



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**

---

---

**MAESTRÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

**AMENAZAS A LA CONSERVACIÓN DE LAS ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS  
DE MÉXICO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS  
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

**Presenta: Dulce Guadalupe García Flores**

**Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, septiembre 2022.**





**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**

---

---

**MAESTRÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

**AMENAZAS A LA CONSERVACIÓN DE LAS ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS  
DE MÉXICO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS  
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

**Presenta: Dulce Guadalupe García Flores**

COMITÉ TUTORAL:

**TUTOR ACADÉMICO: DR. ÁNGEL ROLANDO ENDARA AGRAMÓNT**

**TUTOR ADJUNTO: DRA. MARTHA MARIELA ZARCO GONZÁLEZ**

**TUTOR ADJUNTO: DR. SERGIO FRANCO MAASS**

**Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, septiembre 2022.**

## Resumen

Actualmente la fragmentación del hábitat es una de las principales amenazas para la conservación de la biodiversidad, la cual ha sido causada por la expansión de las actividades humanas. Ante la creciente crisis ambiental el decreto de Áreas Naturales Protegidas (ANP) se ha convertido en una herramienta a nivel mundial con el objetivo de salvaguardar los diferentes ecosistemas, sin embargo, la protección legal de estas áreas no garantiza su efectividad. Es importante identificar las actividades que podrían beneficiar o amenazar las ANP para diseñar estrategias de conservación específicas. Los objetivos de este trabajo fueron a) analizar la fragmentación de las áreas naturales protegidas en México para evaluar su vulnerabilidad y b) identificar las amenazas a las áreas naturales protegidas altamente vulnerables, de acuerdo con sus características físicas y socioeconómicas. Utilizamos los polígonos de las ANP terrestres del país. Para obtener las métricas relacionadas con la fragmentación se utilizó la información de cobertura de suelo del sistema MAD MEX (Monitoring Activity Data for the Mexican REDD+ program) a partir de imágenes Landsat TM y ETM+ libres de nubes con una resolución de 30m. A partir de un análisis discriminante obtuvimos 3 grupos de ANP los cuales fueron clasificados como: 1) ANP de baja vulnerabilidad, 2) ANP de media vulnerabilidad, 3) ANP de alta vulnerabilidad. Finalmente se realizó una caracterización utilizando 9 variables socioeconómicas. Las ANP clasificadas como altamente vulnerables tienen mayor presencia de actividades que ya han sido reportadas como amenaza y causantes de la fragmentación, contaminación y sobreexplotación de los recursos naturales. Este análisis integral provee una caracterización de las amenazas que enfrenta cada una de las ANP terrestres del país, de manera que esta información sea base para la propuesta de estrategias de conservación que incluyan los factores social, económico y ambiental.

**Palabras clave:** Áreas Naturales Protegidas, amenazas, estrategias de conservación, fragmentación de hábitat, vulnerabilidad.

## **Abstract**

Habitat fragmentation is one of the main threats for the biodiversity conservation, which has been caused by the increase and expansion of diverse human activities. Due to the rising environmental crisis, the decree for Natural Protected Areas (NPA) has become a global tool with the objective of safekeeping different ecosystems, however, the legal protection of these sites don't guarantee their conservation. It's important to identify the activities that could benefit or threat the NPA for an improvement in the conservation strategies in Mexico. The objectives of this investigation were a) analyze the NPA fragmentation in Mexico to assess its vulnerability, b) identify threats to the NPA with high vulnerability, according to its socioeconomic characteristics as well as its physical ones. We used the terrestrial NPA polygons of the country. To obtain the metrics related to fragmentation the information system of ground cover MAD MEX (Monitoring Activity Data, for the Mexican REDD+ program) was used from Landsat TM and ETM+ cloud free with 30 meters resolution. From a discriminant analysis we obtained 3 groups of NPA which then were classified as 1) low vulnerability NPA, 2) medium vulnerability NPA, and 3) high vulnerability NPA. Finally, a characterization was carried out using 9 socioeconomic variables. The NPA classified as high vulnerability had a major presence in activities that already been reported as threats and causes of fragmentation, contamination, and overexploitation of natural resources. Hence this analyze provides a characterization of threats that every one of the terrestrial NPA face, so that this information be the base for the proposal conservation strategies that includes social factor, economic and environmental.

**Keywords:** Natural Protected Areas, threats, conservation strategies, habitat fragmentation, vulnerability.

## **Contenido**

Resumen	4
Abstract	5
Lista de figuras	7
Lista de Cuadros	8
Introducción general	9
Antecedentes	11
Justificación	13
Objetivos	14
Materiales y método	15
Zona de estudio	15
Análisis de fragmentación	15
Caracterización socioeconómica	17
Resultados (Artículo)	19
Discusión general	50
Conclusión general	53
Literatura citada	54

## **Lista de figuras**

**Figura 1.** Valores de correlación entre las métricas de fragmentación de las Áreas Naturales Protegidas de México.

**Figura 2.** Distribución espacial de las Áreas Naturales Protegidas por nivel de vulnerabilidad.

**Figura 3.** Valor promedio de cada variable socioeconómica, para el grupo de ANP de baja vulnerabilidad (1) y el de ANP de alta vulnerabilidad (3).

## **Lista de Cuadros**

**Cuadro 1.** Valores de índice de fragmentación

**Cuadro 2.** Métricas de fragmentación que difieren significativamente entre 3 grupos de Áreas Naturales Protegidas en México, de acuerdo con un análisis de discriminantes.

**Cuadro 3.** Valor promedio de las métricas relacionadas con la fragmentación para cada grupo de Áreas Naturales Protegidas en México, clasificadas con baja vulnerabilidad (grupo 1), media vulnerabilidad (grupo 2), y alta vulnerabilidad (grupo 3).

## Introducción general

El impacto de las actividades humanas en el ambiente es cada vez más perceptible (Mackay 2015, Wagler 2018). En el año 2000 Paul Crutzen y Eugene Stoermer propusieron el comienzo de la era del antropoceno (la era humana), basados en los impactos de las actividades humanas en la tierra y la atmósfera (Crutzen y Stoermer 2000). Esta era está caracterizada por la sobreexplotación de los recursos naturales, la transformación de la tierra, la introducción de especies, la alteración de los ciclos de nutrientes y energía, y la liberación de grandes cantidades de CO<sup>2</sup> a la atmósfera (Polaina y González-Suárez 2018, Wagler 2018).

Actualmente la fragmentación del hábitat se ha reconocido como una de las principales amenazas para la conservación de la biodiversidad, este es un proceso de transformación, donde un hábitat continuo es dividido, resultado de la destrucción de los ecosistemas forestales, el cambio de uso de suelo, la sobreexplotación de los recursos naturales, la creación de infraestructura vial y el incremento de la población (Fahrig 2003, Siek *et al.* 2011, Bregman 2014, Taubert *et al.* 2018, McCarthy *et al.* 2021).

Ante la actual crisis ambiental, las Áreas Naturales Protegidas (ANP) o Áreas Protegidas (AP) son una de las principales herramientas de conservación a nivel mundial (dos Santos Ribas *et al.* 2020, Rahman e Islam 2020, Powlen *et al.* 2021, Vimal *et al.* 2021). A través del Convenio sobre Diversidad Biológica se establecieron las metas Aichi con el objetivo de detener la crisis mundial y aumentar los esfuerzos de conservación, se planteó alcanzar la protección del 17% del área terrestre y del 10% de los océanos a nivel mundial a través del decreto de las ANP para el año 2020 (CDB 2010). Aunque se logró un progreso en la expansión de la cobertura de ANP, no se alcanzó la meta propuesta, hasta junio 2022 se tienen registradas 253,368 áreas terrestres protegidas y 17,783 áreas marinas protegidas, que representan el 15.79% y el 8.09%, respectivamente (United Nations Environment Programme–World Conservation Monitoring Centre) (UNEP-WCMC, 2022).

Las ANP se han considerado cruciales para salvaguardar la integridad del hábitat, la diversidad de especies, mantener el suministro de agua, proteger áreas con alto valor

ecológico y cultural frente a los impactos humanos, establecer seguridad alimentaria y mejorar la calidad de vida de las comunidades que las habitan (Islam *et al.* 2019, Islam *et al.* 2019, Yang *et al.* 2019, dos Santos Ribas *et al.* 2020, Rahman e Islam 2020). La eficacia de las ANP se ha dado por hecho una vez establecidas (dos Santos Ribas *et al.* 2020), sin embargo, la pérdida de biodiversidad sigue aumentando, por lo que la efectividad de las ANP ha sido tema de investigación en los últimos años (Gaveau *et al.* 2009, Barber *et al.* 2012, Yang *et al.* 2019, Rahman e Islam 2020).

## Antecedentes

Mas (2005) comparó las características ambientales dentro y fuera de 118 ANP y encontró que las áreas declaradas como protegidas generalmente presentan un mayor grado de conservación, específicamente en la reserva de la biosfera Calakmul encontró que los principales factores que influyeron en la deforestación fueron el tipo de suelo y la distancia a los asentamientos y carreteras. Figueroa y Sánchez-Cordero (2008) analizaron el cambio de uso de suelo del año 1993 al 2020 para 69 ANP, el 96% mostró un cambio en el uso y la cobertura de suelo, generaron un índice de efectividad, encontrando que 37 ANP son efectivas, 16 débilmente efectivas y 16 no efectivas. Se atribuyó la conservación de algunos monumentos naturales como Bonampak, Yaxchilán y el Nevado de Colima, principalmente al aislamiento geográfico, por otro lado, la conservación de las reservas de la biosfera se relaciona con que son la categoría más restrictiva en el sistema de ANP y las que reciben mayor apoyo económico. En otro estudio realizado en 18 ANP en el cinturón volcánico transmexicano, se analizó el cambio en la cobertura del año 2002 al 2014 y la tasa de deforestación para obtener su efectividad, 3 ANP fueron efectivas, 11 débilmente efectivas y 4 no efectivas. En este caso los autores mencionan que las principales causas de la deforestación pueden ser las acciones políticas, socioeconómicas, actividades ganaderas, agrícolas, la administración inadecuada de la tierra y la expansión urbana, las cuales están relacionadas con la pobreza, la desigualdad, la probabilidad de cambio de uso de suelo y la cercanía a las ciudades (Aguilar-Tomasini *et al.* 2020).

Figueroa y colaboradores (2009) realizaron un diagnóstico general de los factores socioeconómicos que predominan en 17 reservas de la biosfera como variables independientes, asociados al cambio de uso y cobertura de suelo, encontraron que, aunque la mayoría de las reservas de la biosfera son capaces de contener el cambio de uso de suelo, otras requieren mayor atención sobre los factores socioeconómicos, ya que estos explicaron el 87% del cambio de cobertura, ya que, a pesar de la aparente baja presión demográfica, existe una dependencia directa de los recursos naturales por parte de las comunidades con alto nivel de marginación. Las tasas de cambio aumentaron en las zonas

transformadas para agricultura y ganadería, con bajo porcentaje de población indígena y alta densidad de carreteras.

De la Rosa-Velázquez y colaboradores (2017) analizaron la efectividad de las ANP considerando el cambio de uso de suelo y los principales factores que inducen al cambio, de 1992 a 2014, en la Reserva de la biosfera pantanos de Centla, encontrando que la cobertura de vegetación nativa disminuyó, en contraste con el aumento de tierras agrícolas y ganaderas dentro y fuera del ANP. En otro estudio en la Península de Yucatán se analizaron las interacciones de las ANP con ejidos y sitios de propiedad privada, indicando que los impactos varían según el régimen de tenencia de la tierra, en promedio las ANP en zonas ejidales reducen hasta en un 7% la probabilidad de pérdida de bosques, indicando que las zonas ejidales pueden ser una herramienta para promover la conservación (Miteva *et al.* 2019).

Godínez-Gómez y colaboradores (2020) realizaron un análisis integral de cuatro amenazas: la distribución espacial de la pérdida de bosque, la densidad humana, la incidencia de incendios y las actividades mineras en cuatro ANP del sureste de México. Encontraron que las ANP son afectadas de manera diferente por cada amenaza, de manera que un análisis no integrado podría dar como resultado propuestas sesgadas.

## **Justificación**

Debido a la expansión de las actividades humanas, la conservación y que la eficacia de las ANP ha sido cuestionada. Los estudios realizados han evaluado la efectividad de las ANP a nivel local y regional basados en comparaciones de tasas de deforestación y cambios de uso de suelo, sin embargo, existen diferentes factores que amenazan la integridad y conservación de las ANP que no son incluidos en estos análisis, ante la falta de información a nivel nacional, nuestro estudio pretende obtener un análisis integral de las variables económicas y sociales que podrían estar amenazando o favoreciendo a las ANP terrestres del país, esta caracterización nos dará información general con el fin de proponer estrategias de conservación que aborden los principales problemas que enfrentan las ANP.

## **Objetivos**

Analizar las áreas naturales protegidas en México con base en métricas de fragmentación del paisaje, para evaluar su vulnerabilidad.

Analizar las áreas naturales protegidas de alta y de baja vulnerabilidad, a través de sus características físicas y socioeconómicas, para identificar las amenazas a cada una.

## **Materiales y método**

### Zona de estudio

México se localiza en el continente americano, cuenta con una extensión aproximada de 1,964,375 km<sup>2</sup>, se ubica en el hemisferio Norte entre las latitudes 14° 32'27" y 32° 43'06" y las longitudes 86° 42'36" y 118° 27'24", colinda al norte con Estados Unidos de América, y con Guatemala y Belice al sureste; con el Golfo de México y el Mar Caribe al este, y el Océano Pacífico al oeste. Es uno de los cinco países biológicamente más ricos, en el aspecto de la vegetación es de los más diversos a nivel global, predominan el bosque templado, selva alta perennifolia, selva baja caducifolia y matorral (CONABIO 2019). Sin embargo, Global Forest Watch reportó una pérdida de 3.99 Mha de cobertura arbórea del año 2001 al 2019, lo que equivale al 7.5% de la cobertura nacional (GFW 2019).

