



La conservación en México: exploración de logros, retos y perspectivas desde la ecología terrestre

Conservation in Mexico: exploring achievements, challenges and perspectives from terrestrial ecology

Rurik List^a, Pilar Rodríguez^b, Karla Pelz-Serrano^{a,*}, Julieta Benítez-Malvido^c
y Juan Manuel Lobato^c

^a Área de Investigación en Biología de la Conservación, Departamento de Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma Metropolitana-Lerma, Hidalgo Pte. 46, Colonia La Estación, 52006 Lerma, Estado de México, México

^b Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Periférico-Insurgentes Sur, Núm. 4903, Col. Parques del Pedregal, Delegación Tlalpan, 14010 Cd. de México, México

^c Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, 58190 Morelia, Michoacán, México

Recibido el 16 de agosto de 2016; aceptado el 14 de septiembre de 2017

Disponible en Internet el 14 de noviembre de 2017

Resumen

La ecología en México comenzó a desarrollarse a partir de mediados del siglo pasado y ha hecho aportes relevantes a la conservación de la biodiversidad. En este contexto, algunos temas han tenido un desarrollo importante, como los asociados con la regeneración de bosques tropicales y la selección de sitios prioritarios para la conservación, mientras que otros son más recientes, como el estudio de especies invasoras y sus efectos sobre la biodiversidad nativa. La dimensión de los problemas ambientales que enfrenta México y el planeta presenta nuevos retos a los ecólogos, cuya investigación desea coadyuvar a la conservación de la biodiversidad. En un país megadiverso como México es crucial incrementar los recursos destinados a la formación de investigadores y reforzar las instituciones que llevan a cabo investigación en ecología y conservación. Indudablemente, la información generada por los estudios de ecología enfocados a la conservación representa una de las herramientas principales para la toma de decisiones de manejo y conservación de la biodiversidad en México.

© 2017 Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Palabras clave: Ecología de comunidades; Ecología de paisaje; Ecología de ecosistemas; Ecología de poblaciones; Macroecología; Retos ambientales

Abstract

The development of ecology in Mexico started in the second half of the last century, providing important insights to conservation of biodiversity. In this context, some topics have had a significant development, such as tropical forest regeneration, and methods for the selection of priority sites for conservation; whereas other issues have developed more recently, such as studies on invasive species and their effects on native biodiversity. The dimension of the environmental problems faced by Mexico and the planet presents new challenges to ecologists, whose research aims to contribute to biodiversity conservation. In a mega-diverse country like Mexico, it is crucial to increase resources for training researchers and strengthen institutions that conduct research in ecology and conservation. Undoubtedly, the information generated by ecology studies focused on conservation is one of the main tools to take the appropriate biodiversity management and conservation decisions.

© 2017 Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Keywords: Community ecology; Landscape ecology; Ecosystem ecology; Population ecology; Macroecology; Environmental challenges

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: k.pelz@correo.ler.uam.mx (K. Pelz-Serrano).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

<https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.10.007>

1870-3453/© 2017 Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción

La conservación de la biodiversidad en México ha pasado por diversas etapas, resultado tanto de las dinámicas culturales y socioeconómicas del país como de la influencia de tendencias y concepciones internacionales. Las acciones de conservación en México iniciaron formalmente con la veda del Mineral del Chico en Hidalgo a mediados del siglo XIX y con la protección del Desierto de los Leones en 1876, siendo este último decretado como el primer Parque Nacional de México en 1917 (Conanp, 2005). Sin embargo, durante las 5 décadas siguientes, México no estableció políticas públicas efectivas en materia de conservación de los ecosistemas y su biodiversidad.

Una de las primeras contribuciones de la ecología generada en México a la conservación de la diversidad fue el planteamiento de Enrique Beltrán, en la década de los treinta del siglo pasado, de que la conservación efectiva de la naturaleza dependía no de la prohibición de aprovechamiento, sino del buen uso de los recursos naturales basado en principios ecológicos sólidos (Simonian, 1999). Estas ideas son muy similares a las utilizadas en todo el mundo a través del programa MAB de la UNESCO (Programa el Hombre y la Biosfera) que generó e implementó el concepto de reservas de la biosfera. Adicionalmente, Beltrán fundó, en 1952, el Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables, el cual, junto con el Laboratorio de Ecología de Poblaciones en el Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México, fundado en 1972 por José Sarukhán (que daría lugar en 1996 al actual Instituto de Ecología de la UNAM), y el Instituto de Ecología A.C., fundado por Gonzalo Halffter en 1974, fueron pilares fundamentales para el desarrollo de la ecología.

A través de estas instituciones pioneras, y muchas otras que existen hoy en día, la ecología ha contribuido a la conservación en México de forma notable, con trabajos de importancia nacional a global, que han permitido acciones y procesos en nuestro país tan variados como: la creación del Instituto Nacional de Ecología (actualmente Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Inecc) en 1991, de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) en 1992, y de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp) en el 2000, entre otras dependencias de gobierno; la participación de instituciones de investigación y universidades en la creación y manejo de áreas naturales protegidas; la publicación de las listas de especies en diferentes categorías de riesgo, con sus actualizaciones, la Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-1994 (DOF, 1994) y sus actualizaciones en los años 2001, 2010 y 2015; el desarrollo y la implementación de los programas de conservación de especies en riesgo; y la publicación de la obra «Capital Natural de México», en la que participaron 648 especialistas y sintetiza el conocimiento de la biodiversidad desde distintas perspectivas, tanto de la ecología como de otras disciplinas (Sarukhán et al., 2009). La información contenida ahí es una plataforma para el diseño de medidas fundamentadas en bases sólidas para la conservación de la biodiversidad de México. Cabe destacar que estos son solo algunos ejemplos de los impactos del desarrollo de la ecología en temas de conservación en México, y que faltan muchos otros por señalar.

Hasta donde tenemos conocimiento, el único trabajo que ha explorado la contribución de la ecología a la conservación en México es el de Ceballos et al. (2011). En este sentido, el objetivo del presente artículo es seguir avanzando en el análisis de los temas que han sido investigados por ecólogos mexicanos y que han influido al campo de estudio de la conservación de la biodiversidad en nuestro país, centrándonos principalmente en ecosistemas terrestres. En primer lugar, para poner en contexto el estado de la actividad de la investigación en ecología y conservación en México, presentamos estadísticas de una revisión histórica de la producción científica del país en esta vertiente de estudio. En segundo lugar, exploramos algunas aportaciones de los estudios de la ecología con relevancia para la conservación generadas en México. Buscamos también detectar debilidades que la ecología tiene que superar para contribuir de forma efectiva a la conservación de la diversidad biológica en México. Finalmente, señalamos retos y perspectivas que tiene que enfrentar/abordar la investigación ecológica en México, dentro del gran tema de la conservación, en el contexto actual de crisis ambiental nacional y global.

Algunas estadísticas generales

Con el objetivo de determinar las principales aportaciones de la ecología a la conservación de la biodiversidad en México llevamos a cabo una búsqueda acotada de los artículos científicos publicados sobre el tema entre 1940 y noviembre del 2014. En noviembre de 2014 se consultaron las bases de datos Web of Knowledge y ProQuest. La búsqueda consistió en artículos en revistas indizadas que incluyeran en su título los términos: conservation + Mexican, conservation + Mexico, y ecology + conservation + Mexico. Después de eliminar los artículos duplicados en ambas bases de datos, o aquellos con temas irrelevantes para los propósitos de este estudio, se obtuvieron 839 artículos.

