

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

MARÍA ELENA TORRES OLAVE
(COORDINADORA)

GEO IN FOR MÁ TICA

EPIDEMIOLOGÍA Y BIODIVERSIDAD

APLICACIONES PARA LA CONSERVACIÓN
Y PRESERVACIÓN DE LA SALUD Y EL MEDIO AMBIENTE

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Juan Ignacio Camargo Nassar
Rector

Daniel Constandse Cortez
Secretario General

Guadalupe Gaytán Aguirre
Directora del Instituto de Arquitectura, Diseño y Arte

Jesús Meza Vega
Director General de Comunicación Universitaria

GEOINFORMÁTICA, EPIDEMIOLOGÍA Y BIODIVERSIDAD

**Aplicaciones para la conservación y
preservación de la salud y el medio ambiente**

María Elena Torres Olave
(Coordinadora)

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ



D.R. © María Elena Torres Olave (por coordinación)

© Universidad Autónoma de Ciudad Juárez,

Avenida Plutarco Elías Calles #1210,

Fovissste Chamizal, C.P. 32310

Ciudad Juárez, Chihuahua, México

Tel : +52 (656) 688 2100 al 09

Primera edición, 2020

<https://elibros.uacj.mx>

Geoinformática, epidemiología y biodiversidad. Aplicaciones para la conservación y preservación de la salud y el medio ambiente/ Coordinadora María Elena Torres Olave.– Primera edición --Ciudad Juárez, Chihuahua, México: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2020.-- 157 páginas; 22 cm.--

ISBN: 978-607-520-368-3

Contenido: incluye investigaciones desarrolladas en los proyectos de titulación de licenciados en Geoinformática de la UACJ en ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua, y muestra las aplicaciones que tiene el uso de MaxEnt en el análisis de problemáticas ambientales y de salud en el contexto regional y nacional. Expone ejemplos del amplio potencial de la geoinformática para generar datos que permitan visualizar la conservación, preservación y manejo de la biodiversidad, así como epidemiología desde las aulas y el trabajo universitario. Este trabajo contiene cuatro capítulos que muestran el estudio de los usos de MaxEnt en diversos temas, con un aporte novedoso y multidisciplinar con herramientas geotecnológicas de avanzada.

Disponible en: elibros.uacj.mx

1. Ciencias de la tierra – Métodos estadísticos.
2. Geoinformática – Métodos estadísticos.
3. Geoinformática – Máxima Entropía (MaxEnt).

LC – QE33.2.S82

La edición, diseño y producción editorial de este documento estuvo a cargo de la Dirección General de Comunicación Universitaria, a través de la Subdirección de Editorial y Publicaciones

Coordinadora editorial: Mayola Renova González

Corrección: Subdirección de Editorial y Publicaciones

Diseño de cubierta y diagramación: Karla María Rascón

Prólogo

Los modelos realizados con la aplicación la Máxima Entropía (MaxEnt) son importantes para una variedad de aplicaciones en ecología, conservación y preservación de especies, agricultura, cambio climático, dispersión de especies invasoras y plagas, patrones espaciales de diversidad de especies en el espacio-tiempo y distribución de enfermedades.

Por lo anteriormente mencionado, estos modelos han sido objeto de atención en los últimos tiempos y han un impacto muy importante en las nuevas tecnologías emergentes ligadas a áreas como la biogeografía, ecología, agricultura, epidemiología y biología de la conservación (en combinación con técnicas como los corredores biológicos).

El uso básico de MaxEnt consiste en combinar un conjunto de variables ambientales como las que están relacionadas con las funciones básicas de los seres vivos conocidas como bioclimáticas (que tienen relación con variables limitantes para la distribución de los seres vivos, como la temperatura, humedad, insolación, etcétera), topohidroclimáticas (para agua dulce), índices normalizados de vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés), por mencionar solo algunas, y los datos de ocurrencia o presencia de la especie de interés. Los modelos de correlación, como el que se realiza con MaxEnt, utilizan registros de localizaciones con presencia para predicciones de nicho o distribución geográfica, los cuales son conocidos como técnicas de perfil.

Los modelos de distribución potencial de especies con MaxEnt expresan cartográficamente la idoneidad de un espacio para la ocurrencia de una especie en función de las variables empleadas para generar dicha representación. La idoneidad no es más que la relación matemática o

estadística entre la distribución real conocida y un conjunto de variables independientes que se usan como indicadores. Estas variables pueden ser geológicas, topográficas, climáticas, edáficas, etcétera, y se espera que, con algunas de ellas, individualmente o en combinación, se puedan definir los factores ambientales que delimiten las condiciones favorables para la presencia de la especie. La construcción de modelos de distribución potencial de especies con MaxEnt es, esencialmente, un proceso de clasificación. Las variables dependientes son dicotómicas (presencia/ausencia) y las independientes pueden ser cuantitativas (por ejemplo, temperatura o elevación) o nominales (por ejemplo, uso del suelo).

En los últimos quince años, se han desarrollado varios algoritmos para modelar la distribución potencial de una especie (por ejemplo, Bioclim, GARP, R y MaxEnt), estos se han convertido en importantes herramientas en biogeografía, biología de la conservación, ecología del paisaje y epidemiología espacial. Dichos modelos están basados en el concepto de nicho ecológico de Hutchinson, que relaciona la información biológica (puntual) con información ambiental (geográfica), y posteriormente identifica zonas donde no existen registros previos de la especie, corrige la predicción y obtiene, de esta forma, el área de distribución actual de las especies. MaxEnt (<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent>) es un programa basado en una aproximación estadística llamada principio de máxima entropía, que permite hacer predicciones utilizando información incompleta; en este caso, datos de presencia u ocurrencia (de siete a cuatrocientos puntos de ocurrencias) de una especie.

El libro que el lector tiene en sus manos, incluye investigaciones desarrolladas en los proyectos de titulación de licenciados en Geoinformática de la UACJ en ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua, y muestra las aplicaciones que tiene el uso de MaxEnt en el análisis de problemáticas ambientales y de salud en el contexto regional y nacional. Expone ejemplos del amplio potencial de la geoinformática para generar datos que permitan visualizar la conservación, preservación y manejo de la biodiversidad, así como epidemiología desde las aulas y el trabajo universitario. Este trabajo contiene cuatro capítulos que muestran el estudio de los usos de MaxEnt en diversos temas, con un aporte novedoso y multidisciplinar con herramientas geotecnológicas de avanzada.

Esta obra contiene el trabajo que puede lograrse cuando se coordinan las autoridades universitarias, profesores-investigadores y alumnos, cuando enfocan sus esfuerzos hacia una meta en común: el manejo y aprovechamiento de los recursos de la biodiversidad y la vigilancia epidemiológica.