Hasta el año 2020 en el país se habían decretado 182 Áreas Naturales Protegidas federales agrupadas en seis categorías de manejo. Los Parques Nacionales (PN) son la categoría con mayor número de ANP (67 áreas decretadas), seguidos por las Reservas de la Biosfera (RB, 44), las Áreas de Protección de Flora y Fauna (APFF, 40), los Santuarios (S, 18), las Áreas de Protección de Recursos Naturales (APRN, 8) y los Monumentos Naturales (MN, 5).

### Análisis de fragmentación

Para el análisis de la fragmentación en las Áreas Naturales Protegidas terrestres de México se incluyeron aquellas con superficie  $\geq 1\ 000$  hectáreas, ya que es el área mínima para conservar ecosistemas de acuerdo con The World Conservation Union (1:250000, Figueroa y Sánchez-Cordero 2008). Se utilizó la información del sistema MAD-Mex (Monitoring Activity Data for the Mexican REDD+ program) desarrollado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) que proporciona información de la cobertura de suelo en México a partir de imágenes Landsat TM y ETM+ libres de nubes, con resolución de 30 m, bajo un esquema de clasificación automática de cobertura inicial basada en las series de Uso de Suelo y Vegetación generadas por INEGI. Se utilizó el ráster

con 17 clases para analizar la vegetación dentro de las Áreas Naturales Protegidas más una zona buffer de 10 km alrededor de cada una, ya que se considera que a esta distancia es más probable que las condiciones fuera del polígono decretado como protegido sean comparables con las internas (Mas 2005, De la Rosa-Velázquez *et al.* 2017, Godínez-Gómez *et al.* 2020).

Se calculó el índice de fragmentación del hábitat (F) en cada ANP, considerando el polígono decretado más el área buffer, a través de la relación del área de cobertura no antrópica y el área total:

$$F = \text{área de cobertura no antrópica (ha)} / \text{área total (ha)}$$

Los valores obtenidos pueden ser de 0 a 1, agrupados en 4 rangos (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Valores del índice de fragmentación.

Rangos de F	Grado de fragmentación
1	Sin fragmentación
0.7-0.99	Fragmentación moderada
0.5-0.69	Altamente fragmentado
< 0.49	Aislado

En cada ANP se obtuvo el número de parches de cobertura no antrópica y el índice de forma media ponderada, que es igual a 1 cuando los parches son circulares y aumenta con la irregularidad, utilizando la extensión Patch Analyst (Rempel *et al.* 2008) del software ArcGis v.10.4.1. Se calculó la distancia promedio entre los parches y el índice del vecino más cercano, si el valor del índice es menor que 1 el patrón es agrupado, si es mayor que 1 es disperso.

Se calculó la continuidad espacial a través del índice de Vogelmann:

$$FCI = \ln (\sum A / \sum P)$$

Donde:

FCI= Índice de continuidad de Vogelmann

$\sum A$ = área total de parches de vegetación no antrópica (m<sup>2</sup>)

$\sum P$ = perímetro total de parches de vegetación no antrópica (m)

Los valores altos implican una mayor continuidad del hábitat y valores bajos una mayor fragmentación y discontinuidad de los parches de cobertura no antrópica.

Para analizar si las métricas de la fragmentación estaban correlacionadas entre sí, se realizó una prueba de Pearson. Se hizo un análisis de conglomerados con el método de Ward, considerando la distancia Euclidiana para agrupar las ÁNP de acuerdo con el grado de fragmentación, número de parches, índice de forma media ponderada, distancia promedio e índice del vecino más cercano. Una vez que se formaron los grupos de ANP se hizo una comparación de las métricas de fragmentación a través de un análisis de discriminantes. Considerando las métricas que resultaron importantes para discriminar entre los grupos, se identificaron como: 1) ANP de baja vulnerabilidad, 2) ANP de media vulnerabilidad, 3) ANP de alta vulnerabilidad.

#### Caracterización socioeconómica

Se realizó la caracterización de las áreas naturales protegidas de alta vulnerabilidad (grupo 3) y las de baja vulnerabilidad (grupo 1). Las variables incluidas en este análisis son las que, de acuerdo con la literatura, pueden limitar la efectividad del ANP, se enlistan a continuación, con una breve descripción y la fuente de cada una:

*Densidad de población humana*: obtenida a partir del censo de población y vivienda 2020 (INEGI).

*Distancia a la zona metropolitana más cercana o porcentaje del polígono que es considerado zona metropolitana:* se incluyen ciudades con 100 mil o más habitantes de acuerdo con el Consejo Nacional de Población (CONAPO 2015).

*Grado de marginación:* es un parámetro evaluado a escala municipal, que considera aspectos de educación, vivienda, distribución de población e ingresos mensuales. Se expresa en cinco categorías: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto (CONAPO 2015).

*Porcentaje de población indígena:* es un factor que puede favorecer la conservación, por su nivel de organización y apropiación cultural (Pisanty *et al.* 2016, De la Rosa-Velázquez *et al.* 2017, INEGI 2020).

*Porcentaje de tierra de tenencia ejidal y comunal:* obtenido a través del Registro Agrario Nacional a partir de un archivo vectorial de polígonos ejidales o comunales (RAN 2021).

*Densidad de carreteras:* se obtuvo a partir de la Red Nacional de Caminos, escala 1:50000 (INEGI 2020).

*Presencia de actividad minera:* de acuerdo con la información del servicio geológico mexicano, se obtuvo el número de minas en exploración, desarrollo y/o explotación.

*Uso potencial agrícola:* Es el porcentaje de área apto para uso agrícola considerando la profundidad del suelo, la pendiente del terreno, obstrucción superficial, drenaje interno, inundación, estabilidad y la erosión (INEGI 2012).

*Uso potencial pecuario:* Es el porcentaje de área apto para uso pecuario considerando la profundidad del suelo, la pendiente del terreno, obstrucción superficial, drenaje interno, inundación, estabilidad y la erosión (INEGI 2012).

*Uso potencial forestal:* Es el porcentaje de área apto para uso forestal considerando el terreno con posibilidades de explotación racional de recursos forestales (INEGI 2012).

*Número de zonas turísticas:* considerando la información de la Secretaría de Turismo, se incluyó debido a que su presencia provoca un incremento en la infraestructura (SECTUR 2012).

## Resultados (Artículo)

### Amenazas a la conservación de las áreas naturales protegidas en México

García-Flores D. G., Monroy-Vilchis O., Endara-Agramont A. R., Franco-Maass S., Zarco-González M.M.

#### Resumen

Las Áreas Naturales Protegidas (ANP) son una herramienta importante para la conservación de la biodiversidad, sin embargo, su decreto legal no garantiza que estén conservadas debido a la expansión acelerada de las actividades humanas. Actualmente México cuenta con 184 ANP decretadas que abarcan los diferentes ecosistemas del país. En este estudio se analizó la fragmentación de 126 ANP terrestres a través de la información de cobertura de suelo del sistema MAD-Mex (Monitoring Activity Data for the Mexican REDD+ program). Mediante un análisis de conglomerados basados en las métricas de fragmentación se formaron 3 grupos de ANP, posteriormente se realizó un análisis discriminante para definirlos como: 1) ANP de baja vulnerabilidad, 2) ANP de media vulnerabilidad, 3) ANP de alta vulnerabilidad. Finalmente se realizó una caracterización de los grupos 1 y 3 con base en 9 variables socioeconómicas. Las ANP más fragmentadas y por lo tanto más vulnerables se ubican principalmente en el centro del país, tienen mayor presencia de actividades que ya han sido reportadas como amenaza y causantes de la fragmentación, contaminación y sobreexplotación de los recursos naturales. Este análisis provee una caracterización de las amenazas que enfrenta cada una de las ANP terrestres del país. Esta información es fundamental para la mejora de los planes de manejo y las estrategias de conservación de las ANP de acuerdo a las amenazas específicas que enfrentan.

**Palabras clave:** Áreas Naturales Protegidas, fragmentación de hábitat, amenazas, vulnerabilidad, estrategias de conservación.

## **Abstract**

Natural Protected Areas have become a very important tool for the conservation of biodiversity, however its legal decree does not guarantee their conservation, as consequence of the accelerate expansion of human activities. At present day Mexico has declared 184 NPA (Natural Protected Areas) that encompass the different ecosystems in the country. The present study analyze the fragmentation of 126 terrestrial NPA through the soil coverage information from system MAD-Mex (Monitoring Activity Data from de Mexican REDD+ program) through conglomerate analysis based on the metrics for fragmentation 3 NPA groups formed, subsequently a discrimination analysis was carried out to define the groups as: 1) NPA of low vulnerability, 2) NPA of medium vulnerability, 3) NPA of high vulnerability. Finally a group characterization was carried out for group 1 and 3, based on 9 socioeconomic variables. The NPA with more fragmentation thus more vulnerable are located in the center of the country, have more presence of human activities, that already been reported as threats and fragmentation causes, pollution and over exploit of natural resources. This study provides a characterization of the threats that face every one of the terrestrial NPA in the country.

**Keywords:** Natural Protected Areas; threats; conservation strategies; habitat fragmentation; vulnerability.

## Introducción

Las Áreas Naturales Protegidas (ANP) han sido decretadas alrededor del mundo con el objetivo de conservar y garantizar una representación adecuada de la biodiversidad frente a los crecientes impactos humanos, entendiendo la biodiversidad como la variedad de genes, especies y ecosistemas que constituyen la vida en la Tierra (Figuroa y Sánchez-Cordero 2008, Rands *et al.* 2010, De Alban *et al.* 2021).

En México desde 1917, con el decreto del Desierto de los leones como ANP, se emprendió un esfuerzo para conservar la biodiversidad (CONANP 2020). Hasta el año 2020 se habían decretado 182 ANP federales en los principales ecosistemas terrestres y marinos (CONANP 2020). Sin embargo, el decreto de las ANP no garantiza su protección, ya que enfrentan presiones debido a las actividades socioeconómicas que se realizan dentro y fuera de sus límites (Barnes *et al.* 2017, De la Rosa-Velázquez *et al.* 2017, Aguilar-Tomasini *et al.* 2020). La fragmentación es una de las principales amenazas a nivel mundial, este proceso transforma el hábitat continuo en una serie de parches pequeños y aislados, reduciendo su capacidad para mantener poblaciones silvestres a largo plazo (Fahrig 2003, Figuroa 2009, Siek *et al.* 2011, Bregman 2014, Taubert *et al.* 2018).

Algunas características del paisaje se relacionan con el éxito de las ANP, entre ellas, la ubicación, pendiente y el tipo de suelo, que pueden limitar el acceso y la explotación de los recursos, al menos a mediano plazo (Figuroa y Sánchez-Cordero 2008, Figuroa *et al.* 2009, Aguilar-Tomasini *et al.* 2020). Aunque a largo plazo, debido al incremento de la población humana y el desarrollo de infraestructura, las ANP van siendo rodeadas de ciudades y carreteras (Siek *et al.* 2011, Bowker *et al.* 2017, Rodríguez-Rodríguez y Martínez-Vega 2019, Aguilar-Tomasini *et al.* 2020). Otra amenaza importante son las concesiones mineras; a pesar de las restricciones establecidas por la LGEEPA (Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente) en algunas categorías de ANP, en la práctica no se cumplen, provocando un alto impacto ambiental (Ament y Cumming, 2016, De la Rosa-Velázquez *et al.* 2017, Pisanty *et al.* 2017).

Algunos aspectos sociales también influyen en la efectividad de las ANP, ya que, en muchos casos, son decretadas en zonas ejidales, comunales o privadas, que pertenecen a las personas que las habitan, causando problemas en la administración y conflictos por su uso y manejo (Miteva *et al.* 2019). Existe un traslape geográfico de las ANP y las zonas con mayor marginación y desigualdad, la falta de recursos económicos y oportunidades provoca diferentes dinámicas de las comunidades que viven en ellas, propiciando una dependencia de la explotación de los recursos naturales, induciendo procesos de cambio de paisajes naturales a sitios para la agricultura, ganadería u otras actividades primarias que les proporcionan sustento (Pisanty *et al.* 2016, Rosa-Velázquez *et al.* 2017, CONANP 2020)

En México se han realizado algunos estudios que evalúan la efectividad de las ANP, a nivel local (Mas 2005, De la Rosa-Velázquez *et al.* 2017) y regional (Figueroa y Sánchez-Cordero 2008, Figueroa *et al.* 2009, Miteva *et al.* 2019, Aguilar-Tomasini *et al.* 2020), los cuales se basan en comparaciones de las tasas de deforestación entre zonas protegidas y no protegidas, y en el cambio de uso de suelo, sin embargo, hasta ahora no se ha realizado una evaluación integral que incluya el impacto de factores sociales y económicos sobre las ANP. Debido a esta falta de información, los objetivos de este estudio fueron a) Analizar la fragmentación de las áreas naturales protegidas en México para evaluar su vulnerabilidad e b) Identificar las amenazas a las áreas naturales protegidas de alta vulnerabilidad, de acuerdo con sus características físicas y socioeconómicas.

