en el INF. Actualmente se da seguimiento a, por lo menos, 23 especies invasoras, y este número aumenta cada año. Este estudio puede ayudar a las autoridades de estos seguimientos para identificar a las especies y las regiones de mayor relevancia.

Referencias bibliográficas

- Andersen, M. C., Adams, H., Hope, B., & Powell, M.** 2004. Risk assessment for invasive species. *Risk analysis*. 24 (4): 787-793.
- Campbell, L. P., Luther, C., Moo-Llanes, D., Ramsey, J. M., Danis-Lozano, R., Peterson, A. T.** 2015. Climate change influences on global distributions of dengue and chikungunya virus vectors. *Philosophical Transactions of the Royal Society B. Biological Sciences*. 370 (1665): 20140135.
- Chamberlain, S. Ram, K. & Hart T.** 2016. spocc: R interface to many species occurrence data sources. R package version 0.5.0. <https://github.com/ropensci/spocc>.
- Comité Asesor Nacional sobre Especies Invasoras (CANEI).** 2010. Estrategia nacional sobre especies invasoras en México, prevención, control y erradicación. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Comisión Nacional de Áreas Protegidas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).** 2016. Sistema de información sobre especies invasoras en México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Obtenido de: <http://www.biodiversidad.gob.mx/especies/Invasoras/especies.html>.
- Escalante, T. & Martínez-Meyer, E.** 2013. Ecological niche modeling and Wildlife Management Units (UMA's): An application to deer in Campeche, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 16 (2): 183-191.
- Fernández Eguiarte, A., Zavala Hidalgo, J., Romero Centeno, R., Conde Álvarez, A. C. y Trejo Vázquez, R. I.** 2015. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Obtenido de: <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>.
- Hellmann, J. J., Byers, J. E., Bierwagen, B. G. & Dukes, J. S.** 2008. Five potential consequences of climate change for invasive species. *Conservation Biology*. 23 (3): 534-543.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G. & Jarvis, A.** 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 25 (15): 1965-1978.
- Hutchinson, G.E.** 1957. Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*. 22: 415-427.
- Kearney, M., & Porter, W.** 2009. Mechanistic niche modelling: combining physiological

- and spatial data to predict species' ranges. *Ecology letters*. 12 (4): 334-350.
- Lira-Noriega, A., Soberón, J. & Miller, C. P.** 2013. Process-based and correlative modeling of desert mistletoe distribution: a multiscale approach. *Ecosphere* 4:99.
- Jeschke, J. M., & Strayer, D. L.** 2008. Usefulness of bioclimatic models for studying climate change and invasive species. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1134 (1): 1-24.
- Jiménez-Valverde, A., Diniz, F. de Azevedo, E. B. & Borges, P. A. V.** 2009. Species distribution models do not account for abundance: the case of arthropods on Terceira Island. *Annales Zoologici Fennici*. 46(6): 451-464.
- Lira-Noriega, A., Soberón, J., & Miller, C. P.** 2013. Process-based and correlative modeling of desert mistletoe distribution: a multiscale approach. *Ecosphere*. 4 (8): 1-23.
- Lobell, D. B., Schlenker, W., Costa-Roberts, J.** 2011. Climate trends and global crop production since 1980. *Science*. 333 (6042):616–620.
- Maguire Jr., B.** 1973. Niche response structure and the analytical potentials of its relationship to the habitat. *The American Naturalist*. 107: 213-246.
- Martínez-Meyer, E., Díaz-Porras, D. F., Peterson, A. T. & Yañez-Arenas, C.** 2013. Ecological niche structure and rangewide abundance patterns of species. *Biology Letters*. 9 (1): 20120637.
- Mawdsley, J. R., O'MALLEY, R. O. B. I. N., & Ojima, D. S.** 2009. A review of climate-change adaptation strategies for wildlife management and biodiversity conservation. *Conservation Biology*. 23 (5): 1080-1089.
- McMichael, A. J., & Beaglehole, R.** 2000. The changing global context of public health. *The Lancet*. 356 (9228): 495-499.
- Oliver, T.H., Gillings, S., Girardello, M., Rapacciuolo, G., Brereton, T. M., Siriwardena, S. M., Roy, D. B., Pywell, R. & Fuller, R. J.** 2012. Population density but not stability can be predicted from species distribution models. *Journal of Applied Ecology*. 49 (3): 581-590.
- Osorio-Olvera, L.** 2016. NicheToolBox R package. <https://github.com/luismurao/nichetoolbox>
- Parmesan, C., & Yohe, G.** 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*. 421 (6918): 37-42.
- Pejchar, L., & Mooney, H. A.** 2009. Invasive species, ecosystem services and human well-being. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(9), 497-504.
- Peterson, A.T., Papes, M. & Soberón, J.** 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213(1): 63-72.