De acuerdo a los resultados de nuestra búsqueda, entre 1978 y 1999 se publicaron en promedio 5 artículos por año, mientras que del año 2000 al 2014, el promedio fue de 50 artículos por año (fig. 1a). Si se consideran los números publicados por Martínez et al. (2006) sobre la tasa de producción de artículos en el área de ecología y biodiversidad de alrededor de 150 artículos en el año 2004, el ritmo de publicación en el tema de conservación representaría alrededor de un tercio del total de producción de los ecólogos que ha realizado trabajo en México. Si bien esta comparación da una idea del interés en el tema de conservación, la comparación debe tomarse con precaución ya que las metodologías de búsqueda fueron distintas. Los artículos resultantes de la búsqueda fueron publicados en 307 revistas (fig. 1), destacando Biodiversity and Conservation (7%, n = 61), Conservation Biology (5.4%, n = 46), y Biological Conservation (5.2%, n = 44). Para conocer a qué área de la biología pertenecían las referencias encontradas, se usó la categoría asignada a los artículos por el buscador Web of Knowledge, así como por las palabras claves de cada uno de los artículos. Las áreas con una mayor representación en la muestra fueron: zoología (42.6%) y botánica (20.9%), seguidas por un categoría más generalizada en la que en los artículos no

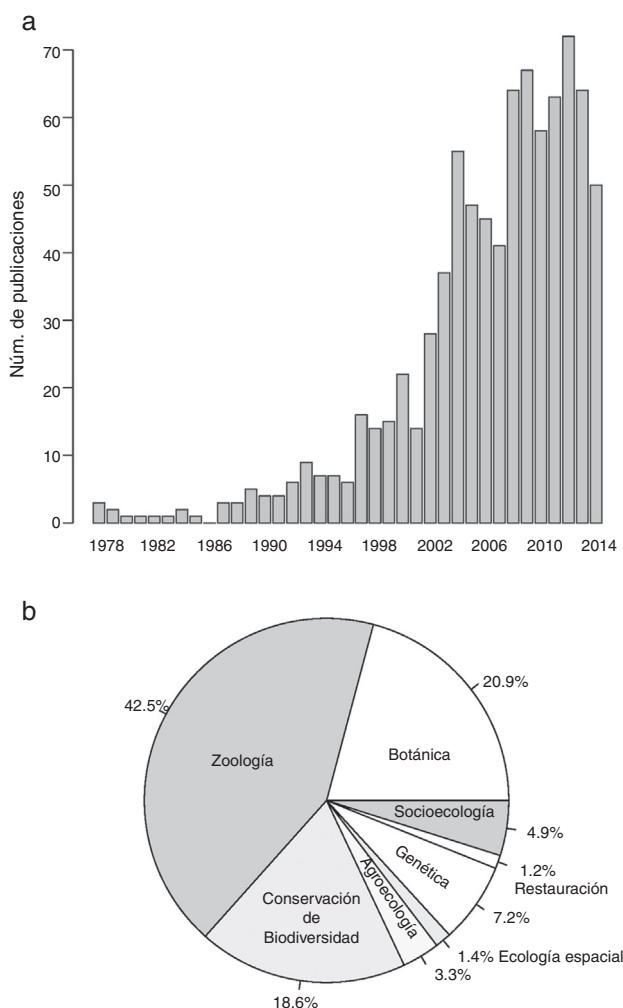


Figura 1. Resultados de la búsqueda de publicaciones científicas (valores absolutos y porcentajes, $n=839$ publicaciones) que contienen algunos de los términos «conservation + Mexico», «conservation + Mexico», y «ecology + conservation + Mexico» en el título. Se muestra el número de publicaciones por año (a) y el porcentaje de publicaciones por temática de investigación (b).

se especificaba un grupo de organismos en particular, por lo que se le denominó conservación de biodiversidad (18.6%; fig. 1b).

La información de esta búsqueda muestra varias cosas importantes: 1) existe un importante banco de información sobre el tema en la literatura científica; 2) ha habido un rápido crecimiento del número de publicaciones en los últimos 17 años; 3) una parte importante de los trabajos se han generado dentro del país y 4) la mayoría de los trabajos encontrados se centran en la conservación de animales y plantas. Adicionalmente a lo que se puede encontrar en una búsqueda acotada utilizando palabras clave, es necesario destacar la existencia de un gran cuerpo de conocimiento ecológico, que no ha sido ligado directamente a los temas de conservación en los títulos de los artículos, por lo cual no aparecen en esta búsqueda. También se cuenta con un número importante de publicaciones en formato de libro y tesis, entre las que destacan los publicados tanto por universidades públicas como por agencias de gobierno por instituciones como la Conabio y el Inecc. En la siguiente sección presentamos algu-

nos de los temas que no siempre aparecen de forma explícita en esta búsqueda, y que a nuestra consideración son de relevancia. Es importante hacer la aclaración de que se excluyen los aportes de la ecología humana. En la siguiente sección se abordan contribuciones (en temas selectos) de los ecólogos mexicanos al campo de la conservación de la biodiversidad. Estas contribuciones ejemplifican el tipo de estudios, producidos a lo largo de los casi 80 años que abarcó nuestra revisión bibliográfica, sobre ecología y conservación en México, mostrada en la figura 1.

Algunas aportaciones de la ecología terrestre a la conservación en México

Desde nuestro punto de vista, consideramos que los estudios ecológicos que han tenido un impacto mayor sobre la conservación en México pueden dividirse en 6 temas: 1) demografía, 2) sucesión ecológica; 3) interacciones bióticas; 4) fragmentación de hábitats tropicales; 5) macroecología y 6) ecología urbana. En esta sección desarrollamos brevemente cada uno de estos temas.

Estudios demográficos

Con la llegada de José Sarukhán a México en 1973, después de completar su doctorado en la Universidad de Gales, Gran Bretaña, bajo la dirección de John Harper, líder mundial en el campo de ecología de poblaciones de plantas, inició en México de manera formal el desarrollo del campo de la ecología de poblaciones de plantas (Martínez-Ramos, 1993). Este episodio impulsó de manera notable el desarrollo de múltiples estudios demográficos con relevancia para la conservación en diferentes tipos de ecosistemas terrestres de México (Ceballos et al., 2011; Martínez-Ramos, 1993). El conocimiento y comprensión de las tasas vitales (supervivencia, crecimiento y reproducción) que experimentan los organismos a lo largo de su ciclo de vida en sus ambientes naturales constituye un componente central para la conservación (Álvarez-Buylla, García-Barrios, Lara-Moreno y Martínez-Ramos, 1996; Franco y Silvertown, 2004; Martínez Ramos y Álvarez-Buylla, 1995; Silvertown, Franco y Menges, 1996). Esta información permite desarrollar modelos poblacionales que generan bases para el establecimiento, desarrollo y aprovechamiento sustentable de especies nativas, aspectos centrales para la conservación de la diversidad y de los procesos ecosistémicos (Álvarez-Buylla et al., 1996; Ceballos et al., 2011). Ejemplo de ello son los estudios de ecología de poblaciones desarrollados en cactáceas (e.g., Godínez-Álvarez, Valverde y Ortega-Baes, 2003) en ecosistemas áridos y agaves en sistemas agroforestales (e.g., Torres, Casas, Vega, Martínez-Ramos y Delgado-Lemus, 2015), así como en palmas en selvas (e.g., Hernández-Barrios, Anten y Martínez-Ramos, 2015; Martínez-Ballesté, Martorell, Martínez-Ramos y Caballero, 2005). Los estudios poblacionales de largo plazo, por otro lado, están ayudando a descubrir efectos antrópicos en las reservas que atentan con la conservación de la biodiversidad en áreas naturales protegidas (Martínez-Ramos, Ortiz-Rodríguez, Piñero, Dirzo y Sarukhán, 2016).

Los estudios de las poblaciones animales realizados en México también han contribuido a hacer frente a un tema de conservación cada vez más importante: la recuperación de especies de vertebrados amenazados. Algunos ejemplos de la aplicación de información demográfica a la conservación son la reintroducción del hurón de patas negras (*Mustela nigripes*), del cóndor de California (*Gymnogyps californianus*), del bisonte (*Bison bison*) y del lobo mexicano (*Canis lupus baileyi*), en el norte del país (Araiza et al., 2012; Pacheco, Ceballos y List, 2002; Solís-Gracia y List, 2014; Wallace et al., 2009). Todas estas especies habían sido extirpadas de México, la mayor parte se encuentran amenazadas en otros países del continente, como los Estados Unidos, por lo que su recuperación en el territorio mexicano es de gran importancia.