## **Materiales y método**

### Zona de estudio

México se localiza en el continente americano, cuenta con una extensión aproximada de 1,964,375 km<sup>2</sup>, se ubica en el hemisferio Norte entre las latitudes 14° 32'27" y 32° 43'06" y las longitudes 86° 42'36" y 118° 27'24", colinda al norte con Estados Unidos de América, y con Guatemala y Belice al sureste; con el Golfo de México y el Mar Caribe al este, y el Océano Pacífico al oeste. Es uno de los cinco países biológicamente más ricos, en el aspecto de la vegetación es de los más diversos a nivel global, predominan el bosque templado, selva alta perennifolia, selva baja caducifolia y matorral (CONABIO 2019). Sin embargo,

Global Forest Watch reportó una pérdida de 3.99 Mha de cobertura arbórea del año 2001 al 2019, lo que equivale al 7.5% de la cobertura nacional (GFW 2019).

Hasta el año 2020 en el país se habían decretado 182 Áreas Naturales Protegidas federales agrupadas en seis categorías de manejo. Los Parques Nacionales (PN) son la categoría con mayor número de ANP (67 áreas decretadas), seguidos por las Reservas de la Biosfera (RB, 44), las Áreas de Protección de Flora y Fauna (APFF, 40), los Santuarios (S, 18), las Áreas de Protección de Recursos Naturales (APRN, 8) y los Monumentos Naturales (MN, 5).

### Análisis de fragmentación

Para el análisis de la fragmentación en las Áreas Naturales Protegidas terrestres de México se incluyeron aquellas con superficie  $\geq 1\ 000$  hectáreas, ya que es el área mínima para conservar ecosistemas de acuerdo con The World Conservation Union (1:250000, Figueroa y Sánchez-Cordero 2008). Se utilizó la información del sistema MAD-Mex (Monitoring Activity Data for the Mexican REDD+ program) desarrollado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) que proporciona información de la cobertura de suelo en México a partir de imágenes Landsat TM y ETM+ libres de nubes, con resolución de 30 m, bajo un esquema de clasificación automática de cobertura inicial basada en las series de Uso de Suelo y Vegetación generadas por INEGI. Se utilizó el ráster con 17 clases para analizar la vegetación dentro de las Áreas Naturales Protegidas más una zona buffer de 10 km alrededor de cada una, ya que se considera que a esta distancia es más probable que las condiciones fuera del polígono decretado como protegido sean comparables con las internas (Mas 2005, De la Rosa-Velázquez *et al.* 2017, Godínez-Gómez *et al.* 2020).

Se calculó el índice de fragmentación del hábitat (F) en cada ANP, considerando el polígono decretado más el área buffer, a través de la relación del área de cobertura no antrópica y el área total:

$F = \text{área de cobertura no antrópica (ha)} / \text{área total (ha)}$

Los valores obtenidos pueden ser de 0 a 1, agrupados en 4 rangos (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Valores del índice de fragmentación.

Rangos de F	Grado de fragmentación
1	Sin fragmentación
0.7-0.99	Fragmentación moderada
0.5-0.69	Altamente fragmentado
< 0.49	Aislado

En cada ANP se obtuvo el número de parches de cobertura no antrópica y el índice de forma media ponderada, que es igual a 1 cuando los parches son circulares y aumenta con la irregularidad, utilizando la extensión Patch Analyst (Rempel *et al.* 2008) del software ArcGis v.10.4.1. Se calculó la distancia promedio entre los parches y el índice del vecino más cercano, si el valor del índice es menor que 1 el patrón es agrupado, si es mayor que 1 es disperso.

Se calculó la continuidad espacial a través del índice de Vogelmann:

$$FCI = \ln (\sum A / \sum P)$$

Donde:

FCI= Índice de continuidad de Vogelmann

$\sum A$ = área total de parches de vegetación no antrópica (m<sup>2</sup>)

$\sum P$ = perímetro total de parches de vegetación no antrópica (m)

Los valores altos implican una mayor continuidad del hábitat y valores bajos una mayor fragmentación y discontinuidad de los parches de cobertura no antrópica.

Para analizar si las métricas de la fragmentación estaban correlacionadas entre sí, se realizó una prueba de Pearson. Se hizo un análisis de conglomerados con el método de Ward, considerando la distancia Euclidiana para agrupar las ÁNP de acuerdo con el grado de fragmentación, número de parches, índice de forma media ponderada, distancia promedio e índice del vecino más cercano. Una vez que se formaron los grupos de ANP se hizo una comparación de las métricas de fragmentación a través de un análisis de discriminantes. Considerando las métricas que resultaron importantes para discriminar entre los grupos, se identificaron como: 1) ANP de baja vulnerabilidad, 2) ANP de media vulnerabilidad, 3) ANP de alta vulnerabilidad.

### Caracterización socioeconómica

Se realizó la caracterización de las áreas naturales protegidas de alta vulnerabilidad (grupo 3) y las de baja vulnerabilidad (grupo 1). Las variables incluidas en este análisis son las que, de acuerdo con la literatura, pueden limitar la efectividad del ANP, se enlistan a continuación, con una breve descripción y la fuente de cada una:

*Densidad de población humana:* obtenida a partir del censo de población y vivienda 2020 (INEGI).

*Distancia a la zona metropolitana más cercana o porcentaje del polígono que es considerado zona metropolitana:* se incluyen ciudades con 100 mil o más habitantes de acuerdo con el Consejo Nacional de Población (CONAPO 2015).

*Grado de marginación:* es un parámetro evaluado a escala municipal, que considera aspectos de educación, vivienda, distribución de población e ingresos mensuales. Se expresa en cinco categorías: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto (CONAPO 2015).

*Porcentaje de población indígena:* es un factor que puede favorecer la conservación, por su nivel de organización y apropiación cultural (Pisanty *et al.* 2016, De la Rosa-Velázquez *et al.* 2017, INEGI 2020).

*Porcentaje de tierra de tenencia ejidal y comunal:* obtenido a través del Registro Agrario Nacional a partir de un archivo vectorial de polígonos ejidales o comunales (RAN 2021).

*Densidad de carreteras:* se obtuvo a partir de la Red Nacional de Caminos, escala 1:50000 (INEGI 2020).

*Presencia de actividad minera:* de acuerdo con la información del servicio geológico mexicano, se obtuvo el número de minas en exploración, desarrollo y/o explotación.

*Uso potencial agrícola:* Es el porcentaje de área apto para uso agrícola considerando la profundidad del suelo, la pendiente del terreno, obstrucción superficial, drenaje interno, inundación, estabilidad y la erosión (INEGI 2012).

*Uso potencial pecuario:* Es el porcentaje de área apto para uso pecuario considerando la profundidad del suelo, la pendiente del terreno, obstrucción superficial, drenaje interno, inundación, estabilidad y la erosión (INEGI 2012).

*Uso potencial forestal:* Es el porcentaje de área apto para uso forestal considerando el terreno con posibilidades de explotación racional de recursos forestales (INEGI 2012).

*Número de zonas turísticas:* considerando la información de la Secretaria de Turismo, se incluyó debido a que su presencia provoca un incremento en la infraestructura (SECTUR 2012).

## **Resultados**

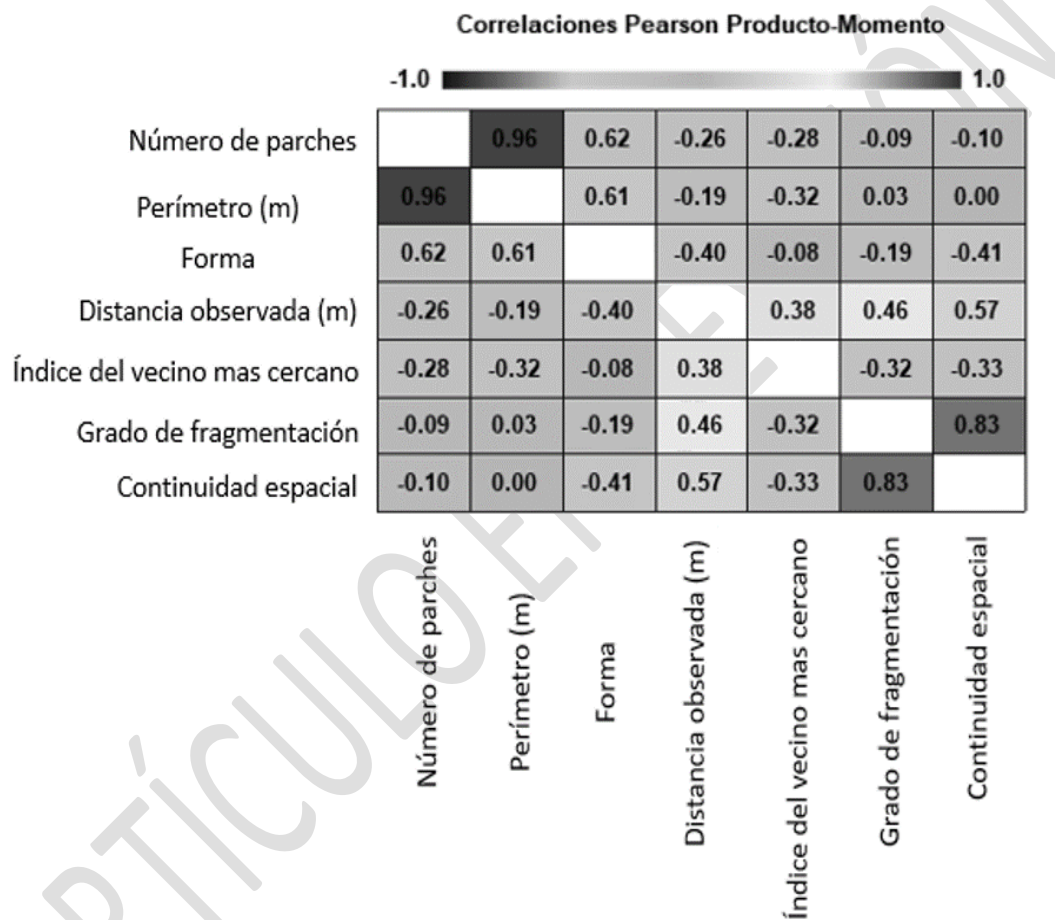
Se analizaron 126 Áreas Naturales Protegidas: 38 Reservas de la Biosfera, 37 Parques Nacionales, 5 Monumentos Naturales, 7 Áreas de Protección de Recursos Naturales, 38 Áreas de Protección de Flora y Fauna y 1 Santuario.

### Análisis de fragmentación

Los valores de fragmentación indicaron que 16 ANP se encuentran aisladas, 23 altamente fragmentadas y 87 con fragmentación moderada, siendo el PN Cerro de La Estrella la ANP más fragmentada. El APFF Otoch Ma'ax Yetel Kooh, fue la única ANP que tuvo un solo parche continuo de vegetación, en contraste, la APRN Cuenca Alimentadora del Distrito Nacional de Riego 043 Estado de Nayarit y la RB Tehuacán-Cuicatlán tuvieron el mayor número de parches con 17,175 y 9,066, respectivamente. Los datos de distancia media observada

indican que la APFF Uaymil tiene el valor más alto, con 1,994.05 metros entre parches. De acuerdo con el índice del vecino más cercano, los parches dentro de las ANP exhiben un patrón de agrupación en todos los casos.

El índice de continuidad y el perímetro de los parches estuvieron correlacionados con otras métricas, por lo que fueron excluidos del análisis (Figura 1).



**Figura 1.** Valores de correlación entre las métricas de fragmentación de las Áreas Naturales Protegidas de México.

De acuerdo con el análisis de conglomerados dentro del grupo 1 se clasificaron 26 ANP, 49 dentro del grupo 2 y 50 en el grupo 3. Los factores discriminantes obtenidos fueron significativos con un nivel de confianza del 95.0%. El primer factor explicó el 78% de los casos, las métricas más importantes fueron la distancia observada y el grado de

fragmentación. El segundo factor explicó el 21% de los casos y en este las métricas más importantes fueron el índice de vecino más cercano, la distancia observada y el número de parches (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Métricas de fragmentación que difieren significativamente entre 3 grupos de Áreas Naturales Protegidas en México, de acuerdo con un análisis de discriminantes.