Dra. María Elena Torres Olave

Índice

Prólogo	5
Evaluación cualitativa de riesgo de incendio sobre corredores ecológicos para venado cola blanca (<i>Odocoileus virginianus</i>) en el ANP de Tutuaca, Chih., Méx.	11
Materiales y métodos	16
Resultados	21
Discusión	30
Conclusiones.....	32
Literatura citada	33
Patrones de distribución de H5N1 y H1N1, y riesgo en América del Norte	39
Antecedentes.....	42
SIG y vigilancia epidemiológica.....	45
Materiales y métodos	47
Resultados	53
Discusión	60
Conclusión.....	61
Literatura citada	63
Implementación de SIG para la rehabilitación forestal y agroforestería en las ANP de Tutuaca y Papigochi	71
Materiales y métodos	76
Metodología.....	78
Resultados	85

Discusión	96
Conclusiones.....	100
Literatura citada	102

Dinámica temporal de la actividad vegetal en zonas degradadas por *Ips confusus* en bosque de *Pinus cembroides*: región central de Chihuahua (2000-2014).....111

Metodología.....	118
Elaboración del mapa de cobertura y uso de suelo	123
Construcción de las series temporales de variables climáticas	124
Análisis estadístico NDVI vs. variables climáticas.....	125
Modelación para la presencia y propagación del descortezador <i>Ips confusus</i> en las regiones de <i>Pinus cembroides</i> para el estado de Chihuahua	126
Identificación de zonas vulnerables (regiones donde existe coincidencia de la especie de pino y plaga) para el estado de Chihuahua	128
Resultados	129
Discusión	147
Conclusiones.....	149
Conclusiones generales	150
Literatura citada	152

Evaluación cualitativa de riesgo de incendio sobre corredores ecológicos para venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*) en el ANP de Tutuaca, Chih., Méx.

Alexandra Arredondo Bustillos • Mario Iván Uc Campos
María Elena Torres Olave • Manuel Octavio González León • Elifalet López González

Los incendios son reacciones químicas de oxidación-reducción fuertemente exotérmica. En terminología de incendios, el reductor se nombra combustible y el oxidante, comburente. Las reacciones entre uno y otro se denominan combustión; por lo tanto, para que un incendio comience tienen que estar presentes tres factores: combustible, comburente y foco de ignición, que conforman el conocido triángulo del fuego; y para que el incendio avance, la energía desprendida en el proceso tiene que ser pasadera para que se origine la reacción en cadena, estos cuatro factores se denominan tetraedro del fuego (Duarte, & Piqué, 2001).

El material de ignición o combustible es aquella materia inflamable, incluida la flora y estructuras antrópicas. Se menciona que la intensidad del incendio está dada por la cantidad de combustible disponible en una zona (Morfin *et al.*, 2012); entonces el comportamiento del fuego en los incendios forestales es resultado de la interacción entre el material combustible presente en la cubierta forestal (biomasa de plantas vivas, árboles muertos en pie, material leñoso caído y hojarasca).

Por otro lado, se menciona que otros dos factores que contribuyen a los incendios forestales son las condiciones climáticas y la topografía. Wilson y Sorenson (2001) mencionan que cuando el incendio reacciona con las condiciones topográficas adecuadas, se propaga rápidamente en contra de la pendiente.

Existen procesos tales como los incendios que rigen los ecosistemas naturales en muchas regiones del mundo (Nasi *et al.*, 2002), donde, durante la estación seca o años de sequía en las zonas húmedas, la vegetación se vuelve fácilmente un combustible inflamable. La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD) reconoce que las zonas de clima subhúmedo-seco o semiárido son propensas a sufrir estos fenómenos; en cambio, las regiones más áridas no permiten la continuidad de la vegetación, lo que dificulta la propagación y extensión de los incendios (Villers, 2006).

En México, debido a las condiciones climáticas y meteorológicas, cada año se presentan incendios forestales de diversas magnitudes que han contribuido en el deterioro de los recursos naturales, así como en pérdidas económicas y de vidas humanas (Mas, 2011).

Cada año es más la magnitud de estas perturbaciones, ya que algunas se producen por causas naturales como los rayos, vientos cálidos o estaciones secas prolongadas en las que los componentes de ignición son producidos por la mano del hombre, tales como cigarrillos, quemas agrícolas, fogatas, industrialización, entre otros (Amaya, & Armenteras, 2012).

En México, las acciones de prevención, monitoreo, mitigación, detección y combate de incendios forestales han sido escasas para reducir la intensidad y magnitud de estos incidentes, los cuales han mantenido una tendencia creciente por más de tres décadas. Esto se atribuye a actividades agropecuarias y condiciones ambientales extremas inducidas por fenómenos como El Niño, la variabilidad climática y el calentamiento global (Manzo, Sánchez, & Álvarez, 2009).

El historial de regímenes de incendios de bosques de coníferas en el estado de Chihuahua fue realizado con base en cicatrices de incendios registrados, como la reserva cerro Mohinora (Cerano, Villanueva, & Fulé, 2010), por lo que la Comisión Nacional Forestal (Conafor, 2010), en su reporte mensual acumulado, indica que Chihuahua lleva 701 incendios en

el año 2010. Las áreas afectadas, que estaban cubiertas de herbáceas, arbóreas (adulto y renuevo) y arbustivas, sumaron un total de 13 353.60 ha.

En México, las Áreas Naturales Protegidas (ANP) son uno de los instrumentos más importantes para la conservación de los ecosistemas y los servicios ambientales que proveen; su superficie es de más de 25 millones de hectáreas y alrededor del 40 % conservan ecosistemas forestales (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2006).

Con la problemática descrita en los párrafos anteriores, además del conocimiento de los factores determinantes para provocar un incendio, es fundamental y necesario desarrollar modelos predictivos que permitan entender las variables que influyen potencialmente en el comportamiento de los mismos (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [Conanp], 2012), para así generar cartografías de riesgo, principalmente en las ANP, ya que por su valor ecológico son las que se consideran más vulnerables en este estudio.

Por lo mencionado anteriormente, el objetivo del presente trabajo está basado en obtener la probabilidad de incendios dentro de los corredores biológicos que hay en el ANP de Tutuaca para la especie *Odocoileus virginianus* mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) con base en su importancia bioecológica, además de su estatus según la NOM-059-SEMARNAT-2010. Hoy en día, se han generado importantes cambios en la distribución y configuración espacial de los hábitats naturales, por lo que la cantidad y calidad del hábitat disponible para los grupos de flora y fauna son cada vez más restringidas, debido principalmente a los cambios en los ecosistemas por la práctica de actividades antropogénicas, así como de perturbaciones naturales, por lo que una de las alternativas que se están llevando a cabo para fomentar y conservar hasta donde sea posible un continuo de vegetación, así como todos los procesos del ecosistema que ahí ocurren, es la creación de corredores biológicos (Robles, 2009).