Estudios de sucesión ecológica en bosques tropicales

Los inicios de la ecología como ciencia en México están muy ligados a los trabajos de sucesión ecológica de bosques tropicales húmedos desarrollados por Arturo Gómez-Pompa y Faustino Miranda a finales de la década de los 60 del siglo pasado (Guevara-Sada, 1994). El artículo que analiza al bosque tropical lluvioso como un recurso no renovable, publicado en 1972 en la revista Science (Gómez-Pompa, Vázquez-Yanes y Guevara, 1972), constituyó un parteaguas en el desarrollo de la ecología mexicana moderna al abordar temáticas de interés global. Por otra parte, la Comisión Nacional para el Estudio de las Dioscoreaceas, dirigida por Faustino Miranda, Efraín Hernández X. y Arturo Gómez Pompa, contribuyó a la consolidación de un grupo de investigación en ecología de la sucesión secundaria de zonas tropicales (Guevara-Sada, 1994). De estos trabajos pioneros se desarrollaron temas de investigación que son cruciales para la conservación de la diversidad de las zonas tropicales de México y del mundo (Gómez-Pompa, del Amo, Vázquez-Yañez y Butanda-Cervera, 1976; Gómez-Pompa y del Amo, 1985). Se desarrollaron importantes trabajos pioneros a nivel mundial sobre los procesos de regeneración natural de bosques tropicales (Martínez-Ramos, 1994). La aplicación del conocimiento del proceso de sucesión a la conservación de la biodiversidad es directa, ya que la información ecológica de especies que representan a diferentes gremios regenerativos es valiosa en la exploración de acciones de restauración (e.g., Martínez-Garza y Howe, 2003; Martínez-Garza, Bongers y Poorter, 2013). El resultado de dichas acciones puede llevar a la recuperación rápida de poblaciones de plantas que tienen un papel importante en la estructura, dinámica, funcionamiento y mantenimiento de la biodiversidad de los bosques tropicales (Martínez-Ramos y García-Orth, 2007; Martínez-Ramos, Ortiz-Rodríguez et al., 2016). Un ejemplo notable de la aplicación de la sucesión ecológica en bosques tropicales ha sido la rehabilitación de la cantera de la mina Holcim-Aspasco en Veracruz, esfuerzo liderado por el Instituto de Ecología A.C. (Fragoso y Rojas-Fernández, 2012).

Estudios de interacciones bióticas

Asociados a los trabajos de ecología de comunidades, podemos encontrar un número importante de estudios enfocados en

las interacciones bióticas realizados por investigadores mexicanos. A través de estos estudios se ha generado información sobre procesos de polinización, dispersión de semillas y de herbivoría, entre otros, que son fundamentales para entender el papel de las interacciones en el mantenimiento de los procesos ecosistémicos y por lo tanto en el mantenimiento de la biodiversidad. Por ejemplo, el estudio de la ecología y de los procesos de polinización por distintos grupos de organismos, palomillas (e.g., Arizaga, Ezcurra, Peters, de Arellano y Vega, 2000), abejas (e.g., Vergara y Badano, 2009), aves (e.g., Arizmendi, Monterrubio-Solís, Juárez, Flores-Moreno y López-Saut, 2007), mamíferos como murciélagos (e.g., Sperr, Baballero-Martínez, Medellín y Tschapka, 2011; Stoner, Karla, Roxana y Quesada, 2003), constituyen una base para establecer programas de conservación de estos grupos específicos de especies (Trejo-Salazar, Eguiarte, Suro-Piñera y Medellín, 2016). La dispersión de semillas, por otro lado, es fundamental en el mantenimiento de la diversidad a escalas locales (e.g., Martínez-Ramos y Soto-Castro, 1993) y de paisaje. Mutualismos como el nodrismo (e.g., Valiente-Banuet y Ezcurra, 1991; Valiente-Banuet y Verdú, 2007) y la interacción entre los hongos micorrízicos (Montaño et al., 2012) son críticos para la conservación de la biodiversidad.

El concepto de defaunación, acuñado por Rodolfo Dirzo (Dirzo y Miranda, 1990), ha sido crucial en el entendimiento del papel de las interacciones bióticas en el mantenimiento de la biodiversidad y de procesos ecosistémicos. La pérdida de especies de tamaño mayor, por ejemplo mamíferos, trae cambios importantes en la estructura de las comunidades vegetales, que a su vez se refleja en una pérdida de las funciones del bosque y eventualmente en la degradación de los ecosistemas (Dirzo et al., 2014; Martínez-Ramos et al., 2016b). Finalmente, es importante resaltar los estudios recientes en México sobre redes complejas de interacción biótica. Con estos estudios es posible abordar problemas de conservación a través del análisis de la estructura y composición de las redes de interacción entre especies pertenecientes a diferentes niveles tróficos (e.g., Campos-Navarrete, Parra-Tabla, Ramos-Zapata, Díaz-Castelazo y Reyes-Novelo, 2013; Villa-Galaviz, Boege y del Val, 2012). La pérdida de una o varias especies clave en estas redes de interacción puede ocasionar efectos cascada de pérdida de especies (Martínez-Ramos, Ortiz-Rodríguez et al., 2016) y la invasión de especies (Campos-Navarrete et al., 2013). En el otro sentido, conocer cuáles son esas especies clave tiene un valor potencial para la conservación de la biodiversidad, ya que permite establecer programas específicos de conservación y uso sustentable de las mismas.

Ecología de la fragmentación

Cambiando de escala, en lo que se refiere a la ecología del paisaje, existen trabajos importantes generados en México sobre deforestación y fragmentación (e.g., Dirzo y García, 1992) que han tenido importantes repercusiones en la conservación de la diversidad. La deforestación y la fragmentación de ecosistemas se han reconocido como unas de las principales causas de pérdida de la biodiversidad en México (Sarukhán et al., 2009). Los efectos de estos procesos inducidos por actividades humanas sobre la estructura, el funcionamiento y la conservación

de los ecosistemas y su biodiversidad han sido estudiados en México por distintos grupos de trabajo (e.g., Arroyo-Rodríguez y Mandujano, 2006; Mendoza y Dirzo, 1999; Ochoa-Gaona, González-Espinosa, Meave y Sorani, 2004; Ruiz-Guerra, Guevara, Mariano y Dirzo, 2010). También se han estudiado los efectos de la deforestación en los ciclos hídricos y cambios regionales de los regímenes de temperatura y precipitación (e.g., Martínez et al., 2009). Por otro lado, la deforestación y la fragmentación tienen como consecuencia inmediata la reducción de hábitat para las especies, lo que puede ocasionar un proceso de defaunación o desaparición parcial o total de comunidades o poblaciones de algunos grupos como insectos, anfibios y reptiles, aves y mamíferos (e.g., Cuarón, 2000; Dirzo y Miranda, 1990; Suazo-Ortuño, Alvarado-Díaz y Martínez-Ramos, 2008) y producir efectos cascada (Dirzo et al., 2014; Martínez-Ramos et al., 2016b).

La aplicación del conocimiento generado a partir de las investigaciones sobre la fragmentación de los ecosistemas en la conservación de la biodiversidad es especialmente importante en el desarrollo de proyectos de restauración, así como en el diseño e implementación de corredores biológicos. Por ejemplo, se ha puesto en práctica la idea de establecer corredores para hacer frente al problema que plantea la fragmentación del paisaje, particularmente para las especies con grandes requerimientos de hábitat, como los jaguares y los tapires (e.g., Colchero et al., 2011; Mendoza et al., 2013; Petracca, Ramírez-Bravo y Hernández-Santín, 2014). Como medida para conservar este tipo de especies se han identificado corredores a escalas regionales a nacionales, que permiten el movimiento de individuos en la matriz de carreteras, poblados y áreas ganaderas o agropecuarias (Dueñas-López et al., 2015; Grigione et al., 2009; Rodríguez-Soto, Monroy-Vilchis y Zarco-González, 2013).

Finalmente, un gran tema de investigación en desarrollo es el que tiene que ver en cómo conservar biodiversidad en paisajes sujetos a la producción agropecuaria (Arroyo-Rodríguez et al., 2017; Melo, Arroyo-Rodríguez, Fahrig, Martínez-Ramos y Tabarelli, 2013). Producir conservando biodiversidad es un gran reto, considerando que el crecimiento de la población humana demandará aún más productos agropecuarios de alimentación. En este sentido, en México se están desarrollando iniciativas que exploran el papel de reservas establecidas por comunidades rurales para la conservación de fauna en paisajes agroforestales tropicales (e.g., Muench y Martínez-Ramos, 2016).