Métricas de fragmentación	Factores discriminantes	
	1	2
Número de parches	-0.126177	0.200401
Índice de forma media ponderada	-0.280587	-0.0886781
Distancia observada (m)	0.740252	0.482703
Índice del vecino más cercano	-0.401782	0.602207
Grado de fragmentación	0.596949	-0.401242

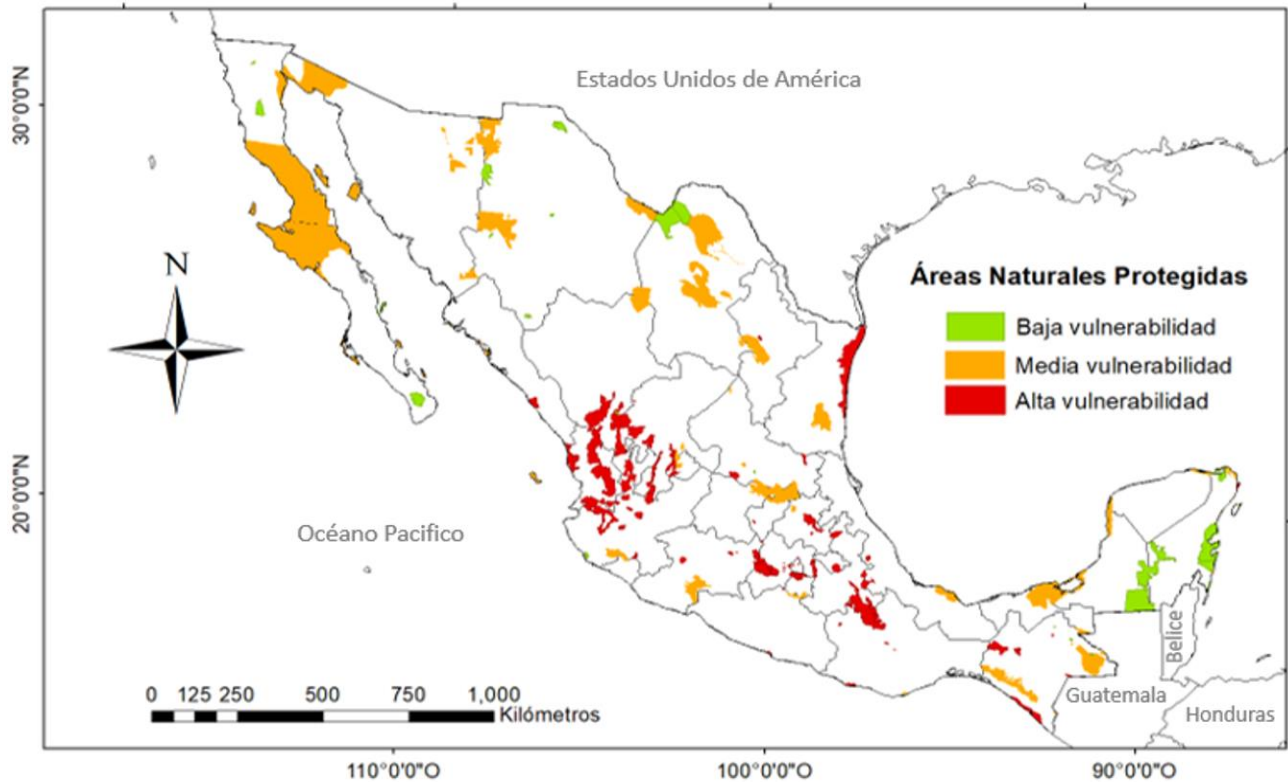
El grupo 3 obtuvo los valores que indicaban mayor fragmentación respecto al número de parches, índice de forma media ponderada y grado de fragmentación, por lo que se consideró con alta vulnerabilidad, el grupo 1, obtuvo valores que indicaban menor fragmentación, de modo que se consideró con baja vulnerabilidad, mientras que el grupo 2 presentó vulnerabilidad media (Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Valor promedio de las métricas relacionadas con la fragmentación para cada grupo de Áreas Naturales Protegidas en México, clasificadas con baja vulnerabilidad (grupo 1), media vulnerabilidad (grupo 2), y alta vulnerabilidad (grupo 3).

<b>Métricas de fragmentación / grupos</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Número de parches	100.885	1325.1	1558.12
Índice de forma media ponderada	5.36816	13.1654	16.3213
Distancia observada (m)	924.565	373.668	304.617
Índice del vecino más cercano	0.492412	0.298043	0.48087
Grado de fragmentación	0.968832	0.892741	0.556902

ARTÍCULO EN REVISIÓN

Analizando la distribución espacial de cada uno de los grupos de ANP, se observa que la mayoría de las que se consideran de alta vulnerabilidad se ubican hacia el centro del país (Figura 2).



**Figura 2.** Distribución espacial de las Áreas Naturales Protegidas por nivel de vulnerabilidad.

### **Caracterización socioeconómica de las Áreas Naturales Protegidas de alta vulnerabilidad**

En el grupo 3 se clasificaron 50 ANP cuyas características físicas implican que son altamente vulnerables a la fragmentación. Existe actividad minera en 18 de ellas, con un total de 71 sitios: 24 en exploración, 7 en desarrollo y 40 en explotación. En este grupo se encuentran Reservas de la biosfera como la Barranca de Meztitlán (6 sitios), Tehuacán-Cuicatlán (1) y La mariposa monarca (1). En la APRN Cuenca Alimentadora del Distrito Nacional de Riego 043 Estado de Nayarit se ubican 42 sitios de actividad minera.

Se identificaron áreas metropolitanas dentro del polígono de 37 ANP, de hecho, en los siguientes casos el polígono completo se considera área metropolitana: PN Cerro de la

estrella, PN Desierto de los Leones, PN Insurgentes Miguel Hidalgo y Costilla, PN Tepeyac y MN Cerro de la silla. Las 13 ANP restantes están a una distancia promedio de 10.14 km de la zona metropolitana más cercana.

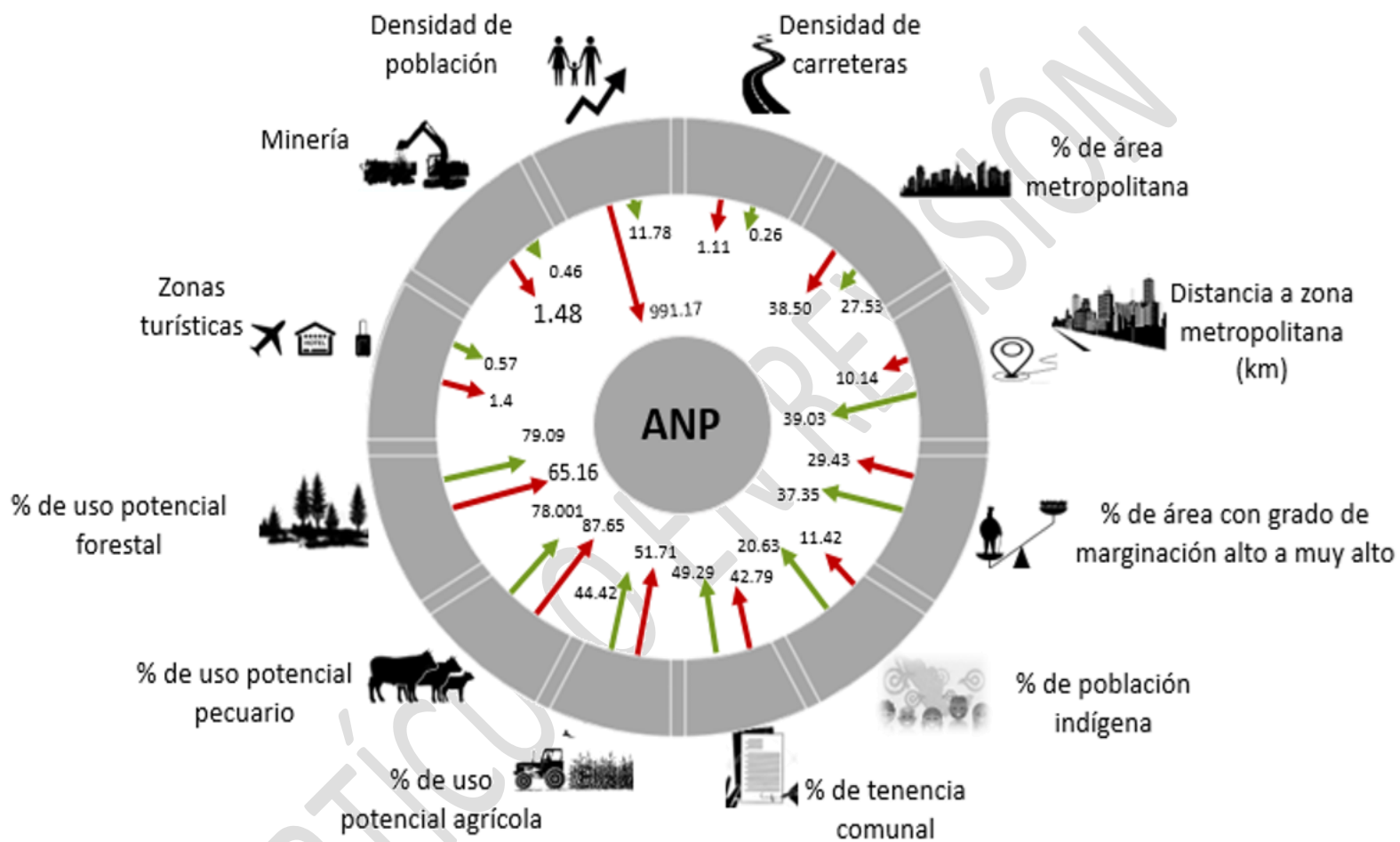
La presencia de población indígena fue mayor al 50% en el MN Yagul (63.2%), APFF Cascada de agua azul (99.11%) y el APFF Boquerón Tonalá (61.8%). En estas zonas el grado de marginación calculado con base en datos de la CONAPO es de alto a muy alto. Se registró la presencia de zonas turísticas en 22 ANP.

### **Caracterización socioeconómica de las ANP de baja vulnerabilidad**

De acuerdo con las características físicas, 26 ANP se pueden considerar de baja vulnerabilidad. En este grupo se encuentran 12 sitios de minería en etapa de exploración distribuidos en 7 ANP, las áreas con mayor presencia fueron el PN Cascada de Bassaseachic y la APFF Ocampo con 4 y 3 sitios, respectivamente.

En el polígono de 12 ANP de este grupo se incluye área considerada como metropolitana, en el caso del PN Sierra de San Pedro Mártir cubre el 100%. Las 14 ANP restantes están a una distancia promedio de 39.03 km de la zona metropolitana más cercana. En este grupo se registró la presencia de zonas turísticas en 7 ANPs, siendo la RB Calakmul el área con el mayor número de destinos con 6 sitios.

De manera general, se observó que las ANP de alta vulnerabilidad tienen mayor densidad de población, de carreteras, porcentaje de área considerada zona metropolitana, o mayor cercanía con dichas zonas, en los casos en los que no están dentro del polígono analizado. El número de sitios de minería y turísticos también fue mayor en este grupo. El porcentaje de área potencial para uso agrícola y pecuario fue mayor en el grupo de ANP de alta vulnerabilidad, aunque cabe destacar que en el grupo de ANP de baja vulnerabilidad ambos porcentajes superaron también el 50%. El porcentaje de población indígena fue mayor en las ANP de baja vulnerabilidad, sin embargo, en estas zonas el grado de marginación alto o muy alto también es mayor (Figura 3).



**Figura 3.** Valor promedio de cada variable socioeconómica, para el grupo de ANP de baja vulnerabilidad (1) y el de ANP de alta vulnerabilidad (3).

## Discusión

En este estudio se incluyeron 126 ANP de México, es decir, el mayor número analizadas hasta ahora. Considerando que es la principal estrategia de conservación en el país, es fundamental que su efectividad se evalúe con precisión, a partir de información reciente e incluyendo factores de presión como las condiciones socioeconómicas de las comunidades ubicadas dentro y alrededor. La pérdida en cantidad o calidad del paisaje es el indicador inmediato de si las ANP están funcionando, por eso fue importante como primer paso agruparlas con base en las métricas de fragmentación, pero, al incluir la caracterización a partir de variables socioeconómicas, obtuvimos un análisis integral que puede ser la base de estrategias específicas en las áreas más vulnerables.

La mayor parte de las ANP más vulnerables se ubican en el Eje Neovolcánico Transversal, como el parque Nacional Cerro de la estrella, fue el ANP con menor área no antrópica respecto al área total, el 100% de su superficie se considera zona metropolitana. La CONABIO publicó en 2014 valores de integridad ecosistémica para algunas de las ANP del país, el rango va de 0 a 1, donde 1 es el mayor valor de integridad, en este parámetro el PN Cerro de la estrella tuvo 0.12. El factor común de presión para las ANP en esta región es el crecimiento de la población y desarrollo de infraestructura, ya que presenta la mayor densidad poblacional del país. El Cerro de la estrella está afectado además por la afluencia de visitantes, ya que es un importante atractivo turístico.

- **Actividad minera en las ANP**

La Comisión Mundial de Áreas Protegidas (WCPA) recomienda que no existan actividades de exploración, ni extracción de recursos naturales en estas áreas. En México, en el año 2021 fue aprobada la reforma al artículo 46 de la LGEEPA quedando prohibido realizar obras y actividades de exploración y extracción minera dentro de las ANP debido al alto impacto ambiental. A pesar de estas restricciones, en este estudio se encontraron 86 sitios de minería distribuidos en 25 ANP.

La APRN Cuenca Alimentadora del Distrito Nacional de Riego 043 Estado de Nayarit, considerada de alta vulnerabilidad, presentó más sitios de actividad minera (42), dedicados a la extracción de plata, oro, hierro, cobre y mercurio. La extracción de estos metales produce altos niveles de desechos tóxicos y con ello graves problemas a la biodiversidad y la salud humana, sobre todo considerando que esta cuenca almacena y distribuye agua a las zonas aledañas, para consumo y actividades económicas (Swenson *et al.* 2011, Armendáriz-Villegas *et al.* 2015, Godínez-Gómez *et al.* 2020, Saldaña-Villanueva *et al.* 2022).

A pesar de clasificarse de baja vulnerabilidad, en el PN Cascada de Bassaseachic se encuentran 4 sitios de minería, para la extracción de oro y plata. En el APFF Ocampo hubo 3 sitios de extracción de plomo y zinc. De manera particular, el plomo es uno de los metales más contaminantes en México, afecta a muchas especies de aves y mamíferos, al estar en contacto con el suelo contaminado, a través de la cadena alimenticia o por el consumo directo de sedimentos (Buekers *et al.* 2009).

Las concesiones mineras en México se otorgan a un ritmo acelerado y comprometen cerca del 25% del territorio (Armendáriz-Villegas *et al.* 2015). Lamentablemente los decretos legales no han sido un impedimento para la presencia de actividad minera en ÁNP, exacerbada por la alta demanda y la participación de empresas canadienses, chinas, estadounidenses, australianas, inglesas y japonesas en los últimos años, que además del impacto negativo inmediato por la extracción, violentan los derechos de las comunidades que viven en los alrededores (Cárdenas 2013). Es posible que el impacto de esta actividad este siendo subestimado debido a la falta de estudios, por ello se requiere que se realicen análisis específicos de las consecuencias en la salud humana, la biodiversidad y de suelo, así como mejoras en la gestión de las concesiones mineras otorgadas (Armendáriz-Villegas *et al.* 2015, Godínez-Gómez *et al.* 2020). Debido a que la actividad minera es altamente impactante en el aspecto ecológico, lo recomendable es evitar llevarla a cabo en áreas protegidas, incluso cancelando las concesiones que actualmente están aprobadas para exploración y desarrollo.