En la actualidad, los corredores biológicos, aunado a los SIG y modelos de distribución de especies (MDS), son una herramienta innovadora que permite la integración de variables topográficas, bioclimáticas, de vegetación y de aspectos antropogénicos en un mismo sistema geoinfor-

mático, que procesan datos geoespaciales para transformarlos en cartografía temática que es utilizada como apoyo para tomar decisiones sobre el manejo y conservación del territorio (Álvarez *et al.*, 2013).

De acuerdo con Boraschi (2009), los corredores favorecen la conectividad entre los ecosistemas y el intercambio genético de la biodiversidad asociada a las áreas silvestres protegidas.

Los SIG son la herramienta más adecuada para la modelación de hábitats, cartografía de riesgos y corredores biológicos (Sarria, 2004); por ello, se señala que los SIG están constituidos para establecer objetivos, calibrar modelos de simulación y variables que alimenten al modelo, así como realizar los análisis mediante el procesamiento digital de imágenes de satélites (Montalvo, 1998).

Los SIG comienzan a ser importantes en la toma de decisiones en relación con diferentes alternativas en el espacio y el tiempo (Sánchez, Fernández, & Illera, 1999). Durante la última década, el empleo de los SIG para el manejo del fuego en el ámbito forestal, ya sea monitoreo, prevención o planificación, ha experimentado un gran auge y en la actualidad, la geoinformación es un instrumento de gran valor en este campo, así como la teledetección de imágenes satelitales (Moizo, 2004).

El análisis realizado por medio de los SIG y la cuantificación e identificación de patrones de los componentes presentes en el espacio proporciona elementos efectivos para realizar diferentes evaluaciones a nivel del paisaje. Estos análisis resultan muy útiles en el diseño y planificación del ordenamiento del territorio, especialmente para áreas protegidas y las zonas a conectar entre estas (Isaacs, 2011).

Confirmando lo anterior, Castañeda *et al.* (2015) mencionan que la percepción remota (RS, por sus siglas en inglés) y los SIG son herramientas precisas y adecuadas para caracterizar las condiciones de grandes zonas forestales, así como para integrar información y particularizar distintos aspectos ecológicos y de perturbación, tales como incendios.

El método de modelado con Máxima Entropía (MaxEnt) ha demostrado ser una herramienta robusta al utilizar datos de presencia (Savino *et al.*, 2015). Este modelo permite predicciones incluso con un escaso número de datos, calculando la distribución geográfica más probable para una especie; por lo tanto, estima la probabilidad de ocurrencia de la

misma buscando la distribución más uniforme posible (Phillips, Anderson, & Schapire, 2006).

Debido al gran número, intensidad y magnitud de los incendios forestales en la última década en el estado de Chihuahua, es necesario generar modelos o simulaciones predictivas de probabilidad de riesgo de incendios sobre las ANP de esta entidad; ya que estas, por su valor ecológico en lo que se refiere a biodiversidad, ya sea fauna o flora, y su ubicación geográfica, se han considerado como vulnerables y en peligro. Por lo que en este estudio se pretende aportar herramientas y alternativas cartográficas actuales para su monitoreo y cuidado mediante técnicas geoespaciales para la conservación, mitigación y monitoreo de corredores biológicos para el venado cola blanca en el ANP de Tutuaca, Chihuahua.

El objetivo de este estudio fue obtener la probabilidad de incendios dentro de los corredores biológicos que hay en el ANP de Tutuaca para la especie *O. virginianus* mediante SIG.

Los incendios forestales son una importante amenaza en todos los ecosistemas, tanto por las pérdidas de superficie forestal y los consiguientes valores ambientales que suponen, como por los cuantiosos daños personales y materiales que ocasionan.

Debido a las severas complicaciones que causan los incendios en las ANP, surge la necesidad de obtener cartografías que caractericen el riesgo mediante SIG que permitan identificar las zonas vulnerables a este tipo de eventos, además de determinar los corredores biológicos y áreas de distribución potencial de la especie que se encuentra en peligro en la región de Tutuaca, Chihuahua, en relación con su importancia bioecológica o peligro de extinción.

La hipótesis de este trabajo consistió en que es posible generar cartografía que indique la probabilidad de incendios dentro de los corredores biológicos de *O. virginianus* en el ANP de Tutuaca empleando SIG y modelos de distribución potencial.

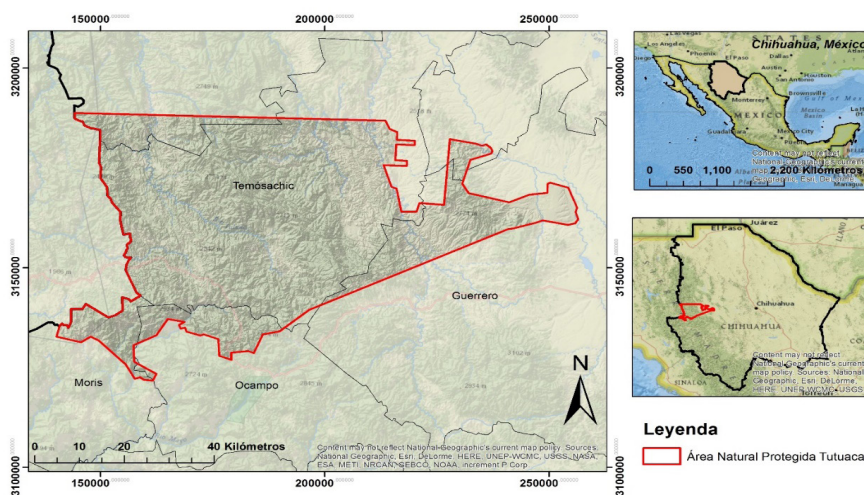
Materiales y métodos

ÁREA DE ESTUDIO

El área de interés (Figura 1) corresponde al Área de Protección de Flora y Fauna Tutuaca, que se ubica en la región sur del municipio de Temósachic en el estado de Chihuahua. Su superficie calculada es de 444 488.69 ha, la cual abarca los ejidos de Tutuaca, Conoachi, La Posta, Comunidad Tutuaca, Comunidad Tosanachi y la propiedad privada Los Chiqueritos. Colinda al suroeste con el Área de Protección de Flora y Fauna Papigochic y al sur con el ANP de Basaseachi (Conanp, 2012).