Aplicaciones de la macroecología a la conservación

La macroecología, una disciplina de la ecología que estudia patrones y procesos a grandes escalas espaciales (Brown, 1995), ha generado conocimientos aplicables a la conservación de la biodiversidad. Por ejemplo, a través del análisis de los patrones de diversidad de especies que inició en México en los años 1980, motivados por entender la extraordinaria diversidad de México, se ha demostrado que las regiones del país donde se concentra el mayor número de especies de mamíferos no coinciden con las regiones en las que se concentran las especies endémicas y en peligro de extinción. El significado de estos resultados en la

conservación ha implicado que la definición de sitios a conservar debe considerar otros elementos de la diversidad, además de la riqueza de especies (Ceballos y Rodríguez, 1993; Ceballos, Rodríguez y Medellín, 1998). En este mismo sentido, el análisis de los patrones de diversidad de especies de vertebrados y sus áreas de distribución ha permitido determinar que tanto mamíferos como aves, reptiles y anfibios tienen áreas de distribución mayoritariamente reducidas, y que las regiones del país en las que se concentran las especies con área de distribución reducida son diferentes entre los grupos (Koleff et al., 2008). Estos aspectos son críticos en el diseño de estrategias y políticas para la conservación de la biodiversidad. Por otro lado, el análisis de la diversidad separando sus componentes alfa (riqueza de especies local), beta (recambio de especies entre localidades) y gamma (riqueza de especies total entre todas las localidades) (Whittaker, 1960, Whittaker, 1972) también tiene aplicaciones para la conservación de la biodiversidad. La primera, es la idea de que las estrategias de selección de sitios a conservar son distintas si se trata de un país de baja o alta diversidad beta (Arita y León-Paniagua, 1993; Halfpeter y Moreno, 2005). Un país con una alta diversidad beta como México requiere de un sistema de áreas naturales protegidas compuesto por un mayor número de sitios, ya que de esta manera sería posible incluir el mayor número de especies (Halfpeter, Soberón, Koleff y Melic, 2005). La segunda aplicación de la macroecología está relacionada con el concepto de complementariedad, que consiste en la optimización del número de especies que se pueden proteger en un sistema de áreas que involucren un mínimo número de sitios (Vázquez, Rodríguez y Arita, 2008). En este sentido, México ha sido un país líder en la implementación de análisis espaciales para la priorización de áreas a conservar mediante el enfoque de la planeación sistemática, en el que está implícito el concepto de complementariedad (Koleff y Urquiza-Haas, 2011). Existen ejemplos notables de estudios a nivel país y por regiones que involucran la participación de decenas de instituciones académicas y de gobierno para la identificación de zonas de alta prioridad para la conservación (Koleff y Urquiza-Haas, 2011). Un paso siguiente es la cristalización de estos esfuerzos de investigación y diagnóstico en políticas públicas para lograr una conservación efectiva en campo.

Ecología urbana

México es un país donde desde los años 1980 la mayor parte de la población humana se encuentra congregada en ciudades (Garza, 2010). Esto aunado a la forma desordenada en la que se ha dado el crecimiento urbano, y a la casi nula aplicación de la legislación ambiental, ha generado que las ciudades se vuelvan una amenaza para la conservación de la biodiversidad y los ecosistemas en nuestro país, debido a que una parte importante de las problemáticas sociales, económicas y ambientales de México son de origen urbano (Garza, 2010; Ortega-Álvarez, MacGregor-Fors, Pineda-López, Ramírez-Bastida y Zuria, 2013). De este modo, el paisaje urbano en el país presenta altos niveles de segregación y desigualdad económicas, baja calidad de vida y está asociado con los problemas de contaminación más graves a nivel nacional

(Damián, 2010; Garza, 2007; Negrete-Salas, 2010; Ramírez y Safa, 2009).

Estos grandes problemas ambientales generados por las ciudades han causado el nacimiento, y rápido crecimiento, del campo de la ecología urbana en el país (Ortega-Álvarez et al., 2013). Aunque la mayor parte de los trabajos existentes sobre este tema en el país son de tipo descriptivo, y generalmente se enfocan en relatar las pérdidas de biodiversidad dentro de ambientes urbanos (e.g., Carbó-Ramírez y Zuria, 2011; MacGregor-Fors, Schondube y Morales-Pérez, 2012), en años recientes se ha intentado generar una ecología urbana diferente, que no solo entienda y describa los procesos y patrones ecológicos que ocurren en las ciudades, sino que también permita mejorar procesos de planeación urbana, reducir el impacto ambiental de las ciudades, y hacerlas más compatibles con la conservación de la biodiversidad (Chacalo y Nava, 2009). Sobre todo podemos destacar trabajos sobre el papel que los elementos del hábitat urbano tiene para diferentes especies de fauna (Castellanos-Morales, García-Peña y List, 2008; MacGregor-Fors, Morales-Pérez y Schondube, 2011), la relación especie/área en ciudades (MacGregor-Fors y Schondube, 2011), las respuestas fisiológicas de la fauna a la urbanización (Chávez-Zichinelli et al., 2013), o de la interacción entre especies invasoras y urbanización (MacGregor-Fors, Morales-Pérez, Quesada y Schondube, 2010) que han sido novedosos a nivel mundial.

Retos que plantea la conservación de la biodiversidad en México

En esta sección discutimos lo que a nuestro juicio constituyen los principales 10 retos a los que se enfrenta la ecología de nuestro país, para hacer frente a los problemas de conservación.

1. *Documentación de la biodiversidad y gradientes de perturbación.* Cada vez es más evidente que las regiones bien conservadas ocupan menor superficie y que, en cambio, la diversidad se distribuye en un gradiente de perturbación provocado por actividades humanas que incluye en un extremo regiones bien conservadas y en el otro regiones altamente degradadas. Uno de los principales retos de la ecología de hoy es entender estos gradientes de perturbación y plantear escenarios de conservación y uso de la diversidad y de restauración, considerando esta realidad (e.g., Melo et al., 2013).
2. *Conservación en paisajes fragmentados.* La población humana continúa creciendo y con ello la demanda de productos agrícolas y de todo tipo que provienen del capital natural. En la medida en que avanza la frontera agropecuaria se va perdiendo la biodiversidad, y hay un umbral en el que una vez que se pasa se pierden los procesos que sustentan la biodiversidad de manera irreversible, o reversible pero a un gran costo económico (Melo et al., 2013). Uno de los grandes retos de la ecología en México es, por lo tanto, generar conocimiento teórico y empírico que incida en políticas públicas que permitan hacer frente al gran reto

alimentario, a la vez que se conserve el capital natural y los procesos que sustentan las actividades productivas.

3. *Respuestas de la biodiversidad al cambio climático y otros factores del cambio global.* La ecología, junto con otras disciplinas, tiene el gran reto de entender y adelantarse a los cambios que como resultado del calentamiento global tendrán las especies y los ecosistemas. Un efecto evidente es el hecho de que las áreas naturales protegidas, creadas para proteger especies o ecosistemas en un momento y espacio determinado, resultarán poco eficaces en su misión en el largo plazo (Martínez-Ramos, Pingarroni et al., 2016). Es necesario diseñar estrategias que aseguren el mantenimiento de los ecosistemas y especies ante los nuevos escenarios (Hanna et al., 2007). En este esquema se deben considerar estrategias como la migración asistida, que implica llevar individuos de una especie a sitios fuera de su área de distribución natural reconocida, como una nueva forma de intentar evitar su extinción (McLachlan, Helmann y Scharz, 2007; Sáenz-Romero, Guzmán-Reyna y Rehfeld, 2006). Esto es relevante en un país con un elevado nivel de endemismo y microendemismo como es México.
4. *Especies invasoras.* Las especies invasoras se consideran una de las principales fuentes de cambio ambiental (Sala et al., 2000); su movimiento en el planeta se está incrementando con la creciente globalización, en un escenario en el que los cambios globales favorecerán a muchas especies invasoras (Dukes y Mooney, 1999; Hulme, 2009) y México no está exento a este tema. Si bien en nuestro país ha habido importantes avances en el tema (Álvarez-Romero, Medellín, Oliveras-de Ita, Gómez-de Silva y Sánchez, 2008; Mendoza-Alfaro et al., 2009) y se cuenta con un Sistema de Información sobre Especies Invasoras, parte del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad de la Conabio, que reúne la información científica sobre estas especies y alimenta la toma de decisiones (González, Barrios, Born-Schmidt y Koleff, 2014), la investigación científica en el tema es incipiente. Por estas razones, es necesario reforzar las líneas de investigación en el tema.
5. *Restauración de ambientes alterados para recuperar la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos.* Como resultado de las políticas públicas actuales de nuestro país, citando como ejemplo la reforma energética en México que prioriza la extracción de hidrocarburos y el desarrollo de infraestructura, se prevé un aumento en la fragmentación de ecosistemas, con los consecuentes efectos sobre los servicios que estos proveen a la sociedad, como se ha visto en regiones amazónicas (Foley et al., 2007). El estudio de estos efectos es un reto de gran envergadura para la ecología, así como lo es avanzar en la restauración de los ecosistemas y los servicios ambientales que proveen (Ceccon y Martínez-Garza, 2016). Otro reto para esta disciplina es lograr la restauración eficiente de ecosistemas perturbados enfrentando condiciones ambientales distintas a aquellas donde se habían desarrollado originalmente, es decir, ante escenarios de cambio climático. Supone un reto importante que requiere conocer los límites de