- **Presencia y cercanía de las zonas metropolitanas a las ANP**

Las áreas naturales protegidas han sido decretadas con el objetivo de conservar y proteger la biodiversidad, sin embargo, la urbanización es una de las principales causas de la fragmentación del paisaje, la pérdida de hábitat y el cambio de uso de suelo (Rojas *et al.* 2013, Aguilar-Tomasini *et al.* 2020, Huang *et al.* 2021, Wooster *et al.* 2022). De acuerdo con la CONAPO (2015), existen 418 zonas metropolitanas en el país. En este estudio se encontraron 49 ANP en las que parte del polígono ha sido invadido por alguna zona metropolitana. El PN Cerro de la estrella, el PN Desierto de los Leones, el PN Insurgentes Miguel Hidalgo y Costilla y el PN Tepeyac se consideraron de alta vulnerabilidad, se ubican en la Ciudad de México, la cual cuenta con más de 9 millones de habitantes (INEGI 2020), el 100% del área de estas ANP se ubica dentro de la zona metropolitana. Es posible que la efectividad de estas ANP como herramienta de conservación sea baja, debido a la constante presión que la ciudad ejerce por la expansión descontrolada, la contaminación y la pérdida de conectividad con otras áreas.

En el estudio realizado por Aguilar-Tomasini y colaboradores (2020) las ANP que se encuentran en el Eje Neovolcánico Transversal, tuvieron baja efectividad, lo que puede estar relacionado con la cercanía a las zonas metropolitanas. El grupo de las ANP de alta vulnerabilidad se ubicaron a una distancia promedio de 10.14 km de la zona metropolitana más cercana, a diferencia de las ANP de baja vulnerabilidad, donde se registró una distancia promedio de 39.03 km. Algunos estudios en México evidencian una relación entre el crecimiento económico y el cambio de uso de suelo, en contraste con una baja tasa de deforestación en áreas alejadas de los centros de población (Torres-Rojo y Flores-Xolocotzi 2016).

Para mitigar la presión de las zonas metropolitanas sobre las ANP es importante que sean una prioridad para la futura planeación urbana, de modo que se puedan crear espacios que satisfagan las necesidades de la sociedad y mantengan el bienestar ecológico (Rojas *et al.* 2013, Aguilar-Tomasini *et al.* 2020). Es importante restringir el establecimiento de nuevos centros poblacionales dentro de áreas protegidas, respetando los polígonos decretados, para el caso de las zonas metropolitanas ya establecidas se ha planteado como estrategia

la implementación de espacios y techos verdes, aunque su funcionalidad ha sido poco estudiada (Wooster *et al.* 2022).

- **Grado de marginación en las ANP**

En México existe un traslape geográfico de las ANP y las zonas con mayor marginación y desigualdad socioeconómica. En el grupo de ANP de alta vulnerabilidad el grado de marginación alto-muy alto está presente en un mayor porcentaje. Ante la falta de recursos económicos las comunidades realizan un aprovechamiento directo de los recursos naturales. Islam y colaboradores (2019), reportaron que una persona adulta puede caminar en promedio 6.4 km para colectar productos forestales. El aprovechamiento de los recursos por las comunidades que dependen de ellos para subsistir implica cambios a corto plazo de paisajes naturales a sitios para la agricultura, ganadería u otras actividades primarias (Figueroa *et al.* 2009, Islam *et al.* 2019, de Oliveira Júnior *et al.* 2020).

Se identificaron 30 ANP con altos niveles de marginación, que son también altamente vulnerables por sus características físicas, entre ellas el APFF Cascada de Agua Azul, el PN Lagunas de Montebello, la RB La Encrucijada, y el PN Lagunas de Chacahua, en las que todas las comunidades ubicadas dentro de sus polígonos presentan alta marginación. En estas áreas hay una demanda constante de tierras para uso agropecuario (Horvath y Vidal-López 2001, García y Buenrostro 2013).

Las estrategias de conservación también deben incluir el bienestar de las comunidades que habitan estas zonas ya que, la pobreza se ha identificado como un factor que impulsa el bajo cumplimiento de las regulaciones ambientales (Bullard y Jonson 2009). La introducción de pagos ante la participación comunitaria en prácticas agrícolas, forestales, ganaderas y pesqueras sostenibles se ha propuesto como estrategia para mantener la conservación de la biodiversidad (Ament y Cumming 2016, Pisanty *et al.* 2016, Barnes *et al.* 2017, Bowker *et al.* 2017, De la Rosa-Velázquez *et al.* 2017).

- **Presencia de población indígena en las ANP**

El 26.3% de los territorios indígenas en México coinciden con áreas naturales protegidas. Algunos estudios mencionan que la relación entre las poblaciones indígenas y las ANP es positiva, debido a su alto nivel de organización y apropiación cultural (Pisanty *et al.* 2016, Rosa-Velázquez *et al.* 2017, CONANP 2020). De acuerdo con nuestros datos, en las ANP con baja vulnerabilidad hay un mayor porcentaje de población indígena (20.63%), en contraste con las ANP de alta vulnerabilidad (11.42%). Particularmente, el MN Bonampak ubicado en la porción central de la selva Lacandona, se consideró de baja vulnerabilidad y el 100% de su población pertenece a una etnia indígena. El APFF Metzabok, también se consideró baja vulnerabilidad con un 93% de habitantes indígenas. Estos datos son un indicador del papel de las comunidades indígenas en la conservación de las áreas naturales protegidas. Por consiguiente, la integridad de los grupos étnicos también debe ser prioridad ya que son comunidades expuestas a las perturbaciones por incendios forestales, tala ilegal, delincuencia, entre otras (Bowman *et al.* 2021), además de que se encuentran en condiciones de alta marginación socioeconómica.

- **Presencia de zonas turísticas en las ANP**

En México, el turismo se considera dentro de los principales sectores para el desarrollo económico. Nuestro país se ubica como principal destino turístico a nivel Latinoamérica, y se encuentra dentro de los 10 primeros países más visitados de todo el mundo (SECTUR 2018). La alta demanda ha llevado a que se abran espacios naturales y se implementen nuevas estrategias como el ecoturismo, en el que la principal motivación del turista es la observación y la valoración del entorno natural o de las culturas tradicionales en los espacios naturales (OMT 2002). Estas actividades frecuentemente se llevan a cabo dentro de áreas naturales protegidas, dependiendo como se lleve a cabo, el turismo o ecoturismo puede representar una estrategia para el desarrollo de las comunidades o una amenaza a la conservación de las ANP (Balmford *et al.* 2009, Canteiro *et al.* 2018).

La visita recreativa a las áreas naturales inevitablemente degrada los recursos naturales (Marion *et al.* 2016). Encontramos 70 sitios turísticos en 22 ANP altamente vulnerables. Las zonas con más sitios turísticos fueron el APFF Corredor Biológico Chichinautzin (7) y el PN el Tepozteco (7), que es parte del corredor biológico. Aunque se considera como un área de contención ante el crecimiento de las ciudades (SEMARNAT 2016), más del 80% de su polígono ya fue invadido por la zona metropolitana.

Por otro lado, en 7 ANP de baja vulnerabilidad se contabilizaron 15 sitios turísticos. La RB Calakmul fue el área con más sitios (6), esta zona también es considerada corredor biológico. La zona metropolitana se encuentra en el primer kilómetro del buffer, por lo que es urgente implementar prácticas de mitigación de los impactos de los asentamientos humanos, ya que ante la creciente demanda turística se incrementan los cambios en la cobertura y uso de suelo, la creación de infraestructura para la accesibilidad a los atractivos turísticos, la demanda de recursos e incluso la adquisición del suelo (Andy y Moore 2005, Gascón 2007, López y López 2008, Canteiro *et al.* 2018). En las zonas turísticas que son parte de las ANP debe llevarse a cabo de manera estricta el ecoturismo, que bajo las características establecidas por la Organización Mundial del Turismo (OTM) minimice los impactos negativos sobre el entorno natural y sociocultural, contribuya al mantenimiento de zonas naturales que constituyen el atractivo turístico y ofrezca a las comunidades locales fuentes de ingresos.

- **Densidad de carreteras en las ANP**

La creación de carreteras facilita el transporte, el comercio y el desarrollo. En México, de acuerdo con el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2010-2024, la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) se ha encargado de la construcción de infraestructura carretera con el objetivo de conectar e integrar con las comunidades más aisladas y marginadas. La extensión de la Red Nacional de Caminos (RNC) fue de 807,121 km para el año 2021 (RNC 2021), incrementando 4,701 km en un año (RNC 2020), con posibles beneficios sociales y económicos para diversas comunidades.

Sin embargo, las carreteras también han facilitado el acceso y la invasión a las ANP, ya que algunas son rodeadas, lo que provoca su aislamiento, y otras han sido fragmentadas por las carreteras (Donázar *et al.* 2018, Aguilar-Tomasini *et al.* 2020). Liu *et al.* (2022) menciona que la existencia de carreteras y la accesibilidad a la que dan paso son impulsores directos de la pérdida de cobertura vegetal en las ANP. Encontramos una mayor densidad de carreteras en las ANP clasificadas con alta vulnerabilidad, particularmente el PN cerro de la estrella, el PN Tepeyac y el PN Lomas de Padierna. Su ubicación y la red de carreteras de la Ciudad de México ha permitido el acceso para actividades turísticas, de recreación, comercio y uso de los recursos naturales. Aunque en las ANP menos vulnerables la densidad de carreteras es menor, igualmente representan una amenaza importante ya que son una fuente constante de mortalidad por atropellamiento de fauna silvestre (Garriga *et al.* 2012, Saranholi *et al.* 2016, Bedoya-V *et al.* 2018). En estas zonas es indispensable considerar la construcción de pasos de fauna elevados y subterráneos en el diseño de las vías de transporte, de esta manera se puede disminuir al menos el riesgo de mortalidad vial y mantener la conectividad de las poblaciones (Kang *et al.* 2016, Schmidt *et al.* 2021).

- **Densidad de población humana en las ANP**

Jones *et al.* (2018) mencionan que un tercio de las AP en el mundo están afectadas por la expansión y presión humana. La perturbación por actividades antrópicas ha sido vinculada directamente con la pérdida de biodiversidad (Di Marco *et al.* 2018, Weinzettel *et al.* 2018, Hua *et al.* 2022). De acuerdo con nuestros resultados las ANP de alta vulnerabilidad, tienen en promedio mayor densidad de población que las ANP de baja vulnerabilidad.

El PN cerro de la estrella, el PN Tepeyac y el PN Lomas de Padierna fueron las ANP con mayor densidad de población, estas áreas naturales protegidas están ubicadas en la Ciudad de México, la cual ocupa el segundo lugar en población a nivel nacional con 9,209,944 habitantes (INEGI 2020). La alta densidad de población implica más asentamientos humanos, cambio de uso de suelo, contaminación ambiental, infraestructura de transporte, presencia de especies exóticas de plantas y animales y aislamiento de áreas naturales causando la pérdida de biodiversidad, por lo que entre las medidas de manejo de estas ANP

se deben incluir planes de monitoreo y erradicación de especies exóticas (Leung *et al.* 2002, Spear *et al.* 2013, Jones *et al.* 2018, Kennedy *et al.* 2019, Hua *et al.* 2022).

- **Tenencia de la tierra**

La tenencia de la tierra se utiliza para regular y asignar los derechos, el acceso, las responsabilidades, las limitaciones de la tierra para utilizarla, controlarla y transferirla (FAO 2003). En México, más de la mitad de las tierras se encuentran en posesión de ejidos y comunidades agrarias, es decir, muchos de los bosques, selvas, matorrales, cuerpos de agua son propiedad de las personas que las habitan (Morett-Sánchez y Cosío-Ruiz 2014).

Aunque la influencia de la tenencia de la tierra en la conservación de la biodiversidad ha sido poco estudiada, existen contradicciones al respecto. Por un lado, se ha mencionado que en los ejidos ocurre mayor deforestación en comparación con tierras comunales (Bonilla-Moheno *et al.* 2013), aunque estos resultados han sido cuestionados por los datos utilizados MODIS EVI, ya que pueden estar generando conclusiones erróneas por la resolución, mientras que el método de muestreo puede crear un sesgo al eliminar municipios con tenencia de la tierra mixta (Skutsch *et al.* 2014). Otros estudios indican que las tierras que son de régimen comunal redujeron la deforestación hasta en un 7%, en comparación con tierras de régimen privado (Miteva *et al.* 2019).

Nosotros encontramos porcentajes similares de superficie de propiedad ejidal o comunal entre las áreas con alta y baja vulnerabilidad, 42.79 y 49.29% respectivamente. En algunos casos se han establecido diferentes estrategias como la expropiación de la tierra pasando a ser propiedad de la federación, sin embargo, en México no existe evidencia de que la propiedad pública proteja de manera más eficiente los recursos naturales, en comparación con los habitantes locales. Por otro lado, los propietarios de tierras ejidales y comunales recurren al artículo 14 constitucional, para ampararse ante las leyes ambientales y no están obligados a cumplirlas aun cuando la finalidad es la protección del ambiente (Latargere 2009, Morett-Sánchez y Cosío-Ruiz 2014). Ante este panorama, se propone la mejora directa en los planes de manejo de las ANP para regular el aprovechamiento en conjunto

con los fideicomisos que buscan promover su cumplimiento y la conservación de las áreas bajo acuerdos con las comunidades y pagos por servicios ambientales para incentivar la conservación del hábitat.