Fue decretada como Reserva Forestal Nacional y Zona de Refugio de la Fauna Silvestre el 6 de julio de 1937 y recategorizada como Área de Protección de Flora y Fauna el 27 de diciembre de 2001 (Semarnat, 2013).

Figura 1. Localización del área de estudio (ANP Tutuaca, Chih.)



Fuente: elaboración propia.

BASE DE DATOS

Los puntos de presencia de la especie *O. virginianus* se obtuvieron del portal Global Biodiversity Information Facility o GBIF (<http://www.gbif.org/>). Esta base de datos cuenta con información histórica de la especie (Fierro *et al.*, 2013). Por otro lado, la información bioclimática se obtuvo del portal WorldClim (<http://www.worldclim.org/bioclim>). Se consideraron diecinueve variables climáticas globales, las cuales se derivan de los valores mensuales de temperatura y precipitación con el fin de generar variables significativas para la distribución geográfica del venado, idoneidad del hábitat, parches de capacidad y población potencial, y corredores biológicos.

Tabla 1. Variables empleadas

Variable bioclimática	Identificador	Variable bioclimática	Identificador
Temperatura media anual	b1	NDVI 01-2015	NDVI1
Rango diurno medio	b2	NDVI 02-2015	NDVI2
Índice de variabilidad de la temperatura	b3	NDVI 03-2015	NDVI3
Estacionalidad de la temperatura	b4	NDVI 04-2015	NDVI4
Temperatura máxima del mes más cálido	b5	NDVI 05-2015	NDVI5
Temperatura mínima del mes más frío	b6	NDVI 06-2015	NDVI6
Rango anual de temperatura	b7	NDVI 07-2015	NDVI7
Temperatura media del cuarto del año más húmedo	b8	NDVI 08-2015	NDVI8
Temperatura media del cuarto del año más seco	b9	NDVI 09-2015	NDVI9
Temperatura media del cuarto del año más cálido	b10	NDVI 10-2015	NDVI10
Temperatura media del cuarto del año más frío	b11	NDVI 11-2015	NDVI11
Precipitación anual	b12	NDVI 12-2015	NDVI12
Precipitación del mes más húmedo	b13	Pendientes	slo
Precipitación del mes más seco	b14	Orientación de laderas	asp
Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de Variación)	b15	Sombreado	hill
Precipitación del cuarto del año más húmedo	b16	Acumulación de flujo	acu
Precipitación del cuarto del año más seco	b17	Uso de suelo y vegetación	uso
Precipitación del cuarto del año más cálido	b18	Modelo digital de elevación	alt
Precipitación del cuarto del año más frío	b19	Dirección de flujo	FlowDir

Fuente: elaboración propia.

Para las variables topográficas, se empleó un modelo digital de elevación (MDE) con datos provenientes de la Misión topográfica Radar Shuttle de la NASA(SRTM, por sus siglas en inglés) que se obtuvieron del portal <http://srtm.csi.cgiar.org/>. A partir de este, se crearon las variables de pendientes, orientación de laderas, dirección y acumulación de flujo, y un mapa de sombras.

Se descargó el Índice de la Diferencia Normalizada de la Vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés) para 2015, que proporciona comparaciones consistentes del verdor dosel mensual de la vegetación con una resolución espacial de 1 km² (<http://modis.gsfc.nasa.gov>).

DEPURACIÓN DE LA BASE DE DATOS

Los puntos de presencia descargados del portal GBIF se depuraron, dejando únicamente el nombre científico de la especie y sus coordenadas en X y Y en grados decimales en formato delimitado por comas o csv, por sus siglas en inglés (*.csv). Además, se eliminaron los registros que no tienen valores ni coordenadas, quedando únicamente treinta y dos puntos de presencia.

REAJUSTE ESPACIAL DE VARIABLES

Debido a que las variables fueron creadas por diferentes autores, se ajustaron espacialmente (tamaño de celda, número de columna y renglón) a 15 m² de resolución mediante las herramientas de remuestreo y extracción por máscara (Warren, & Seifert, 2011).

CORRELACIÓN DE VARIABLES

Una vez que se ajustaron las variables espacialmente, se eliminaron las variables redundantes; para ello, se extrajeron mediante los puntos de presencia los valores de las variables empleadas (Plasencia, Escalona, & Esparza, 2014).

A continuación, se exportó la tabla generada en formato dBase (*.dbf), la cual se empleó en el *software* IBM SPSS Statistics 23.0™ (Statistical Package for the Social Sciences); en este *software*, se empleó una correlación bivariada con una prueba bilateral de rho Spearman y un *Bootstrap* de 1000 repeticiones trabajando al 95 % de confianza.

Una vez generado esto, se revisaron los resultados de la prueba estadística de Spearman eliminando las variables que tuvieron valores mayores a 0.8; estas variables no son utilizadas para modelar mediante MaxEnt, ya que se usan las que no tienen correlación (Norris, 2014). En la Tabla 1 se muestran las variables utilizadas en SPSS y en la Tabla 2, las empleadas para el modelaje, las cuales se han convertido a formato ASCII (*.asc) (Villaseñor *et al.*, 2014; Martínez *et al.*, 2016), que es el formato requerido por MaxEnt, y los puntos de presencia a formato csv.

MODELACIÓN CON MAXENT

Se empleó el *software* MaxEnt desarrollado por la Universidad de Princeton (Phillips *et al.*, 2006) en su versión 3.3.3. para generar treinta réplicas (Refoyo, Olmedo, & Muñoz, 2014) empleando los puntos de presencia de especie y las variables no correlacionadas en los formatos mencionados. Las opciones que se eligieron fueron:

- Tipo de salida logístico como umbral mínimo de entrenamiento para los puntos de presencia
- Prueba de Jackknife para medir la importancia de la variable individual y grupal
- *Random seed* utilizando datos de prueba, con un 50 % (30 iteraciones)
- *Bootstrap* como tipo de remuestreo para los datos de entrenamiento, los cuales se seleccionan por muestreo con reemplazo de los puntos de presencia con el número de muestras igual al número total de puntos de presencia; el 10 percentil con tipo de salida en formato ASCII (*.asc).

VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

Para corroborar los resultados obtenidos por MaxEnt, se evaluaron los modelos mediante el análisis de la curva ROC-AUC (Receiver Operating Characteristic-Area Under Curve) (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio], 2016), este es un parámetro para evaluar el área bajo la curva que toma valores entre 1 (prueba perfecta) y 0.5 (prueba al azar) (Organismo de Supervisión de los Recursos

Forestales y de la Fauna Silvestre [OSINFOR], 2013). Este es el estadístico más empleado, el cual representa la capacidad discriminativa de un modelo para todos sus posibles puntos de corte y necesita que los datos que se evalúen sean de presencia-ausencia (Mateo, Felicísimo, & Muñoz, 2011).