- Peterson, A.T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martínez Meyer, E., Nakamura, M. & Araújo, M. B.** 2011. *Ecological Niches and Geographic Distributions*. Monographs in Population Biology. Princeton University Press, Princeton, N.J. 314 p. ISBN: 978-1-4008-4067-0.
- Peterson, A. T., Navarro-Sigüenza, A. G., Martínez-Meyer, E., Cuervo-Robayo, A. P., Berlanga, H., & Soberón, J.** 2015. Twentieth century turnover of Mexican endemic avifaunas: Landscape change versus climate drivers. *Science advances*. 1 (4): e1400071.
- Phillips, S. J. & Dudík, M.** 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*. 31 (2): 161–175.
- Qiao, H., Escobar, L. E., Saupe, E. E., Ji & L., Soberón, J.** 2016. A cautionary note on the use of hypervolume kernel density estimators in ecological niche modelling. *Global Ecology & Biogeography*. Early view. doi:10.1111/geb.12492.
- Thuiller, W., Richardson, D. M., & Midgley, G. F.** 2008. Will climate change promote alien plant invasions?. In: Netwig, W. (ed.). *Ecological Studies Vol. 193. Biological Invasions*. Springer, Berlin Heidelberg, Germany. 197-211 p.
- Tôrres, N. M., Júnior, P. De M., Santos, T., Silveira, L., de Almeida-Jácomo, A. T. & Diniz-Filho, J. A.** 2012. Can species distribution modelling provide estimates of population densities? A case study with jaguars in the Neotropics. *Diversity & Distributions*. 18 (6): 615-627.
- Ureña-Aranda C.A., Rojas-Soto, O., Martínez-Meyer, E., Yáñez-Arenas, C., Landgrave Ramírez, R. & Espinosa de los Monteros, A.** 2015. Using Range-wide abundance modeling to identify key conservation areas for the micro-endemic Bolson Tortoise (*Gopherus flavomarginatus*). *PlosOne*. 10 (6): e0131452.
- VanDerWal, J., Shoo, L. P., Johnson, C. N. & Williams, S. E.** 2009. Abundance and the environmental niche: environmental suitability estimated from niche models predicts the upper limit of local abundance. *The American Naturalist*. 174 (2): 282-291.
- Veech, J. A., Small, M. F., & Baccus, J. T.** 2011. The effect of habitat on the range expansion of a native and an introduced bird species. *Journal of Biogeography*. 38 (1): 69-77.
- Vicente, J. R., Alagador, D., Guerra, C., Alonso, J. M., Kueffer, C., Vaz, A. S., Fernandes, R. F., Cabral, J. A., Araújo, M. B. & Honrado, J. P.** 2016. Cost-effective monitoring of biological invasions under global change: a model-based framework. *Journal of Applied Ecology*. Early view: doi/10.1111/1365-2664.12631/full.
- Yañez-Arenas, C, Martínez-Meyer, E., Mandujano, S. & Rojas-Soto, O.** 2012. Modelling

geographic patterns of population density of the white-tailed deer in central Mexico by implementing ecological niche theory. *Oikos*. 121 (12): 2081-2089.

Zambrano, L., Martínez-Meyer, E., Menezes, N., & Peterson, A. T. 2006. Invasive potential of common carp (*Cyprinus carpio*) and Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in American freshwater systems. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 63 (9): 1903-1910.

Zavaleta, E. S., Hobbs, R. J., & Mooney, H. A. 2001. Viewing invasive species removal in a whole-ecosystem context. *Trends in Ecology & Evolution*. 16 (8): 454-459.

ANEXOS

Anexo 1. Riqueza de especies.xls

Se anexa un archivo Excel con el resultado del número de especies por estados y ecoregiones de México en el presente y 4 escenarios de cambio climático: Presente, 2050 Rcp 4.5 y Rcp 8.5; 2070 Rcp 4.5 y Rcp 8.5.

Anexo 2. Tablas dinámicas

Se anexan las tablas dinámicas resultado del cruce entre los mapas de riqueza total con el mapa de Áreas Naturales Protegidas Federales, Estatales, Municipales, Ejidales, Privadas y Certificadas de la República Mexicana 2016:

http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/loc/anpmex16gw.xml? httpcache=yes& xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl& indent=no

- riqueza_total_presanp.xlsx
- riqueza_total_50r45anp.xlsx
- riqueza_total_50r85anp.xlsx
- riqueza_total_70r45anp.xlsx
- riqueza_total_70r85anp.xlsx

En estas tablas el campo que describe la riqueza en cada ANP, es el que se llama número de especies. Los otros campos corresponden a las columnas del archivo dbf del polígono de las ANP, proporcionado por la CONABIO.