- **Uso potencial de suelo**

De acuerdo con nuestros resultados, al menos la mitad de la tierra de las ANP es apta para el aprovechamiento en el sector agrícola, pecuario y forestal, independientemente del nivel de vulnerabilidad. México presenta una variedad de condiciones climáticas que han favorecido el desarrollo del sector pecuario, forestal y agrícola, convirtiéndose en uno de los líderes en América Latina en este último (Statista Research Department 2022). Con el crecimiento demográfico se ha previsto que la producción de estos sectores deberá duplicarse en los próximos 30 años por seguridad alimentaria (Torres-Torres y Rojas-Martínez 2018). Sin embargo, si no se regulan este tipo de actividades económicas, a través de la implementación de prácticas agroecológicas sustentables, el cambio de uso de suelo de áreas protegidas a campos agropecuarios o para explotación forestal seguirá representando una de las principales amenazas a las áreas protegidas en el país. Esto es especialmente preocupante ya que las principales fuentes de ingresos de los habitantes de comunidades rurales dentro de áreas protegidas son a agricultura y la ganadería, de manera que, aunque a pequeña o mediana escala, representan un factor de presión permanente.

#### **Literatura citada**

Aguilar-Tomasini, M. A., Escalante, T., y Farfán, M. (2020). Effectiveness of natural protected areas for preventing land use and land cover changes of the Transmexican Volcanic Belt, Mexico. *Regional Environmental Change*, 20(3). <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01660-3>

Ament, J. M., y Cumming, G. S. (2016). Scale dependency in effectiveness, isolation, and social-ecological spillover of protected areas. *Conservation Biology: The Journal of the Society for Conservation Biology*, 30(4), 846–855. <https://doi.org/10.1111/cobi.12673>

- Armendáriz-Villegas, E. J., Covarrubias-García, M. de L. Á., Troyo-Diéguéz, E., Lagunes, E., Arreola-Lizárraga, A., Nieto-Garibay, A., Beltrán-Morales, L. F., y Ortega-Rubio, A. (2015). Metal mining and natural protected areas in Mexico: Geographic overlaps and environmental implications. *Environmental Science y Policy*, 48, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.12.016>
- Balmford, A., Beresford, J., Green, J., Naidoo, R., Walpole, M., y Manica, A. (2009). A global perspective on trends in nature-based tourism. *PLoS Biology*, 7(6), e1000144. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1000144>
- Barnes, M. D., Craigie, I. D., Dudley, N., y Hockings, M. (2017). Understanding local-scale drivers of biodiversity outcomes in terrestrial protected areas. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1399(1), 42–60. <https://doi.org/10.1111/nyas.13154>
- Bedoya-V, M. M., Árias-Alzate, A., y Delgado-V., C. A. (2018). Atropellamientos de fauna silvestre en la red vial urbana de cinco ciudades del Valle de Aburrá (Antioquia, Colombia). *Caldasia*, 40(2), 335–348. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v40n2.68297>
- Bonilla-Moheno, M., Redo, D. J., Aide, T. M., Clark, M. L., y Grau, H. R. (2013). Vegetation change and land tenure in Mexico: A country-wide analysis. *Land Use Policy*, 30(1), 355–364. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.04.002>
- Bowker, J. N., De Vos, A., Ament, J. M., y Cumming, G. S. (2017). Effectiveness of Africa's tropical protected areas for maintaining forest cover. *Conservation Biology: The Journal of the Society for Conservation Biology*, 31(3), 559–569. <https://doi.org/10.1111/cobi.12851>
- Bregman, T. P., Sekercioglu, C. H., y Tobias, J. A. (2014). Global patterns and predictors of bird species responses to forest fragmentation: Implications for ecosystem function and conservation. *Biological Conservation*, 169, 372–383. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.11.024>
- Buekers, J., Redeker, E. S., y Smolders, E. (2009). Lead toxicity to wildlife: derivation of a critical blood concentration for wildlife monitoring based on literature data. *The*

- Science of the Total Environment*, 407(11), 3431–3438.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.01.044>
- Bullard, R. D., y Johnson, G. S. (2009). Environmental justice grassroots activism and its impact. *Environmental Sociology: From Analysis to Action*, 63.
- Canteiro, M., Córdova-Tapia, F., y Brazeiro, A. (2018). Tourism impact assessment: A tool to evaluate the environmental impacts of touristic activities in Natural Protected Areas. *Tourism Management Perspectives*, 28, 220–227.  
<https://doi.org/10.1016/j.tmp.2018.09.007>.
- Cárdenas, J. (2013). La minería en México: Despojo a la Nación. *Cuestiones Constitucionales Revista Mexicana de Derecho Constitucional*, 28(28), 35–74.  
[https://doi.org/10.1016/s1405-9193\(13\)71275-7](https://doi.org/10.1016/s1405-9193(13)71275-7).
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (2020). Recuperado de <http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/listanp/>.
- Consejo Nacional de Población (CONAPO) 2015. Delimitación de las zonas metropolitanas de México. Recuperado de <https://www.gob.mx/conapo/documentos/delimitacion-de-las-zonas-metropolitanas-de-mexico-2015>.
- Consejo Nacional de Población (CONAPO) 2015. Índices de marginación 2015. Recuperado de <https://www.gob.mx/conapo/documentos/indice-de-marginacion-2015-284579>.
- De Alban, J. D. T., Leong, B. P. I., Venegas-Li, R., Connette, G. M., Jamaludin, J., Latt, K. T., Oswald, P., Reeder, C., y Webb, E. L. (2021). Conservation beyond the existing protected area network is required to improve species and habitat representation in a global biodiversity hotspot. *Biological Conservation*, 257(109105), 109105.  
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109105>
- De la Rosa-Velázquez, M. I. D. la, Espinoza-Tenorio, A., Díaz-Perera, M. Á., Ortega-Argueta, A., Ramos-Reyes, R., y Espejel, I. (2017). Development stressors are stronger than protected area management: A case of the Pantanos de Centla Biosphere Reserve, Mexico. *Land Use Policy*, 67, 340–351.  
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.009>

- de Oliveira Júnior, J. G. C., Campos-Silva, J. V., Santos, D. T. V., Ladle, R. J., y da Silva Batista, V. (2021). Quantifying anthropogenic threats affecting Marine Protected Areas in developing countries. *Journal of Environmental Management*, 279(111614), 111614. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111614>
- Di Marco, M., Venter, O., Possingham, H. P., y Watson, J. E. M. (2018). Changes in human footprint drive changes in species extinction risk. *Nature Communications*, 9(1), 4621. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07049-5>
- Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34(1), 487–515. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419>
- Figueroa, F., y Sánchez-Cordero, V. (2008). Effectiveness of natural protected areas to prevent land use and land cover change in Mexico. *Biodiversity and Conservation*, 17(13), 3223–3240. <https://doi.org/10.1007/s10531-008-9423-3>
- Figueroa, F., Sánchez-Cordero, V., Meave, J. A., y Trejo, I. (2009). Socioeconomic context of land use and land cover change in Mexican biosphere reserves. *Environmental Conservation*, 36(3), 180–191. <https://doi.org/10.1017/s0376892909990221>
- Garriga, N., Santos, X., Montori, A., Richter-Boix, A., Franch, M., y Llorente, G. A. (2012). Are protected areas truly protected? The impact of road traffic on vertebrate fauna. *Biodiversity and Conservation*, 21(11), 2761–2774. <https://doi.org/10.1007/s10531-012-0332-0>
- Gascón, J. (2007). *Turismo y Desarrollo: Herramientas para una mirada crítica* (Cañada, E.; Gascón, J.), Managua: Enlace. 2007. [https://www.academia.edu/4057641/Turismo\\_y\\_Development\\_Herramientas\\_para\\_una\\_mirada\\_cr%C3%ADtica\\_Ca%C3%B1ada\\_E\\_Gasc%C3%B3n\\_J\\_Managua\\_Enlace\\_2007](https://www.academia.edu/4057641/Turismo_y_Development_Herramientas_para_una_mirada_cr%C3%ADtica_Ca%C3%B1ada_E_Gasc%C3%B3n_J_Managua_Enlace_2007)
- Godínez-Gómez, O., Schank, C., Mas, J.-F., y Mendoza, E. (2020). An integrative analysis of threats affecting protected areas in a biodiversity stronghold in Southeast Mexico.

- Global Ecology and Conservation*, 24(e01297), e01297.  
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01297>
- Hua, T., Zhao, W., Cherubini, F., Hu, X., y Pereira, P. (2022). Continuous growth of human footprint risks compromising the benefits of protected areas on the Qinghai-Tibet Plateau. *Global Ecology and Conservation*, 34(e02053), e02053.  
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02053>
- Huang, L., Wang, J., Fang, Y., Zhai, T., y Cheng, H. (2021). An integrated approach towards spatial identification of restored and conserved priority areas of ecological network for implementation planning in metropolitan region. *Sustainable Cities and Society*, 69(102865), 102865. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102865>
- IDEA, Infraestructura de datos Espaciales Abiertos. sf. Recuperado de:  
<https://www.gits.igg.unam.mx/idea/descarga>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2012). Uso potencial de suelo, escala 1:1 000 000. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/temas/usopsuelo/>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020). Localidades de la República Mexicana, 2020, escala: 1:1. Censo de Población y Vivienda 2020.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020). Red nacional de caminos, escala 1:50 000. México.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2021). Red nacional de caminos, escala 1:50 000. México.
- Islam, K., Nath, T. K., Jashimuddin, M., y Rahman, M. F. (2019). Forest dependency, co-management and improvement of peoples' livelihood capital: Evidence from Chunut Wildlife Sanctuary, Bangladesh. *Environmental Development*, 32(100456), 100456.  
<https://doi.org/10.1016/j.envdev.2019.100456>
- Jones, K. R., Venter, O., Fuller, R. A., Allan, J. R., Maxwell, S. L., Negret, P. J., y Watson, J. E. M. (2018). One-third of global protected land is under intense human pressure. *Science (New York, N.Y.)*, 360(6390), 788–791.  
<https://doi.org/10.1126/science.aap9565>

- Kang, W., Minor, E. S., Woo, D., Lee, D., y Park, C.-R. (2016). Forest mammal roadkills as related to habitat connectivity in protected areas. *Biodiversity and Conservation*, 25(13), 2673–2686. <https://doi.org/10.1007/s10531-016-1194-7>
- Kennedy, C. M., Oakleaf, J. R., Theobald, D. M., Baruch-Mordo, S., y Kiesecker, J. (2019). Managing the middle: A shift in conservation priorities based on the global human modification gradient. *Global Change Biology*, 25(3), 811–826. <https://doi.org/10.1111/gcb.14549>
- Latargère, J. (2009). *Tenencia de la tierra y protección de los recursos naturales en las áreas naturales protegidas mexicanas*. <https://repositorio.colmex.mx/concern/theses/rn301166v?locale=es>
- Liu, Y., Ziegler, A. D., Wu, J., Liang, S., Wang, D., Xu, R., Duangnamon, D., Li, H., y Zeng, Z. (2022). Effectiveness of protected areas in preventing forest loss in a tropical mountain region. *Ecological Indicators*, 136(108697), 108697. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108697>
- Marion, J. L., Leung, Y.-F., Eagleston, H., y Burroughs, K. (2016). A review and synthesis of recreation ecology research findings on visitor impacts to wilderness and protected natural areas. *Journal of Forestry*, 114(3), 352–362. <https://doi.org/10.5849/jof.15-498>
- Mas, J.-F. (2005). Assessing protected area effectiveness using surrounding (buffer) areas environmentally similar to the target area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 105(1–3), 69–80. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-3156-5>
- McCarthy, C., Banfill, J., y Hoshino, B. (2021). National parks, protected areas and biodiversity conservation in North Korea: opportunities for international collaboration. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*. <https://doi.org/10.1016/j.japb.2021.05.006>

- Miteva, D. A., Ellis, P. W., Ellis, E. A., y Griscom, B. W. (2019). The role of property rights in shaping the effectiveness of protected areas and resisting forest loss in the Yucatan Peninsula. *PLoS One*, 14(5), e0215820. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215820>
- Morett-Sánchez, J. C., y Cosío-Ruiz, C. (2017). Panorama de los ejidos y comunidades agrarias en México. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 14(1), 125. <https://doi.org/10.22231/asyd.v14i1.526>
- Pisanty, I., Urquiza, E. y Vargas-Mena, A. (2016). Instrumentos de conservación in situ en México: logros y retos. pp.245-302.
- Powlen, K. A., Gavin, M. C., y Jones, K. W. (2021). Management effectiveness positively influences forest conservation outcomes in protected areas. *Biological Conservation*, 260(109192), 109192. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109192>
- RAN (Registro Agrario Nacional) 2021. Recuperado de: <https://datos.ran.gob.mx/conjuntoDatosPublico.php>
- Rands, M. R. W., Adams, W. M., Bennun, L., Butchart, S. H. M., Clements, A., Coomes, D., Entwistle, A., Hodge, I., Kapos, V., Scharlemann, J. P. W., Sutherland, W. J., y Vira, B. (2010). Biodiversity conservation: challenges beyond 2010. *Science (New York, N.Y.)*, 329(5997), 1298–1303. <https://doi.org/10.1126/science.1189138>
- Rempel, R.S., Kaukinen, D. and Carr, A.P. (2012) Patch Analyst and Patch Grid. Ontario Ministry of Natural Resources, Centre for Northern Forest Ecosystem Research, Thunder Bay. <http://www.cnfer.on.ca/SEP/patchanalyst/>
- Rodríguez-Rodríguez, D., y Martínez-Vega, J. (2019). Analysing subtle threats to conservation: A nineteen-year assessment of fragmentation and isolation of Spanish protected areas. *Landscape and Urban Planning*, 185, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.01.012>
- Rojas, C., Pino, J., Basnou, C., y Vivanco, M. (2013). Assessing land-use and -cover changes in relation to geographic factors and urban planning in the metropolitan area of