GENERACIÓN DE LOS MAPAS CONSENSO Y DICOTÓMICO

Se seleccionaron los cuatro mejores modelos con base en su área bajo la curva (AUC, por sus siglas en inglés), y se transformaron del formato ASCII a ráster (*.rst), para posteriormente sumarlos mediante álgebra de mapas. A través de lo anterior, se obtuvieron los mapas consenso (suma de los cuatro mejores modelos) y el dicotómico, generado a partir de la reclasificación del mapa consenso con base en el valor medio del 10 percentil de los modelos seleccionados, donde 0 indica ausencia y 1, presencia (Alatorre *et al.*, 2015).

CORREDOR BIOLÓGICO

Mediante el *software* de ArcMap en su versión 10.3 de ESRI™ y la herramienta de Diseño de Corredores (Corridor Designer), se generó una entidad poligonal donde se determinó el área de estudio que corresponde al ANP de Tutuaca, Chihuahua, con el sistema de referencia GCS WGS 1984 UTM 13 N y se generó el corredor biológico a partir del MDE y las variables topográficas (pendientes), uso de suelo y vegetación serie v, y distancia euclidiana a carreteras (metros), además de obtener los bloques de coberturas forestales para su conectividad.

A partir del MDE, se crearon archivos ráster de perfil topográfico (crestas y valles) y distancia euclidiana de las carreteras, para así crear modelos de hábitat sustentable (HSM). Posteriormente, se generó un modelo de idoneidad de hábitat con las cuatro variables mencionadas para dicho modelo, cada una con los pesos y datos tabulares ya reclasificados correspondientes, según la especie del venado cola blanca usada por Carranza y Ocegüera (2015). Finalmente, se generaron las divisiones de los corredores biológicos con riesgo de incendio con base en Erives (2014), las cuales determinan la anchura óptima o el tamaño de un corredor en el paisaje, además de la especie en riesgo en este evento.

Resultados

De las treinta y siete variables analizadas, se emplearon doce (Tabla 2) para la modelación de *O. virginianus* que no están correlacionadas.

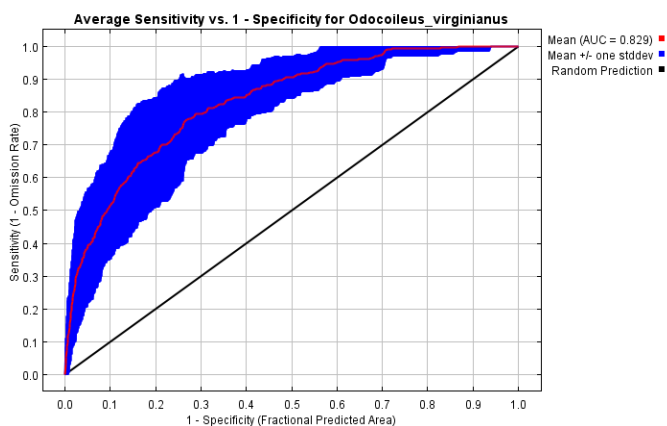
Tabla 2. Valores de AUC y variables de contribución para la especie *O. virginianus*

Variable	Identificador
Uso de suelo y vegetación	uso
Modelo digital de elevación	alt
Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de Variación)	b15
Pendientes	slo
Orientación de laderas	asp
Precipitación del cuarto del año más frío	b19
Rango diurno medio	b2
Precipitación del mes más seco	b14
NDVI 07	NDVI7
Precipitación del cuarto del año más seco	b17
Estacionalidad de la temperatura	b4
Acumulación de flujo	acu

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 2, se muestra la AUC del modelo, en donde el valor medio de este estadístico es de 0.829, indicando que es un buen modelo. Una vez obtenido este valor, se procedió a generar los siguientes resultados:

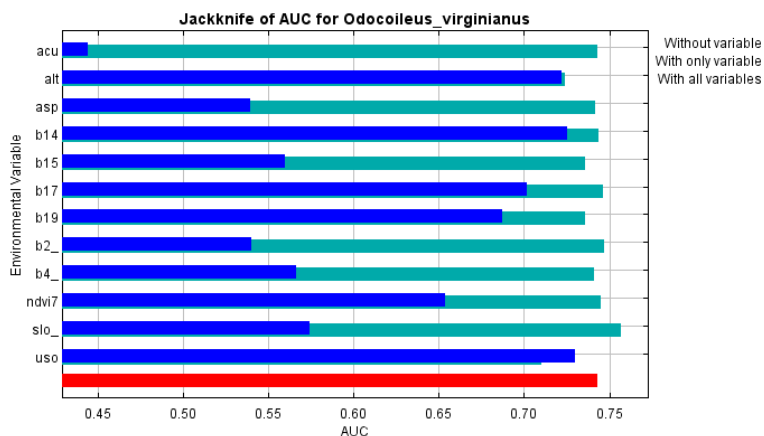
Figura 2. Estadístico de AUC para el modelado



Fuente: resultados obtenidos con MaxEnt.

La gráfica de Jackknife (Figura 3) señala las variables que aportan mayor información al modelo: las barras azules indican el comportamiento del modelo empleando esa única variable; las barras azul turquesa indican el comportamiento del modelo sin incluir dicha variable; mientras que la barra roja indica la respuesta del modelo empleando todas las variables. En este gráfico se muestran las siguientes variables: acu (acumulación de flujo), alt (modelo digital de elevación), asp (orientación de laderas), b14 (precipitación del mes más seco), b15 (estacionalidad de la precipitación), b17 (precipitación del cuarto del año más seco), b19 (precipitación del cuarto del año más frío), b2 (rango diurno medio), b4 (estacionalidad de la temperatura), NDVI7, slo (pendientes) y uso (uso de suelo y vegetación).

Figura 3. Gráfico de Jackknife obtenido a partir del modelado en MaxEnt



Fuente: resultados obtenidos con MaxEnt.

En la Tabla 3 se muestran los valores de AUC para cada modelo, así como las variables de mayor porcentaje de contribución para cada réplica, donde las principales fueron modelo 24 altura (47.1 %), modelo 5 altura (47.9 %), modelo 7 uso (64.4 %) y modelo 17 altura (63.1 %).