- resiliencia, resistencia, tolerancia de las especies incluidas en la restauración (Harris, Hobbs, Higgs y Aronson, 2006). También es crítico detectar las condiciones bajo las cuales se puede contar con la regeneración natural del ecosistema a restaurar sin implicar la inversión de los altos costos de la restauración activa (Martínez-Ramos, Pingarroni et al., 2016).
6. *Incorporar a la conservación información genética y filogenética, además de aspectos funcionales a nivel de ecosistemas.* Los factores como fragmentación de hábitat que ponen riesgo a las especies también afectan a las poblaciones, reduciéndolas, lo que promueve la pérdida de diversidad genética, endogamia y deriva genética (Frankham, 2003; Reed y Frankham, 2003) y promueven homogeneización en la composición de especies en el paisaje (e.g., Arroyo-Rodríguez et al., 2013). Al mismo tiempo, el manejo cinagético actual de muchas especies ha implicado el movimiento de individuos de subespecies fuera de su área de distribución. Por estas razones, la genética de poblaciones y las relaciones filogenéticas de las especies son aspectos clave para la conservación (Frankham, 2003). Estos aspectos ya están siendo desarrollados por algunos grupos de investigación en México (Arroyo-Rodríguez et al., 2012; Castañeda-Rico, León-Paniagua, Vázquez-Domínguez y Navarro-Sigüenza, 2014; Espíndola, Gaggioti, Cuarón y Vázquez-Domínguez, 2014), sin embargo es necesario aumentar este conocimiento para que sea incorporado en los planes de manejo de las especies y ecosistemas.
 7. *Expansión de enfermedades tradicionales y enfermedades emergentes.* El tema de las enfermedades de la fauna en estado silvestre ha ido cobrando cada vez más importancia (Suzan et al., 2009) y se considera una amenaza importante para la biodiversidad. Uno de los retos de la ecología es desarrollar líneas de investigación dedicadas al estudio del efecto de las enfermedades, aunado a los efectos del cambio climático.
 8. *Identificación de sitios potenciales de conflicto en el uso de nuevas tecnologías.* El establecimiento de plantas generadoras de energía libres de emisiones como los parques eólicos también puede generar problemas de conservación que deben ser considerados. Por ejemplo, el impacto de las turbinas eólicas en aves y murciélagos está bien documentado (Kunz et al., 2007), de igual forma que los efectos que el tendido de líneas de transmisión y distribución de energía eléctrica tiene en el aumento de la mortalidad de aves (Erikson, Johnson y Young, 2005; Cartron et al., 2000). En este sentido, es necesario el desarrollo de líneas de trabajo en ecología que identifiquen sitios potenciales de conflicto para evitar o reducir los impactos negativos de este tipo de infraestructura.
 9. *Desarrollar sistemas firmes de monitoreo.* Una de las deficiencias de la conservación en México es la falta de un monitoreo de la biodiversidad a sus distintas escalas de análisis: especies a ecosistemas. Un reto fundamental es desarrollar un sistema de monitoreo que incluya una línea base de comparación, para documentar y seguir los cambios ambientales que ocurren en el país. Al respecto, la Conabio y un consorcio de instituciones entre las que están la Conafor, la Conanp y el FMCN, están desarrollando ya un sistema de este tipo.
 10. *Reforzar el carácter multidisciplinario e interdisciplinario de la ecología.* Los retos que enfrenta la ecología para hacer frente al deterioro de la biodiversidad y de nuestro capital natural son cada vez mayores y más complejos. Para hacer frente a estos retos, es evidente que la ecología debe reforzar su carácter multidisciplinario e interdisciplinario, sobre todo si se quiere tener éxito en los programas y estrategias de conservación, que requieren tomar en cuenta aspectos que van más allá de lo biológico, tales como procesos históricos, sociales, culturales, económicos, epidemiológicos, y geográficos. De igual forma, se deben generar líneas de trabajo novedosas que integren este conocimiento a políticas públicas, o al menos en recomendaciones para la conservación de la biodiversidad. A pesar de que México cuenta con al menos 90 instituciones dedicadas a la ecología y a pesar de tener centros de investigación de primer nivel, así como investigadores con excelente formación, la ecología en su aplicación a la conservación en México se ve frenada por la escasez de recursos. Para enfrentar los nuevos retos de conservación, en primer lugar es imprescindible que se incrementen los recursos que se disponen para la investigación científica. El porcentaje del producto interno bruto que se designa a ciencia y tecnología en México es bajo (0.5%) en comparación con otros países como Estados Unidos, Corea e Israel, que designan más del 3% de su producto interno bruto (OECD, 2010). Si bien el porcentaje del producto interno bruto designado a ciencia y tecnología ha variado en los últimos 5 años, mostrando algunos incrementos y decrementos, hoy en día no es suficiente para asegurar que el desarrollo científico en el país ayude a desarrollar el conocimiento, tecnologías y prácticas efectivas para la conservación. Aunado a lo anterior, la inseguridad y violencia que vive el país desde 2006 está afectando negativamente el trabajo en ecología y conservación, lo que ha forzado a muchos investigadores a dejar de trabajar en áreas biológicamente importantes (List y Pelz, 2014). La comunicación efectiva a la sociedad, de la información producida por la investigación en ecología aplicada a la conservación, muchas veces financiada con recursos públicos, puede aumentar el interés y apoyo de la población a que se incremente el presupuesto en este rubro, así como a favorecer el apoyo de los pobladores de las distintas regiones donde se trabaja en conservación, para permitir y facilitar el desarrollo de la investigación.

Conclusiones

El desarrollo de la ecología y sus implicaciones para la conservación de la biodiversidad ha tenido un crecimiento detectable en México. Ha aportado conocimientos sobre aspectos básicos de la ecología de especies de fauna y flora que pueden ayudar a establecer principios de conservación. Sin embargo, existen áreas de la ecología que deben desarrollarse generando conocimiento útil para el diseño de estrategias de conserva-

ción de comunidades bióticas y de ecosistemas completos, con enfoques emergentes tales como la ecología de redes complejas de interacciones bióticas, ecología de comunidades y filogenia, ecología de la conservación en paisajes modificados por actividades humanas, entre otras. La dimensión de los problemas ambientales a los que nos enfrentamos, como lo son la crisis de la pérdida de diversidad, aunado al cambio climático global, el efecto de las especies invasoras, y los efectos de las políticas nacionales que impulsan la degradación y la reducción de extensión de los ecosistemas naturales, plantean nuevos retos para la ecología en general, y para las ramas de la ecología que inciden directamente en temas de la conservación en México. La crisis ambiental global, y la de México en particular, toma a esta disciplina en una etapa en la que los grupos de ecólogos que se dedican a este tema no son suficientes, en relación con la magnitud de los problemas para los que deben plantearse soluciones. Las distintas disciplinas de la ecología en México, como son la ecología evolutiva, ecofisiología, la ecología de poblaciones, la ecología de comunidades, la ecología de ecosistemas, y la macroecología, por mencionar algunas, generan conocimiento que se puede aplicar directa o indirectamente a la conservación de especies. Uno de los grandes retos es lograr que en México se desarrollen grupos de trabajo que integren el conocimiento que se genera en distintas disciplinas, bajo un marco conceptual nuevo que permita desarrollar una verdadera multidisciplinariedad, interdisciplinariedad (trabajando de manera coordinada con académicos de otras ciencias naturales, exactas y sociales en la búsqueda de soluciones comunes) y transdisciplinariedad (trabajando con agentes no académicos que tienen que ver con la conservación). Además, otra de las tareas de los académicos cuyo quehacer es la ecología en su aplicación a la conservación es generar líneas de trabajo novedosas que integren este conocimiento a políticas públicas, o al menos en recomendaciones para la conservación de la biodiversidad. El trabajo que queda por hacer en este sentido es arduo pero sumamente importante (ver artículo sobre innovación ecotecnológica en este suplemento).

En un país megadiverso y con una problemática ambiental tan profunda, es imprescindible que se canalicen más recursos para la formación de investigadores y para el fortalecimiento de los laboratorios e instituciones que dedican su actividad de investigación a estos temas. Sin duda, la información generada por los estudios en ecología aplicados a la conservación, son fundamentales y urgentes para tomar las mejores decisiones de manejo y conservación de la gran biodiversidad existente en México.

Agradecimientos

Al comité organizador de este número especial, por la invitación a participar en este esfuerzo colectivo. A los 2 revisores anónimos del manuscrito por sus valiosas críticas y sugerencias. Al Dr. Miguel Martínez-Ramos y al Dr. Jorge Schondube por sus valiosos comentarios y aportaciones que ayudaron a mejorar el escrito.