- Concepción (Chile). Implications for biodiversity conservation. *Applied Geography (Sevenoaks, England)*, 39, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.12.007>
- Saldaña-Villanueva, K., Pérez-Vázquez, F. J., Ávila-García, I. P., Méndez-Rodríguez, K. B., Carrizalez-Yáñez, L., Gavilán-García, A., Vargas-Morales, J. M., Van-Brussel, E., y Diaz-Barriga, F. (2022). A preliminary study on health impacts of Mexican mercury mining workers in a context of precarious employment. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology: Organ of the Society for Minerals and Trace Elements (GMS)*, 71(126925), 126925. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2022.126925>
- Saranholi, B. H., Bergel, M. M., Ruffino, P. H. P., Rodríguez-C, K. G., Ramazzotto, L. A., De Freitas, P. D., y Galetti, P. M., Jr. (2016). Roadkill hotspots in a protected area of Cerrado in Brazil: planning actions to conservation. *Revista MVZ Cordoba*, 21(2), 5441–5448. <https://doi.org/10.21897/rmvz.609>
- Schmidt, G. M., Lewison, R. L., y Swarts, H. M. (2021). Pairing long-term population monitoring and wildlife crossing structure interaction data to evaluate road mitigation effectiveness. *Biological Conservation*, 257(109085), 109085. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109085>
- Servicio Geológico Mexicano (SGM) sf. Recuperado de: <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/>
- Sieck, M., Ibisch, P. L., Moloney, K. A., y Jeltsch, F. (2011). Current models broadly neglect specific needs of biodiversity conservation in protected areas under climate change. *BMC Ecology*, 11(1), 12. <https://doi.org/10.1186/1472-6785-11-12>
- Skutsch, M., Mas, J. F., Bocco, G., Bee, B., Cuevas, G., y Gao, Y. (2014). Deforestation and land tenure in Mexico: A response to Bonilla-Moheno et al. *Land use policy*, 39, 390–396. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.11.013>
- Swenson, J. J., Carter, C. E., Domec, J.-C., y Delgado, C. I. (2011). Gold mining in the Peruvian Amazon: global prices, deforestation, and mercury imports. *PloS One*, 6(4), e18875. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0018875>

Taubert, F., Fischer, R., Groeneveld, J., Lehmann, S., Müller, M. S., Rödiger, E., Wiegand, T., y Huth, A. (2018). Global patterns of tropical forest fragmentation. *Nature*, 554(7693), 519–522. <https://doi.org/10.1038/nature25508>

Torres, F. y Rojas, A. (2018), "El suelo agrícola en México: retrospección y prospectiva para la seguridad alimentaria", Realidad, datos y espacio. Revista Internacional de Estadística y Geografía, vol. 9, núm. 3, México, INEGI. Recuperado de: <https://rde.inegi.org.mx/index.php/2019/01/25/suelo-agricola-en-mexico-retrospeccion-prospectiva-la-seguridad-alimentaria/>

Torres-Rojo, J. M., y Flores-Xolocotzi, R. (2001). Deforestation and Land Use Change in Mexico. *Journal of sustainable forestry*, 12(1–2), 171–192. [https://doi.org/10.1300/j091v12n01\\_09](https://doi.org/10.1300/j091v12n01_09)

Weinzettel, J., Vačkář, D., y Medková, H. (2018). Human footprint in biodiversity hotspots. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16(8), 447–452. <https://doi.org/10.1002/fee.1825>.

## Discusión general

México alberga una alta diversidad biológica, ubicándose en el quinto lugar de los países más diversos, ante la creciente crisis ambiental, la conservación de estas áreas se ha convertido en un reto (CONABIO 2020). A través del decreto de las ANP, el país mantiene bajo protección el 10.94% de la superficie terrestres nacional y el 22.05% de la superficie marina nacional (CONANP 2022). Sin embargo, el decreto de estas ANP no es suficiente para mitigar el impacto causado por las crecientes actividades humanas. De acuerdo con los datos obtenidos 125 ANP presentaron algún grado de fragmentación. Independiente al grado en el que se encuentre un área fragmentada, el aislamiento, la disminución de superficie, el aumento del efecto de borde, tienen efectos negativos en la abundancia, riqueza y presencia de especies, es por ello que, entre las medidas de conservación, debe ser prioridad mantener áreas amplias y contiguas, así como la conectividad entre ellas (Fahrig *et al.* 2019).

De manera general, en México el cambio de uso de suelo de ecosistemas naturales es principalmente para el desarrollo de actividades agrícolas, ganaderas, industriales, turísticas, petroleras, mineras, entre otras, (CONABIO 2022). Ante la misión de mantener la riqueza biológica y cultural, el conocimiento para mitigar el impacto que tienen las diferentes actividades humanas es indispensable. Aunque se han realizado algunos estudios que analizan la efectividad de las ANP del país, son pocos los que incluyen las diferentes amenazas que enfrentan.

El decreto de las ANP no representa un obstáculo para que se lleven dentro y alrededor las diferentes actividades que ponen en riesgo la biodiversidad y la salud humana. De acuerdo con los datos obtenidos, las ANP clasificadas como altamente vulnerables tienen mayor presencia de actividades que ya han sido reportadas como amenaza y causantes de la fragmentación, contaminación y sobreexplotación de los recursos naturales:

La actividad minera ha alcanzado al menos 25 ANP entre las cuales se encuentran zonas importantes de almacenamiento y distribución de agua, lo que pone en riesgo la biodiversidad y la salud humana, por los altos niveles de desechos tóxicos (Buekers *et al.*

2009, Swenson *et al.* 2011, Armendáriz-Villegas *et al.* 2015, Godínez-Gómez *et al.* 2020, Saldaña-Villanueva *et al.* 2022, Teklit Zerizghi *et al.* 2022). Ante este panorama, la actividad minera debe ser evitada en las ANP sin importar la categoría.

Aunque algunas ANP están alejadas de los asentamientos humanos, otras enfrentan presiones por la expansión de las grandes ciudades o zonas metropolitanas (Rojas *et al.* 2013, Aguilar-Tomasini *et al.* 2020, Huang *et al.* 2021, Wooster *et al.* 2022). De acuerdo con nuestros datos el polígono de 49 ANP se encuentra ya dentro de lo que se considera área metropolitana lo que representa una amenaza por los altos niveles de contaminación y la expansión descontrolada (Aguilar-Tomasini *et al.* 2020).

La efectividad de las ANP se ha atribuido en gran parte a la participación de las comunidades que las habitan, sin embargo, las oportunidades, la igualdad y los recursos económicos no son iguales para todas. Las ANP de alta vulnerabilidad también presentaron altos niveles de marginación, lo cual podría estar conduciendo a cambios de uso de suelo y la sobreexplotación de recursos naturales en busca de un sustento. El bienestar de las comunidades debería ser prioridad en las estrategias de conservación (Bullard y Jonson 2009, Ament y Cumming, 2016, Barnes *et al.* 2017, Bowker *et al.* 2017, De la Rosa-Velázquez *et al.* 2017, Pisanty *et al.* 2016).

Las ANP contienen una gran riqueza biológica y cultural, por lo que se han convertido en zonas con alto valor turístico, sin embargo, el turismo mal gestionado lleva a la degradación de estas áreas (Marion *et al.* 2016). Las ANP consideradas como altamente vulnerables presentan más sitios turísticos. En algunas zonas la amenaza se vuelve múltiple, ya que, ante la demanda de turismo, crece la demanda de cambio de uso de suelo para zonas residenciales, hoteleras y carreteras (Andy y Moore 2005, Gascón 2007, López y López 2008, Canteiro *et al.* 2018). Por lo que es indispensable que las actividades realizadas sean estrictamente bajo las características del ecoturismo.

La red de carreteras en México ha representado una ventaja para el transporte y el desarrollo, por el contrario, para la biodiversidad es una amenaza. Ha provocado la fragmentación y pérdida de biodiversidad (Donázar *et al.* 2018, Liu *et al.* 2022). Aunque se

registró menor densidad de carreteras en las ANP consideradas de baja vulnerabilidad, es importante que en ambas ANP se tomen medidas contra el aislamiento y los altos números de atropellamiento de fauna silvestre (Garriga *et al.* 2012, Kang *et al.* 2016, Saranholi *et al.* 2016, Bedoya-V *et al.* 2018, Schmidt *et al.* 2021).

La presión que ejerce la expansión humana ha llevado a la transformación de ecosistemas impactando en la biodiversidad, el funcionamiento, la estabilidad y los servicios ecosistémicos proporcionados (Song *et al.* 2018, Kennedy *et al.* 2019, Watson y Venter 2019). De acuerdo con nuestros datos, las ANP altamente vulnerables también presentan una densidad de población mayor. Ante las diferentes actividades que crecen junto a la población, la conservación se vuelve un desafío (Butchart *et al.* 2010, Jones *et al.* 2018, Song *et al.* 2018, Kennedy *et al.* 2019, Watson y Venter 2019, Huan *et al.* 2022), por lo que es indispensable que se establezcan limitaciones estrictas sobre las actividades que se realizan dentro y alrededor de las ANP.

En ambos grupos de ANP el uso potencial de suelo para actividades agropecuarias o de explotación forestal en promedio está por encima del 50%, a excepción del uso potencial agrícola en las ANP de baja vulnerabilidad, es decir, al menos la mitad de la tierra de las ANP es apta para el aprovechamiento en el sector agrícola, pecuario y forestal. Ante la demanda y el potencial de las zonas, se requiere de estrategias que regulen estas actividades dentro de las áreas protegidas para su manejo y conservación (Figueroa *et al.* 2009, Islam *et al.* 2019, de Oliveira Júnior *et al.* 2020, Villegas-Martínez 2021).

## **Conclusión general**

El PN Cerro de la estrella fue la ANP más afectada por la fragmentación del hábitat y El APFF Otoch Ma'ax Yetel Kooh fue la única ANP con un solo parche de vegetación, en general las ANP más fragmentadas se ubican hacia el centro del país.

Las ANP clasificadas como altamente vulnerables presentaron mayor densidad de población humana y de carreteras, mayor área metropolitana, mayor presencia de sitios mineros y sitios turísticos y mayor potencial de uso de suelo agrícola y pecuario. Por otro lado, las ANP de baja vulnerabilidad se encuentran más alejadas de la zona metropolitana, sin embargo, presentaron los mayores niveles de marginación y presencia de población indígena. La presencia de estas actividades aumenta la vulnerabilidad de estas ANP y pone en riesgo la biodiversidad. La suma de estas actividades podría estar llevando a que las ANP ya no estén cumpliendo sus objetivos.

## Literatura citada

- Aguilar-Tomasini, M. A., Escalante, T., y Farfán, M. (2020). Effectiveness of natural protected areas for preventing land use and land cover changes of the Transmexican Volcanic Belt, Mexico. *Regional Environmental Change*, 20(3). <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01660-3>
- Ament, J. M., y Cumming, G. S. (2016). Scale dependency in effectiveness, isolation, and social-ecological spillover of protected areas. *Conservation Biology: The Journal of the Society for Conservation Biology*, 30(4), 846–855. <https://doi.org/10.1111/cobi.12673>
- Armendáriz-Villegas, E. J., Covarrubias-García, M. de L. Á., Troyo-Diéguez, E., Lagunes, E., Arreola-Lizárraga, A., Nieto-Garibay, A., Beltrán-Morales, L. F., y Ortega-Rubio, A. (2015). Metal mining and natural protected areas in Mexico: Geographic overlaps and environmental implications. *Environmental Science y Policy*, 48, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.12.016>
- Balmford, A., Beresford, J., Green, J., Naidoo, R., Walpole, M., y Manica, A. (2009). A global perspective on trends in nature-based tourism. *PLoS Biology*, 7(6), e1000144. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1000144>
- Barnes, M. D., Craigie, I. D., Dudley, N., y Hockings, M. (2017). Understanding local-scale drivers of biodiversity outcomes in terrestrial protected areas. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1399(1), 42–60. <https://doi.org/10.1111/nyas.13154>
- Bedoya-V, M. M., Árias-Alzate, A., y Delgado-V., C. A. (2018). Atropellamientos de fauna silvestre en la red vial urbana de cinco ciudades del Valle de Aburrá (Antioquia, Colombia). *Caldasia*, 40(2), 335–348. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v40n2.68297>
- Bonilla-Moheno, M., Redo, D. J., Aide, T. M., Clark, M. L., y Grau, H. R. (2013). Vegetation change and land tenure in Mexico: A country-wide analysis. *Land Use Policy*, 30(1), 355–364. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.04.002>
- Bowker, J. N., De Vos, A., Ament, J. M., y Cumming, G. S. (2017). Effectiveness of Africa's tropical protected areas for maintaining forest cover. *Conservation Biology: The*

*Journal of the Society for Conservation Biology*, 31(3), 559–569.  
<https://doi.org/10.1111/cobi.12851>

Bregman, T. P., Sekercioglu, C. H., y Tobias, J. A. (2014). Global patterns and predictors of bird species responses to forest fragmentation: Implications for ecosystem function and conservation. *Biological Conservation*, 169, 372–383.  
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.11.024>

Buekers, J., Redeker, E. S., y Smolders, E. (2009). Lead toxicity to wildlife: derivation of a critical blood concentration for wildlife monitoring based on literature data. *The Science of the Total Environment*, 407(11), 3431–3438.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.01.044>

Bullard, R. D., y Johnson, G. S. (2009). Environmental justice grassroots activism and its impact. *Environmental Sociology: From Analysis to Action*, 63.