Tabla 3. Valores de AUC y porcentaje de contribución de las variables para la especie *O. virginianus*

Modelo	AUC	10 percentil	Identificador	Porcentaje
24	0.8708	0.4341	alt	47.1
			uso	39.2
			b19	4.8
			b4	3
5	0.8575	0.2483	alt	47.9
			uso	22.2
			b15	21.8
			NDVI7	3
7	0.8393	0.3589	uso	64.4
			b15	23.6
			b19	5.9

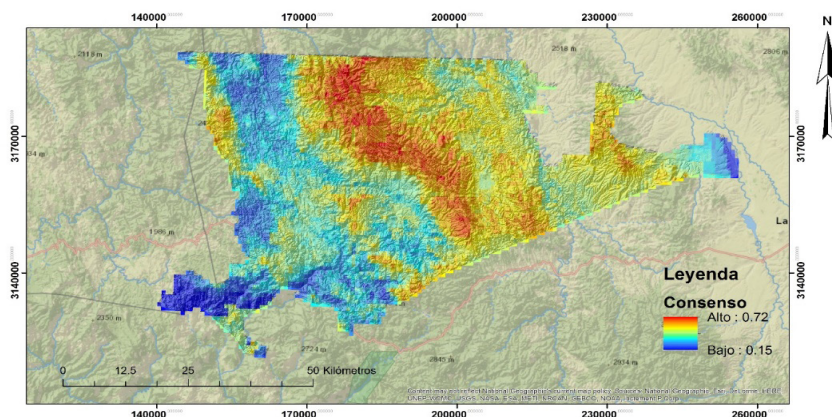
Continúa...

Modelo	AUC	10 percentil	Identificador	Porcentaje
17	0.8352	0.2737	asp	5
			alt	63.1
			b15	23.8
			uso	8
			b19	4.9

Fuente: elaboración propia.

De las treinta réplicas de distribución potencial para la especie analizada, con base en los cuatro mejores modelos (5, 7, 17 y 24 de 30), se generó el mapa consenso (Figura 4) con un valor mínimo de 0.15 y máximo de 0.72, que muestra la región que presenta mejores condiciones ambientales para el desarrollo de *O. virginianus*.

Figura 4. Mapa consenso (descripción de la suma de los cuatro mejores modelos)

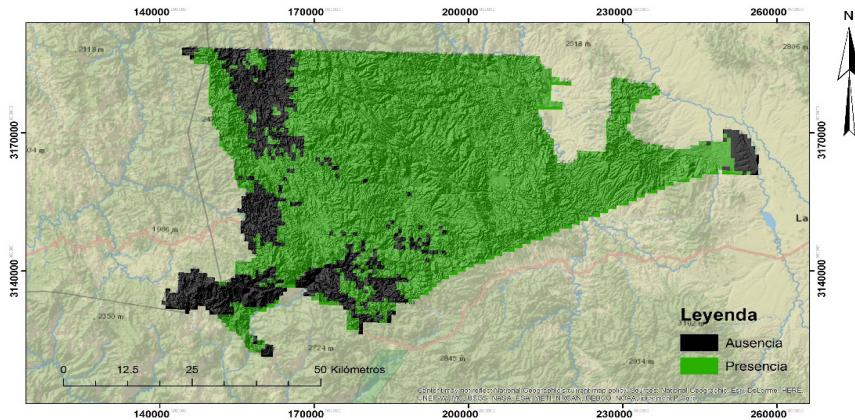


Fuente: elaboración propia.

Se realizó la reclasificación tomando como referencia el mapa consenso para generar el mapa dicotómico (Figura 5), que determina las zonas de presencia-ausencia de la especie, calculado a partir del valor de umbral del 10 percentil (0.328). El mapa dicotómico indica las zonas de

presencia-ausencia en un área total de 388 097.50 ha, donde la presencia de la especie tiende a ocupar la mayor parte de la zona de estudio con un área de 318 907.30 ha de condiciones idóneas para el desarrollo biológico del venado cola blanca.

Figura 5. Mapa de presencia-ausencia de la especie *O. virginianus*

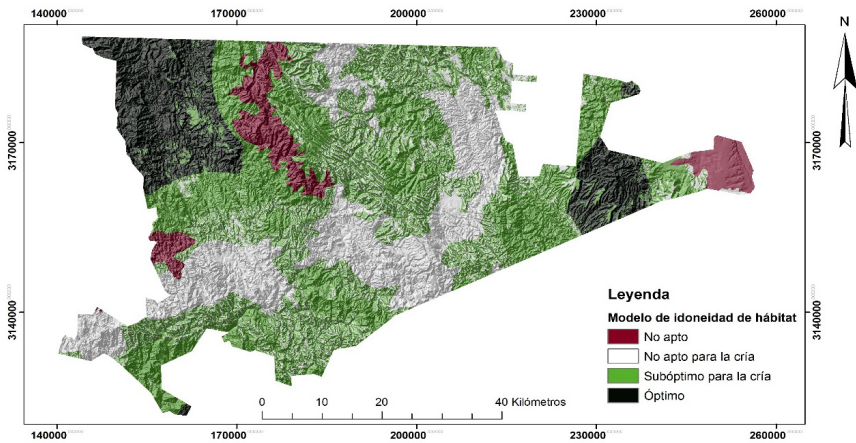


Fuente: elaboración propia.

En cuanto a corredores biológicos, se creó el mapa de idoneidad de hábitat generado con base en cuatro variables topográficas: uso de suelo y vegetación, altitud, pendientes y distancia a carreteras; cada una de ellas con sus archivos tipo texto que contienen información de la reclasificación de las variables continuas, donde se les asignaron valores de ponderación (Tabla 4), estableciendo en cada variable la importancia de peso de cada factor de hábitat correspondiente, de acuerdo con los expertos de la especie (Tablas 5-8).

Al visualizar el resultado final del mapa de idoneidad de hábitat, se puede observar que está clasificado en cuatro grandes áreas: no apto, no apto para la cría, subóptimo para la cría y óptimo. Se aprecia que las zonas óptimas para la especie se presentan en los tonos más oscuros de la leyenda, ubicados en la parte noroeste y noreste del ANP (Figura 6); asimismo, se determina que la gran parte del área de estudio presenta condiciones subóptimas para la cría.

Figura 6. Mapa de idoneidad de hábitat para la especie *O. virginianus*



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Ponderación general de variables para la especie *O. virginianus*

Variable	Ponderación general
Altitud	30
Pendiente	15
Distancia a carreteras	5
Uso de suelo y vegetación	50

Fuente: Carranza y Ocegüera (2015).

Tabla 5. Ponderación de las clases dentro de cada variable para altitud

Altitud		
Rangos		Pesos
782	1308	10
1308	1597	20
1597	1778	20
1778	1937	40
1937	2091	60
2091	2253	100
2253	2431	100
2431	2762	100

Fuente: Carranza y Ocegüera (2015).