Referencias

- Álvarez-Buylla, E. R., García-Barrios, R., Lara-Moreno, C. y Martínez-Ramos, M. (1996). Demographic and genetic models in conservation biology: applications and perspectives for tropical rain forest tree species. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 27, 387–421.
- Álvarez-Romero, J. A., Medellín, R. A., Oliveras-de Ita, A., Gómez-de Silva, H. y Sánchez, O. (2008). *Animales exóticos en México: una amenaza para la biodiversidad*. México D.F.: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Araiza, M., Carrillo, L., List, R., López-González, C. A., Martínez-Meyer, E., Martínez-Gutiérrez, P. G., et al. (2012). Consensus criteria for potential areas for wolf reintroduction in Mexico. *Conservation Biology*, 26, 630–637.
- Arita, H. T. y León-Paniagua, L. (1993). Diversidad de mamíferos terrestres. *Ciencias (Número Especial)*, 7, 13–22.
- Arizaga, S., Ezcurra, E., Peters, E., de Arellano, F. R. y Vega, E. (2000). Pollination ecology of *Agave macroacantha* (Agavaceae) in a Mexican tropical desert II. The role of pollinators. *American Journal of Botany*, 87, 1011–1017.
- Arizmendi, M. C., Monterrubio-Solíz, C., Juárez, L., Flores-Moreno, I. y López-Saut, E. (2007). Effect of presence of nectar feeders on the breeding success of *Salvia mexicana* and *Salvia fulgens* in a suburban park near Mexico City. *Biological Conservation*, 136, 155–158.
- Arroyo-Rodríguez, V., Cavender-Bares, J., Escobar, F., Melo, F. P., Tabarelli, M. y Santos, B. A. (2012). Maintenance of tree phylogenetic diversity in a highly fragmented rain forest. *Journal of Ecology*, 100, 702–711.
- Arroyo-Rodríguez, V. y Mandujano, S. (2006). The importance of tropical rain forest fragments to the conservation of plant species diversity in Los Tuxtlas, Mexico. *Biodiversity and Conservation*, 15, 4159–4179.
- Arroyo-Rodríguez, V., Melo, F. P., Martínez-Ramos, M., Bongers, F., Chazdon, R. L., Meave, J. A., et al. (2017). Multiple successional pathways in human-modified tropical landscapes: new insights from forest succession, forest fragmentation and landscape ecology research. *Biological Reviews*, 92, 326–340.
- Arroyo-Rodríguez, V., Rös, M., Escobar, F., Melo, F. P., Santos, B. A., Tabarelli, M., et al. (2013). Plant β diversity in fragmented rain forests: testing floristic homogenization and differentiation hypotheses. *Journal of Ecology*, 101, 1449–1458.
- Brown, J. H. (1995). *Macroecology*. Chicago: University of Chicago Press.
- Campos-Navarrete, M. J., Parra-Tabla, V., Ramos-Zapata, J., Díaz-Castelazo, C. y Reyes-Novelo, E. (2013). Structure of plant–Hymenoptera networks in two coastal shrub sites in Mexico. *Arthropod-Plant Interactions*, 7, 607–617.
- Carbó-Ramírez, P. y Zuria, I. (2011). The value of small urban greenspaces for birds in a Mexican city. *Landscape and Urban Planning*, 100, 213–222.
- Cartron, J. L., Garber, G. L., Finley, C., Rustay, C., Kellermueller, R., Day, M. P., et al. (2000). Power pole casualties among raptors and ravens in northwestern Chihuahua, Mexico. *Western Birds*, 31, 255–257.
- Castañeda-Rico, S., León-Paniagua, L., Vázquez-Domínguez, E. y Navarro-Sigüenza, A. G. (2014). Evolutionary diversification and speciation in rodents of the Mexican lowlands: the *Peromyscus melanophrys* species group. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 70, 454–463.
- Castellanos-Morales, G., García-Peña, N. y List, R. (2008). Uso de recursos del cacomixtle *Bassariscus astutus* y la zorra gris *Urocyon cinereoargenteus* en una reserva urbana de la ciudad de México. En C. Lorenzo, C. E. Espinoza, J. Ortega, y G. Ceballos (Eds.), *Avances en el estudio de los mamíferos II* (pp. 377–390). México D.F.: Asociación Mexicana de Mastozoología, A.C.
- Ceballos, G., Mazari-Hiriart, M., Bojórquez, L. A., Búrquez-Montijo, A., List, R., Mandujano, M. C., et al. (2011). Ecología y conservación: los grandes retos de este siglo. *Ciencias*, 103, 42–49.
- Ceballos, G. y Rodríguez, P. (1993). Diversidad y conservación de mamíferos de México II. Patrones de endemidad de mamíferos mexicanos. En R. A. Medellín y G. Ceballos (Eds.), *Avances en el estudio de los mamíferos II* (pp. 87–108). México D.F.: Asociación Mexicana de Mastozoología, A.C.
- Ceballos, G., Rodríguez, P. y Medellín, R. (1998). Assessing conservation priorities in megadiverse Mexico: mammalian diversity, endemism, and endangerment. *Ecological Applications*, 8, 8–17.