Canteiro, M., Córdova-Tapia, F., y Brazeiro, A. (2018). Tourism impact assessment: A tool to evaluate the environmental impacts of touristic activities in Natural Protected Areas. *Tourism Management Perspectives*, 28, 220–227.  
<https://doi.org/10.1016/j.tmp.2018.09.007>.

Cárdenas, J. (2013). La minería en México: Despojo a la Nación. *Cuestiones Constitucionales Revista Mexicana de Derecho Constitucional*, 28(28), 35–74.  
[https://doi.org/10.1016/s1405-9193\(13\)71275-7](https://doi.org/10.1016/s1405-9193(13)71275-7).

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (2020). Recuperado de <http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/listanp/>.

Consejo Nacional de Población (CONAPO) 2015. Delimitación de las zonas metropolitanas de México. Recuperado de <https://www.gob.mx/conapo/documentos/delimitacion-de-las-zonas-metropolitanas-de-mexico-2015>.

Consejo Nacional de Población (CONAPO) 2015. Índices de marginación 2015. Recuperado de <https://www.gob.mx/conapo/documentos/indice-de-marginacion-2015-284579>.

- De Alban, J. D. T., Leong, B. P. I., Venegas-Li, R., Connette, G. M., Jamaludin, J., Latt, K. T., Oswald, P., Reeder, C., y Webb, E. L. (2021). Conservation beyond the existing protected area network is required to improve species and habitat representation in a global biodiversity hotspot. *Biological Conservation*, 257(109105), 109105. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109105>
- De la Rosa-Velázquez, M. I. D. la, Espinoza-Tenorio, A., Díaz-Perera, M. Á., Ortega-Argueta, A., Ramos-Reyes, R., y Espejel, I. (2017). Development stressors are stronger than protected area management: A case of the Pantanos de Centla Biosphere Reserve, Mexico. *Land Use Policy*, 67, 340–351. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.009>
- de Oliveira Júnior, J. G. C., Campos-Silva, J. V., Santos, D. T. V., Ladle, R. J., y da Silva Batista, V. (2021). Quantifying anthropogenic threats affecting Marine Protected Areas in developing countries. *Journal of Environmental Management*, 279(111614), 111614. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111614>
- Di Marco, M., Venter, O., Possingham, H. P., y Watson, J. E. M. (2018). Changes in human footprint drive changes in species extinction risk. *Nature Communications*, 9(1), 4621. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07049-5>
- Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34(1), 487–515. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419>
- Fahrig, L., Arroyo-Rodríguez, V., Bennett, J. R., Boucher-Lalonde, V., Cazetta, E., Currie, D. J., Eigenbrod, F., Ford, A. T., Harrison, S. P., Jaeger, J. A. G., Koper, N., Martin, A. E., Martin, J.-L., Metzger, J. P., Morrison, P., Rhodes, J. R., Saunders, D. A., Simberloff, D., Smith, A. C., ... Watling, J. I. (2019). Is habitat fragmentation bad for biodiversity? *Biological Conservation*, 230, 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.12.026>

- Figueroa, F., y Sánchez-Cordero, V. (2008). Effectiveness of natural protected areas to prevent land use and land cover change in Mexico. *Biodiversity and Conservation*, 17(13), 3223–3240. <https://doi.org/10.1007/s10531-008-9423-3>
- Figueroa, F., Sánchez-Cordero, V., Meave, J. A., y Trejo, I. (2009). Socioeconomic context of land use and land cover change in Mexican biosphere reserves. *Environmental Conservation*, 36(3), 180–191. <https://doi.org/10.1017/s0376892909990221>
- Garriga, N., Santos, X., Montori, A., Richter-Boix, A., Franch, M., y Llorente, G. A. (2012). Are protected areas truly protected? The impact of road traffic on vertebrate fauna. *Biodiversity and Conservation*, 21(11), 2761–2774. <https://doi.org/10.1007/s10531-012-0332-0>
- Gascón, J. (2007). *Turismo y Desarrollo: Herramientas para una mirada crítica* (Cañada, E.; Gascón, J.), Managua: Enlace. 2007. [https://www.academia.edu/4057641/Turismo\\_y\\_Development\\_Herramientas\\_para\\_una\\_mirada\\_cr%C3%ADtica\\_Ca%C3%B1ada\\_E\\_Gasc%C3%B3n\\_J\\_Managua\\_Enlace\\_2007](https://www.academia.edu/4057641/Turismo_y_Development_Herramientas_para_una_mirada_cr%C3%ADtica_Ca%C3%B1ada_E_Gasc%C3%B3n_J_Managua_Enlace_2007)
- Godínez-Gómez, O., Schank, C., Mas, J.-F., y Mendoza, E. (2020). An integrative analysis of threats affecting protected areas in a biodiversity stronghold in Southeast Mexico. *Global Ecology and Conservation*, 24(e01297), e01297. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01297>
- Hua, T., Zhao, W., Cherubini, F., Hu, X., y Pereira, P. (2022). Continuous growth of human footprint risks compromising the benefits of protected areas on the Qinghai-Tibet Plateau. *Global Ecology and Conservation*, 34(e02053), e02053. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02053>
- Huang, L., Wang, J., Fang, Y., Zhai, T., y Cheng, H. (2021). An integrated approach towards spatial identification of restored and conserved priority areas of ecological network for implementation planning in metropolitan region. *Sustainable Cities and Society*, 69(102865), 102865. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102865>

- IDEA, Infraestructura de datos Espaciales Abiertos. sf. Recuperado de: <https://www.gits.igg.unam.mx/idea/descarga>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2012). Uso potencial de suelo, escala 1:1 000 000. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/temas/usopsuelo/>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020). Localidades de la República Mexicana, 2020, escala: 1:1. Censo de Población y Vivienda 2020.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020). Red nacional de caminos, escala 1:50 000. México.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2021). Red nacional de caminos, escala 1:50 000. México.
- Islam, K., Nath, T. K., Jashimuddin, M., y Rahman, M. F. (2019). Forest dependency, co-management and improvement of peoples' livelihood capital: Evidence from Chunati Wildlife Sanctuary, Bangladesh. *Environmental Development*, 32(100456), 100456. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2019.100456>
- Jones, K. R., Venter, O., Fuller, R. A., Allan, J. R., Maxwell, S. L., Negret, P. J., y Watson, J. E. M. (2018). One-third of global protected land is under intense human pressure. *Science (New York, N.Y.)*, 360(6390), 788–791. <https://doi.org/10.1126/science.aap9565>
- Kang, W., Minor, E. S., Woo, D., Lee, D., y Park, C.-R. (2016). Forest mammal roadkills as related to habitat connectivity in protected areas. *Biodiversity and Conservation*, 25(13), 2673–2686. <https://doi.org/10.1007/s10531-016-1194-7>
- Kennedy, C. M., Oakleaf, J. R., Theobald, D. M., Baruch-Mordo, S., y Kiesecker, J. (2019). Managing the middle: A shift in conservation priorities based on the global human modification gradient. *Global Change Biology*, 25(3), 811–826. <https://doi.org/10.1111/gcb.14549>
- Latargère, J. (2009). *Tenencia de la tierra y protección de los recursos naturales en las áreas naturales protegidas mexicanas*. <https://repositorio.colmex.mx/concern/theses/rn301166v?locale=es>

- Liu, Y., Ziegler, A. D., Wu, J., Liang, S., Wang, D., Xu, R., Duangnamon, D., Li, H., y Zeng, Z. (2022). Effectiveness of protected areas in preventing forest loss in a tropical mountain region. *Ecological Indicators*, 136(108697), 108697. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108697>
- Marion, J. L., Leung, Y.-F., Eagleston, H., y Burroughs, K. (2016). A review and synthesis of recreation ecology research findings on visitor impacts to wilderness and protected natural areas. *Journal of Forestry*, 114(3), 352–362. <https://doi.org/10.5849/jof.15-498>
- Mas, J.-F. (2005). Assessing protected area effectiveness using surrounding (buffer) areas environmentally similar to the target area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 105(1–3), 69–80. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-3156-5>
- McCarthy, C., Banfill, J., y Hoshino, B. (2021). National parks, protected areas and biodiversity conservation in North Korea: opportunities for international collaboration. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*. <https://doi.org/10.1016/j.japb.2021.05.006>
- Miteva, D. A., Ellis, P. W., Ellis, E. A., y Griscom, B. W. (2019). The role of property rights in shaping the effectiveness of protected areas and resisting forest loss in the Yucatan Peninsula. *PLoS One*, 14(5), e0215820. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215820>
- Morett-Sánchez, J. C., y Cosío-Ruiz, C. (2017). Panorama de los ejidos y comunidades agrarias en México. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 14(1), 125. <https://doi.org/10.22231/asyd.v14i1.526>
- Pisanty, I., Urquiza, E. y Vargas-Mena, A. (2016). Instrumentos de conservación in situ en México: logros y retos. pp.245-302.
- Powlen, K. A., Gavin, M. C., y Jones, K. W. (2021). Management effectiveness positively influences forest conservation outcomes in protected areas. *Biological Conservation*, 260(109192), 109192. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109192>

RAN (Registro Agrario Nacional) 2021. Recuperado de:  
<https://datos.ran.gob.mx/conjuntoDatosPublico.php>

Rands, M. R. W., Adams, W. M., Bennun, L., Butchart, S. H. M., Clements, A., Coomes, D., Entwistle, A., Hodge, I., Kapos, V., Scharlemann, J. P. W., Sutherland, W. J., y Vira, B. (2010). Biodiversity conservation: challenges beyond 2010. *Science (New York, N.Y.)*, 329(5997), 1298–1303. <https://doi.org/10.1126/science.1189138>

Rempel, R.S., Kaukinen, D. and Carr, A.P. (2012) Patch Analyst and Patch Grid. Ontario Ministry of Natural Resources, Centre for Northern Forest Ecosystem Research, Thunder Bay.  
<http://www.cnfer.on.ca/SEP/patchanalyst/>

Rodríguez-Rodríguez, D., y Martínez-Vega, J. (2019). Analysing subtle threats to conservation: A nineteen year assessment of fragmentation and isolation of Spanish protected areas. *Landscape and Urban Planning*, 185, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.01.012>

Rojas, C., Pino, J., Basnou, C., y Vivanco, M. (2013). Assessing land-use and -cover changes in relation to geographic factors and urban planning in the metropolitan area of Concepción (Chile). Implications for biodiversity conservation. *Applied Geography (Sevenoaks, England)*, 39, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.12.007>

Saldaña-Villanueva, K., Pérez-Vázquez, F. J., Ávila-García, I. P., Méndez-Rodríguez, K. B., Carrizalez-Yáñez, L., Gavilán-García, A., Vargas-Morales, J. M., Van-Brussel, E., y Diaz-Barriga, F. (2022). A preliminary study on health impacts of Mexican mercury mining workers in a context of precarious employment. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology: Organ of the Society for Minerals and Trace Elements (GMS)*, 71(126925), 126925. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2022.126925>

Saranholi, B. H., Bergel, M. M., Ruffino, P. H. P., Rodríguez-C, K. G., Ramazzotto, L. A., De Freitas, P. D., y Galetti, P. M., Jr. (2016). Roadkill hotspots in a protected area of

- Cerrado in Brazil: planning actions to conservation. *Revista MVZ Córdoba*, 21(2), 5441–5448. <https://doi.org/10.21897/rmvz.609>
- Schmidt, G. M., Lewison, R. L., y Swarts, H. M. (2021). Pairing long-term population monitoring and wildlife crossing structure interaction data to evaluate road mitigation effectiveness. *Biological Conservation*, 257(109085), 109085. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109085>
- Servicio Geológico Mexicano (SGM) sf. Recuperado de: <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/>
- Sieck, M., Ibsch, P. L., Moloney, K. A., y Jeltsch, F. (2011). Current models broadly neglect specific needs of biodiversity conservation in protected areas under climate change. *BMC Ecology*, 11(1), 12. <https://doi.org/10.1186/1472-6785-11-12>
- Skutsch, M., Mas, J. F., Bocco, G., Bee, B., Cuevas, G., y Gao, Y. (2014). Deforestation and land tenure in Mexico: A response to Bonilla-Moheno et al. *Land use policy*, 39, 390–396. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.11.013>
- Swenson, J. J., Carter, C. E., Domec, J.-C., y Delgado, C. I. (2011). Gold mining in the Peruvian Amazon: global prices, deforestation, and mercury imports. *PloS One*, 6(4), e18875. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0018875>
- Taubert, F., Fischer, R., Groeneveld, J., Lehmann, S., Müller, M. S., Rödig, E., Wiegand, T., y Huth, A. (2018). Global patterns of tropical forest fragmentation. *Nature*, 554(7693), 519–522. <https://doi.org/10.1038/nature25508>
- Torres, F. y Rojas, A. (2018), "El suelo agrícola en México: retrospectiva y prospectiva para la seguridad alimentaria", Realidad, datos y espacio. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, vol. 9, núm. 3, México, INEGI. Recuperado de: <https://rde.inegi.org.mx/index.php/2019/01/25/suelo-agricola-en-mexico-retrospeccion-prospectiva-la-seguridad-alimentaria/>

Torres-Rojo, J. M., y Flores-Xolocotzi, R. (2001). Deforestation and Land Use Change in Mexico. *Journal of sustainable forestry*, 12(1–2), 171–192.  
[https://doi.org/10.1300/j091v12n01\\_09](https://doi.org/10.1300/j091v12n01_09)

Weinzettel, J., Vačkář, D., y Medková, H. (2018). Human footprint in biodiversity hotspots. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16(8), 447–452.  
<https://doi.org/10.1002/fee.1825>.