Tabla 6. Ponderación de las clases dentro de cada variable para pendiente

Pendiente	
Rangos	Pesos
1	78
2	44
3	78
4	67

Fuente: Carranza y Ocegüera (2015).

Tabla 7. Ponderación de las clases dentro de cada variable para distancia a carreteras

Distancia a carreteras		
Rangos		Pesos
0	3887	10
3887	9269	20
9269	15967	40
15967	23471	80
23471	38121	100

Fuente: Carranza y Ocegüera (2015).

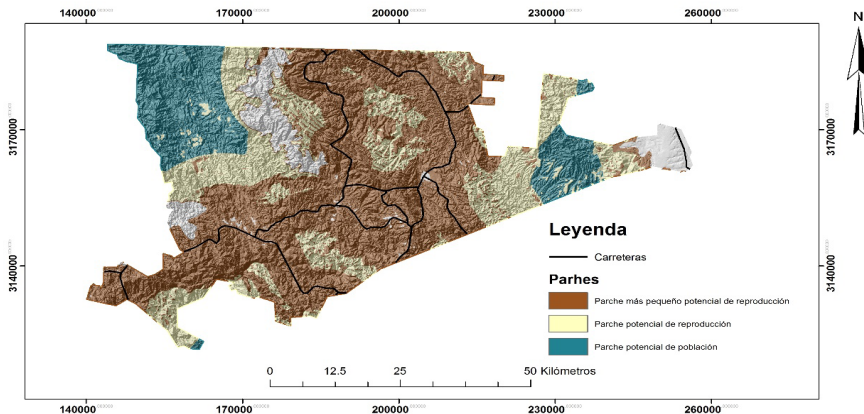
Tabla 8. Ponderación de las clases dentro de cada variable para uso de suelo y vegetación

Uso de suelo y vegetación	
Clase	Pesos
Usos no forestales	0
Bosque de latifoliadas	100
Bosque de coníferas y latifoliadas	90
Bosque fragmentado	0
Selva baja	100
Áreas perturbadas	0

Fuente: Carranza y Ocegüera (2015).

El mapa de parches del venado se generó a partir del modelo de idoneidad de hábitat, agregando el insumo de carreteras para determinar las áreas con parches de población potencial y reproducción potencial para la especie. Las zonas en azul (Figura 7) indican potencial poblacional con un área de 59 334.70 ha, mientras que en amarillo se indican las regiones aptas para la reproducción del venado con un área de 91 615.55 ha; los parches en color café revelan que no son óptimos para el establecimiento de la especie con un área de 216 065.09 ha.

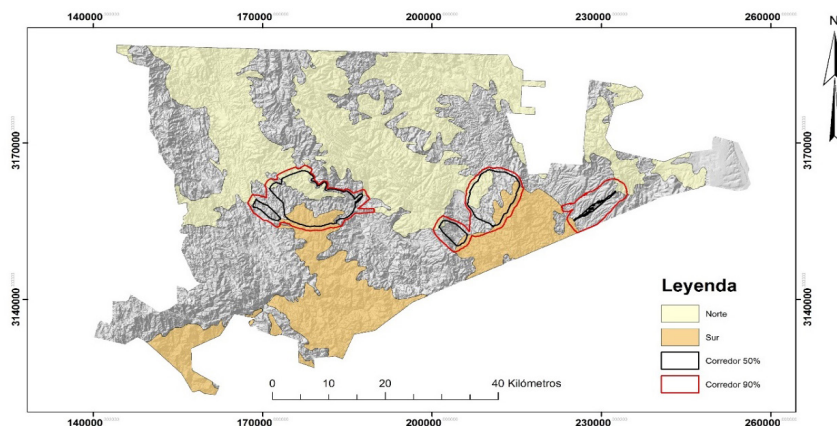
Figura 7. Mapa de parches para la especie *O. virginianus*



Fuente: elaboración propia.

Para los corredores biológicos, se emplearon como insumos el modelo de idoneidad de hábitat y los bloques (Figura 8). Se generaron 10 corredores del 10 % al 100 %, de los cuales se eligieron los corredores de 50 % y 90 %, debido a que son los que indican una conectividad entre los bloques de norte y sur, con un área considerable para el desplazamiento del venado cola blanca. El corredor de 50 % abarca un área de 19 387.49 ha y el de 90 %, un área de 34 854.23 ha.

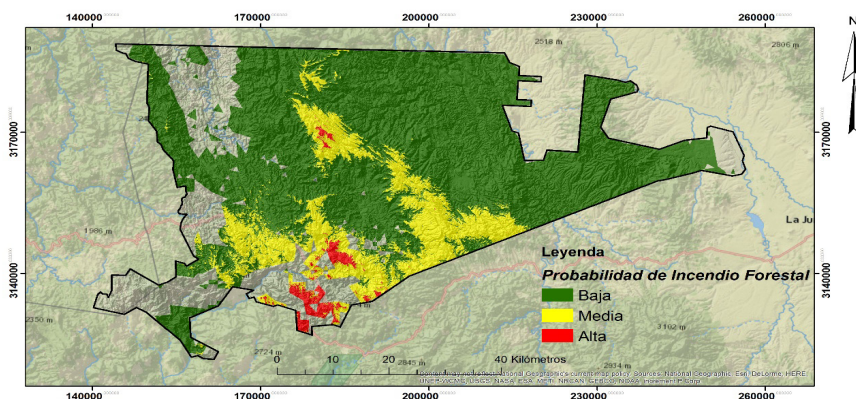
Figura 8. Mapa de corredores biológicos para la especie *O. virginianus*



Fuente: elaboración propia.

Se empleó la cartografía de probabilidad de incendio dentro del ANP, donde únicamente se extrajeron los valores de probabilidad en las zonas de presencia de la especie, demostrando que la probabilidad baja de incendio cubre un área de 250 333.27 ha; probabilidad media, 6221.27 ha y 5101.56 ha con probabilidad alta, que se presenta en las áreas de color rojo, como se muestra en la Figura 9.