- Ceccon, E. y Martínez-Garza, C. (2016). *Experiencias mexicanas en la restauración de los ecosistemas*. Ciudad de México: Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, Universidad Nacional Autónoma de México; Universidad Autónoma del Estado de Morelos; Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Chacalo, A. y Nava, V. C. (2009). *Árboles y arbustos para ciudades*. México D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Chávez-Zichinelli, C. A., MacGregor-Fors, I., Quesada, J., Talamás-Rohana, P., Romano, M. C., Valdéz, R., et al. (2013). How stressed are birds in an urbanizing landscape? Relationships between the physiology of birds and three levels of habitat alteration. *The Condor*, 115, 84–92.
- Colchero, F., Conde, D. A., Manterola, C., Chávez, C., Rivera, A. y Ceballos, G. (2011). Jaguars on the move: modeling movement to mitigate fragmentation from road expansion in the Mayan Forest. *Animal Conservation*, 14, 158–166.
- Conanp (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). (2005). *Programa de conservación y manejo del Parque Nacional El Chico*. México, D.F.: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.
- Cuarón, A. D. (2000). A global perspective on habitat disturbance and tropical rainforest mammals. *Conservation Biology*, 14, 1574–1579.
- Damián, A. (2010). La pobreza en México y en sus principales ciudades. En G. Garza y M. Scheingart (Eds.), *Los grandes problemas de México: desarrollo urbano y regional* (pp. 213–258). México D.F.: El Colegio de México.
- Dirzo, R. y García, M. C. (1992). Rates of deforestation in Los Tuxtlas, a Neotropical area in Southeast Mexico. *Conservation Biology*, 6, 84–90.
- Dirzo, R. y Miranda, A. (1990). Contemporary neotropical defaunation and forest structure, function, and diversity—a sequel to John Terborgh. *Conservation Biology*, 4, 444–447.
- Dirzo, R., Young, H. S., Galetti, M., Ceballos, G., Isaac, N. J. B. y Collen, B. (2014). Defaunation in the Anthropocene. *Science*, 345, 401–406.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (1994). Norma Oficial Mexicana (NOM-059-ECOL-1994). (1994). Determina las especies y subespecies de flora y fauna silvestres terrestres y acuáticas en peligro de extinción, amenazadas, raras y las sujetas a protección especial, y que establece especificaciones para su protección. Diario Oficial de la Federación, 16 de mayo de 1994. Tomo 488.
- Dueñas-López, G., Rosas-Rosas, O. C., Chapa-Vargas, L., Bender, L. C., Tarango-Arámbula, L. A., Martínez-Montoya, J. F., et al. (2015). Connectivity among jaguar populations in the Sierra Madre Oriental México. *Therya*, 6, 449–468.
- Dukes, J. S. y Mooney, H. A. (1999). Does global change increase the success of biological invaders? *Trends in Ecology and Evolution*, 4, 135–139.
- Erikson, W. P., Johnson, G. D. y Young, Jr. D. P. (2005). A summary and comparison of bird mortality from anthropogenic causes with emphasis on collisions. Albany, California: USDA Forest Serv. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-191.
- Espíndola, S., Gaggioti, O., Cuarón, A. D. y Vázquez-Domínguez, E. (2014). High genetic structure in the Cozumel Harvest mice, an endangered island endemic: conservation implications. *Conservation Genetics*, 15, 1393–1402.
- Foley, J. A., Asner, G. P., Costa, M. H., Coe, M. T., DeFries, R., Gibbs, H. K., et al. (2007). Amazonia revealed: forest degradation and loss of ecosystem goods and services in the Amazon Basin. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5, 25–32.
- Fragoso, C. y Rojas-Fernández, P. (2012). *Monitoreo ecológico de una cantera rehabilitada por cementos Holcim Apasco en Veracruz*. México D.F.: INECOL y Holcim Apasco, México.
- Franco, M. y Silvertown, J. (2004). A comparative demography of plants based upon elasticities of vital rates. *Ecology*, 85, 531–538.
- Frankham, R. (2003). Genetics and conservation biology. *C. R. Biologies*, 326, S22–S29.
- Garza, G. (2007). La urbanización metropolitana en México: normatividad y características socioeconómicas. *Papeles de Población*, 52, 78–88.
- Garza, G. (2010). La transformación urbana de México 1970–2020. En G. Garza y M. Scheingart (Eds.), *Los grandes problemas de México: desarrollo urbano y regional* (pp. 31–86). México D.F.: El Colegio de México.
- Godínez-Álvarez, H., Valverde, T. y Ortega-Baes, P. (2003). Demographic trends in the Cactaceae. *The Botanical Review*, 69, 173–203.
- Gómez-Pompa, A. y del Amo, S. (1985). *Investigaciones sobre la regeneración de selvas altas en Veracruz, México*. México D.F.: Editorial Alhambra. Vol II.
- Gómez-Pompa, A., del Amo, S., Vázquez-Yañez, C. y Butanda-Cervera, C. (1976). *Investigaciones sobre la regeneración de selvas altas en Veracruz, México*. México D.F.: Compañía Editorial Continental, S.A. Vol I.
- Gómez-Pompa, A., Vázquez-Yanes, C. y Guevara, S. (1972). The tropical rain forest: a nonrenewable resource. *Science*, 177, 762–765.
- González, A. I., Barrios, Y., Born-Schmidt, G. y Koleff, P. (2014). *El sistema de información sobre especies invasoras. Especies acuáticas invasoras en México*. México D.F.: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Grigione, M. M., Menke, K., López-González, C., List, R., Banda, A., Carrera, J., et al. (2009). Identifying potential conservation areas in the U.S-Mexico border region for neotropical cats: integrating reliable knowledge at a landscape level. *Oryx*, 43, 78–86.
- Guevara-Sada, S. (1994). Historia de la ecología terrestre en México. *Ciencias*, 4, 89–95.
- Halfiter, G. y Moreno, C. (2005). Significado biológico de las diversidades alfa beta y gamma. En G. Halfiter, J. Soberón, P. Koleff, y A. Melic (Eds.), *Sobre diversidad biológica: el significado de las diversidades alfa, beta y gamma*. Zaragoza: Sociedad Entomológica Aragonesa, Conabio, Diversitas, Conacyt.
- Halfiter, G., Soberón, J., Koleff, P. y Melic, A. (2005). *Sobre diversidad biológica: el significado de las diversidades alfa, beta y gamma*. Zaragoza: Sociedad Entomológica Aragonesa, Conabio, Diversitas, Conacyt.
- Hanna, L., Midgley, G., Andelman, S., Araujo, M., Hughes, G., Martínez-Meyer, E., et al. (2007). Protected area needs in a changing climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 3, 131–138.
- Harris, J. A., Hobbs, R. J., Higgs, E. y Aronson, J. (2006). Ecological restoration and global climate change. *Ecological Restoration*, 14, 170–176.
- Hernández-Barrios, J. C., Anten, N. P. y Martínez-Ramos, M. (2015). Sustainable harvesting of non-timber forest products based on ecological and economic criteria. *Journal of Applied Ecology*, 52, 389–401.
- Hulme, P. E. (2009). Trade, transport and trouble: managing invasive species pathways in an era of globalization. *Journal of Applied Ecology*, 46, 10–18.
- Koleff, P., Soberón, J., Arita, H. T., Dávila, P., Flores-Villela, O., Golubov, J., et al. (2008). *Capital natural y bienestar social Volumen I. Conocimiento de la biodiversidad. Patrones de diversidad espacial en grupos selectos de especies*. México D.F.: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Koleff, P. y Urquiza-Haas, T. (Coords.). (2011). *Planeación para la conservación de la biodiversidad terrestre en México: retos en un país megadiverso*. México D.F.: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.
- Kunz, T. H., Arnet, E. B., Erickson, W. P., Hoar, A. R., Johnson, G. D., Larkin, R. P., et al. (2007). Ecological impacts of wind energy development on bats. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5, 315–324.
- List, R. y Pelz, K.S. (2014). Species conservation in a violence and insecurity context. En North America Congress for Conservation Biology (NACCB). Missoula, Montana.
- MacGregor-Fors, I., Morales-Pérez, L., Quesada, J. y Schondube, J. E. (2010). Relationship between the presence of House Sparrows (*Passer domesticus*) and Neotropical bird community structure and diversity. *Biological Invasions*, 12, 87–96.
- MacGregor-Fors, I., Morales-Pérez, L. y Schondube, J. E. (2011). Does size really matter? Species-area relationships in human settlements. *Diversity and Distributions*, 12, 372–381.
- MacGregor-Fors, I. y Schondube, J. E. (2011). Gray vs. green urbanization: relative importance of urban features for urban bird communities. *Basic and Applied Ecology*, 12, 372–381.
- MacGregor-Fors, I., Schondube, J. E. y Morales-Pérez, L. (2012). From forests to cities: effects of urbanization on tropical birds. En C. Lepczyk y P. S. Warren (Eds.), *Urban bird ecology and conservation studies in avian biology*. Berkeley: University of California Press.
- Martínez, M. L., Manson, R. H., Balvanera, P., Dirzo, R., Soberón, J., García-Barrios, L., et al. (2006). The evolution of ecology in Mexico: facing

- challenges and preparing for the future. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4, 259–267.
- Martínez, M. L., Pérez-Maqueo, O., Vázquez, G., Castillo-Campos, G., García-Franco, J., Mehlreter, K., et al. (2009). Effects of land use change on biodiversity and ecosystem services in tropical montane cloud forests of Mexico. *Forest Ecology and Management*, 258, 1856–1863.
- Martínez-Ballesté, A., Martorell, C., Martínez-Ramos, M. y Caballero, J. (2005). Applying retrospective demographic models to assess sustainable use: the Maya management of xa'an palms. *Ecology and Society*, 10, 17.
- Martínez-Garza, C., Bongers, F. y Poorter, L. (2013). Are functional traits good predictors of species performance in restoration plantings in tropical abandoned pastures? *Forest Ecology and Management*, 303, 35–45.
- Martínez-Garza, C. y Howe, H. F. (2003). Restoring tropical diversity: beating the time tax on species loss. *Journal of Applied Ecology*, 40, 423–429.
- Martínez-Ramos, M. (1993). Estudios y perspectivas sobre ecología vegetal en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 55, 75–91.
- Martínez-Ramos, M. (1994). Regeneración natural y diversidad de especies en selvas húmedas. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 54, 179–224.
- Martínez-Ramos, M. y Álvarez-Buylla, E. (1995). Seed dispersal and patch dynamics: a demographic approach. *Ecoscience*, 2, 223–229.
- Martínez-Ramos, M. y García-Orth, X. (2007). Sucesión ecológica y restauración: el caso de selvas húmedas. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 80, 69–84.
- Martínez-Ramos, M., Ortiz-Rodríguez, I. A., Piñero, D., Dirzo, R. y Sarukhán, J. (2016). Anthropogenic disturbances jeopardize biodiversity conservation within tropical rainforest reserves. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113, 5323–5328.
- Martínez-Ramos, M., Pingarroni, A., Rodríguez-Velázquez, J., Toledo-Chelala, L., Zermeño-Hernández, I. y Bongers, F. (2016). Natural forest regeneration and ecological restoration in human-modified tropical landscapes. *Biotropica*, 48, 745–757.
- Martínez-Ramos, M. y Soto-Castro, A. (1993). Seed rain and advanced regeneration in a tropical rain forest. *Vegetatio*, 108, 299–318.
- McLachlan, J. S., Helmann, J. J. y Scharz, M. W. (2007). A framework for debate of assisted migration in an era of climate change. *Conservation Biology*, 21, 297–302.
- Melo, F. P., Arroyo-Rodríguez, V., Fahrig, I., Martínez-Ramos, M. y Tabarelli, M. (2013). On the hope for biodiversity-friendly tropical landscapes. *Trends in Ecology & Evolution*, 28, 462–468.
- Mendoza, E. y Dirzo, R. (1999). Deforestation in Lacandonia (southeast Mexico): evidence for the declaration of the northernmost tropical hot-spot. *Biodiversity and Conservation*, 8, 1621–1641.
- Mendoza, E., Fuller, T. L., Thomassen, H. A., Buermann, W., Ramírez-Mejía, D. y Smith, T. B. (2013). A preliminary assessment of the effectiveness of the Mesoamerican Biological Corridor for protecting potential Baird's tapir (*Tapirus bairdii*) habitat in southern Mexico. *Integrative Zoology*, 8, 35–47.
- Mendoza-Alfaro, R. E., Cudmore, B., Orr, R., Fisher, J. P., Balderas, S. C., Courtenay, P., et al. (2009). *Trinational risk assessment guidelines for aquatic alien invasive species*. Montreal, QC: Commission for Environmental Cooperation.
- Montaño, N. M., Alarcón, A., Camargo-Ricalde, S. L., Hernández-Cuevas, L. V., Álvarez-Sánchez, J., González-Chávez, M. D. C. A., et al. (2012). Research on arbuscular mycorrhizae in Mexico: an historical synthesis and future prospects. *Symbiosis*, 57, 111–126.
- Muench, C. y Martínez-Ramos, M. (2016). Can community-protected areas conserve biodiversity in human-modified tropical landscapes? The case of terrestrial mammals in southern Mexico. *Tropical Conservation Science*, 9, 178–202.
- Negrete-Salas, M. E. (2010). Las metrópolis mexicanas: conceptualización gestión y agenda de políticas. En G. Garza y M. Scheingart (Eds.), *Los grandes problemas de México: desarrollo urbano y regional*. (pp. 173–212). México D.F.: El Colegio de México.
- Ochoa-Gaona, S., González-Espinosa, M., Meave, J. A. y Sorani, V. (2004). Effect of forest fragmentation on the woody flora of the highlands of Chiapas, Mexico. *Biodiversity and Conservation*, 13, 867–884.
- OECD (2010). OECD Factbook 2010: economic, environmental and social statistics. OECD Publishing [consultado 15 Nov 2014]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1787/factbook-2010-en>
- Ortega-Álvarez, R., MacGregor-Fors, I., Pineda-López, R., Ramírez-Bastida, P. y Zuria, I. (2013). México. En I. MacGregor-Fors y R. Ortega-Álvarez (Eds.), *Ecología urbana. Experiencias en América Latina* (pp. 82–99). Xalapa [consultado 22 Nov 2014]. Disponible en: http://www1.inecol.edu.mx/libro_ecologia_urbana/ecologia_urbana_experiencias_en.america.latina.pdf
- Pacheco, J., Ceballos, G. y List, R. (2002). Reintroducción del hurón de patas negras en las praderas de Janos Chihuahua. *Biodiversitas. Boletín informativo de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*, 42, 2–5.
- Petracca, L. S., Ramírez-Bravo, O. E. y Hernández-Santín, L. (2014). Occupancy estimation of jaguar *Panthera onca* to assess the value of east-central Mexico as a jaguar corridor. *Oryx*, 48, 133–140.
- Ramírez, J. M. y Safa, P. (2009). Tendencias y retos recientes en tres metrópolis mexicanas: Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey. *Cuadernos de Antropología Social*, 30, 77–92.
- Reed, D. H. y Frankham, R. (2003). Correlation between fitness and genetic diversity. *Conservation Biology*, 17, 230–237.
- Rodríguez-Soto, C., Monroy-Vilchis, O. y Zarco-González, M. M. (2013). Corridors for jaguar (*Panthera onca*) in Mexico: conservation strategies. *Journal for Nature Conservation*, 21, 438–443.
- Ruiz-Guerra, B., Guevara, R., Mariano, N. A. y Dirzo, R. (2010). Insect herbivory declines with forest fragmentation and covaries with plant regeneration mode: evidence from a Mexican tropical rain forest. *Oikos*, 119, 317–325.
- Sáenz-Romero, C., Guzmán-Reyna, R. R. y Rehfeld, G. E. (2006). Altitudinal genetic variation among *Pinus oocarpa* populations in Michoacán Mexico: implications for seed zoning, conservation, tree breeding and global warming. *Forest Ecology and Management*, 229, 340–350.
- Sala, O. E., Chapin, F. S., III, Armesto, J. J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., et al. (2000). Global biodiversity scenarios for the Year 2100. *Science*, 287, 1770–1774.
- Sarukhán, J., Koleff, P., Carabias, J., Soberón, J., Dirzo, R., Llorente-Bousquets, J., et al. (2009). *Capital Natural de México. Síntesis: conocimiento actual evaluación y perspectivas de sustentabilidad*. México D.F.: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Silvertown, J., Franco, M. y Menges, E. (1996). Interpretation of elasticity matrices as an aid to the management of plant populations for conservation. *Conservation Biology*, 10, 591–597.
- Simonian, L. (1999). *Defending the land of the jaguar: a history of conservation in Mexico*. Austin: University of Texas Press.
- Solís-Gracia, V. y List, R. (2014). Bionte americano. La biodiversidad en Chihuahua: estudio de estado. México D.F.: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Sperr, E. B., Baballero-Martínez, L. A., Medellín, R. A. y Tschapka, M. (2011). Seasonal changes in species composition, resource use and reproductive patterns within a guild of nectar-feeding bats in a west Mexican dry forest. *Journal of Tropical Ecology*, 27, 133–145.
- Stoner, K. E., Karla, A. S., Roxana, C. F. y Quesada, M. (2003). Population dynamics, reproduction, and diet of the lesser long-nosed bat (*Leptonycteris curasoae*) in Jalisco, Mexico: implications for conservation. *Biodiversity & Conservation*, 12, 357–373.
- Suazo-Ortuño, I., Alvarado-Díaz, J. y Martínez-Ramos, M. (2008). Effects of conversion of dry tropical forest to agricultural mosaic on herpetofaunal ssemblages. *Conservation Biology*, 22, 362–374.
- Suzan, G., Marcé, E., Giermakowski, J. T., Mills, J. N., Ceballos, G., Ostfeld, R. S., et al. (2009). Experimental evidence for reduced rodent diversity causing increased hantavirus prevalence. *Plos One*, 4, e5461.
- Torres, I., Casas, A., Vega, E., Martínez-Ramos, M. y Delgado-Lemus, A. (2015). Population dynamics and sustainable management of mesal agaves in central Mexico: *Agave potatorum* in the Tehuacán-Cuicatlán Valley. *Economic Botany*, 69, 26–41.
- Trejo-Salazar, R. E., Eguiarte, L. E., Suro-Piñera, D. y Medellín, R. A. (2016). Save our bats, save our tequila: industry and science join forces to help bats and agaves. *Natural Areas Journal*, 36, 523–530.
- Valiente-Banuet, A. y Ezcurra, E. (1991). Shade as a cause of the association between the cactus *Neobuxbaumia tetetzo* and the nurse plant *Mimosa luisana* in the Tehuacán Valley, Mexico. *Journal of Ecology*, 79, 961–971.

- Valiente-Banuet, A. y Verdú, M. (2007). Facilitation can increase the phylogenetic diversity of plant communities. *Ecology letters*, *10*, 1029–1036.
- Vázquez, L. B., Rodríguez, P. y Arita, H. T. (2008). Conservation planning in a subdivided world. *Biodiversity and Conservation*, *17*, 1367–1377.
- Vergara, C. H. y Badano, E. I. (2009). Pollinator diversity increases fruit production in Mexican coffee plantations: the importance of rustic management systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *129*, 117–123.
- Villa-Galaviz, E., Boege, K. y del Val, E. (2012). Resilience in plant-herbivore networks during secondary succession. *Plos One*. *7*, e53009.
- Wallace, M. P., Vargas, J., Porras, M. C., Zuba, J. R., de la Cruz, E., Peters, E., et al. (2009). Reintroducción y establecimiento del cóndor de California, *Gymnogyps californianus*, en la sierra de San Pedro Mártir. In *Baja California. Informe final del proyecto CONABIO DQ017*. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y The Zoological Society of San Diego.
- Whittaker, R. H. (1960). Vegetation in the Siskiyou mountains Oregon and California. *Ecological Monographs*, *30*, 279–338.
- Whittaker, R. H. (1972). Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*, *21*, 213–251.