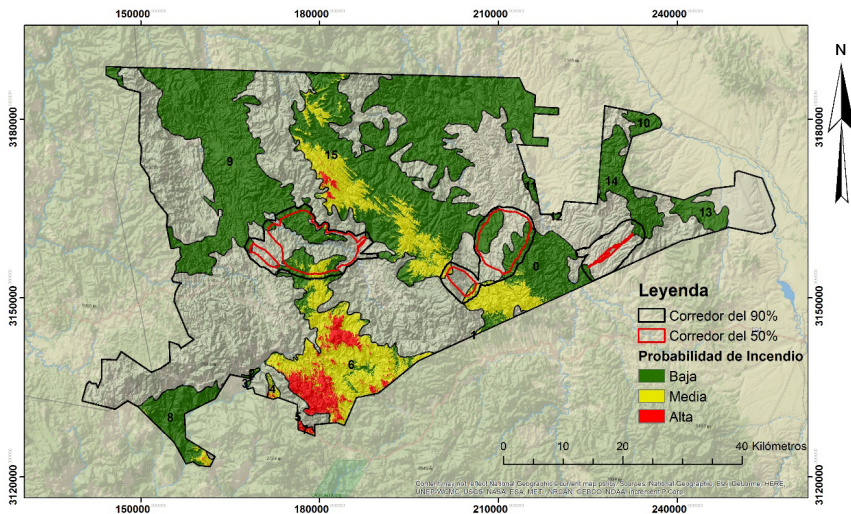
Figura 9. Mapa de probabilidad de incendios forestales en zonas de presencia de la especie *O. virginianus*



Fuente: elaboración propia.

Al emplear la cartografía de probabilidad de incendio, se extrajeron los valores únicamente de los bloques, agregando los corredores seleccionados (50 % y 90 %), donde se indica que dentro de ellos se presentan las categorías de baja, media y alta probabilidad de tener un incendio. En la Figura 10 se muestra el corredor de 90 %, el cual contiene zonas de riesgo de incendio con un área de 31 004.08 ha para la categoría de riesgo bajo; 3580.43 ha para la de riesgo medio y 2.21 ha para la categoría de riesgo alto. En lo que se refiere al corredor de 50 %, las áreas estimadas de riesgo son de 17 585.95 ha para la categoría de riesgo bajo y 1615.45 ha para la de riesgo medio.

Figura 10. Mapa de probabilidad de incendio dentro de corredores biológicos para la especie *O. virginianus*



Fuente: elaboración propia.

Discusión

En este estudio se cumplieron los objetivos planteados, obteniendo las cartografías de probabilidad de incendio para la especie *O. virginianus* en el ANP de Tutuaca sobre su distribución potencial, idoneidad de hábi-

tat, parches de reproducción y población, así como la de los corredores biológicos. Se cumplió así la hipótesis planteada, que menciona que se pueden estimar las zonas de probabilidad de incendios dentro de los corredores para su conectividad y conservación.

El método de MaxEnt permite modelar la distribución potencial de especies, el cual se utilizó en este trabajo, ya que, como señalan Phillips *et al.* (2006), este algoritmo es un formato robusto cuando la prevalencia es desconocida y más fácil de interpretar como la probabilidad de presencia de una especie.

Anteriormente para el estado de Chihuahua se han realizado estudios de distribución potencial para la misma especie con el mismo algoritmo. Estos estudios utilizan variables bioclimáticas y topográficas para obtener como resultado cartografías de esta distribución (Fierro *et al.*, 2013).

En este trabajo, se obtuvieron las variables que mejor representan la distribución de la especie *O. virginianus*, las cuales fueron altura y uso de suelo, coincidiendo con lo que mencionan Carranza y Ocegüera (2015) acerca de que son las variables de mayor importancia para el posible desarrollo biológico dentro del área estudiada (Bolívar, 2009). Por otra parte, Pulido *et al.* (2015) mencionan que estas variables son efectivas, porque estiman el aporte y la importancia de cada variable en la distribución de la especie.

Los resultados obtenidos fueron evaluados mediante el análisis de la curva ROC-AUC, que determina la habilidad predictiva de los modelos de distribución generados por medio de un gráfico (Palma, & Delgadillo, 2014); también evalúa el área bajo la curva tomando valores entre 1 (prueba perfecta) y 0.5 (prueba al azar), así como lo menciona Conabio (2016).

Por medio del estadístico de Jackknife fue posible determinar la contribución relativa de cada una de las variables a los modelos generados, mostrando las más importantes para la especie; asimismo, analizando el comportamiento de las variables dependientes e independientes.

De acuerdo con Carranza y Ocegüera (2015), los corredores biológicos se generaron a partir de variables topográficas para la elaboración de mapas de capacidad de hábitat sustentable, parches de población y reproducción; con esta información se crearon los corredores de 50 % y

90 %. Este tipo información coincide con trabajos similares como el de la OSINFOR (2013), los cuales a partir de estos métodos y técnicas generaron resultados satisfactorios para determinar las regiones aptas para la conectividad y conservación de la especie.

Los SIG permitieron la generación de cartografías de probabilidad de riesgo de incendios dentro de los corredores biológicos. Esta información es de gran importancia para quienes toman decisiones en relación con zonas de conservación en riesgo de incendios; así como de ecosistemas en las regiones de interés, ya sea de importancia ecológica o como ANP. Dichos resultados concuerdan con lo mencionado por Rodríguez *et al.* (2011).

Al igual que Ibarra y Huerta (2014) mediante los SIG se pueden determinar las zonas que tienen un alto potencial de incendios, donde las variables climáticas que contribuyen al desarrollo del fuego son pendientes pronunciadas y con cobertura de encino y de pino-encino, haciendo vulnerables los ecosistemas de las zonas donde se presentan estos fenómenos.

Conclusiones

El venado cola blanca es una especie en peligro de extinción que se encuentra en el ANP de Tutuaca en el estado de Chihuahua. Se distribuye por la mayor parte del área estudiada, lo que coincide con trabajos anteriores en los que se ha generado su distribución potencial donde los rangos altitudinales se encuentran muy amplios; considerando que la combinación de variables bioclimáticas y biofísicas fueron de gran importancia para determinar una distribución potencial y actual.

Las características de idoneidad de hábitat son aptas para la especie, debido a que presentan bloques con condiciones topográficas determinantes para el desarrollo biológico y de conservación de *O. virginianus*.

Las coberturas que predominan dentro de la idoneidad de hábitat están dadas por bosque de latifoliada y bosque de coníferas con latifoliada, ya que son factores determinantes para la reproducción y aumento poblacional de la especie; así como probablemente podrían ser zonas adecuadas de protección y de descanso, dependiendo de la actividad que

ejercen, por ejemplo, se podría decir que el venado prefiere diferentes coberturas, ya sea para alimentación, protección o descanso.

En este trabajo, se crearon corredores biológicos como propuesta para la conectividad y distribución del venado cola blanca con base en datos biológicos mínimos de la especie, así como altitud, usos de suelo y pendientes, por lo que es necesario que los insumos sean de buena calidad para obtener resultados confiables.

La probabilidad de incendio dentro del área de estudio está dada por tres categorías: baja, media y alta, donde gran parte de la superficie idónea corresponde a la categoría baja y pocas regiones a la alta. Dentro de los corredores no se presentó probabilidad alta, por lo consecuente los corredores generados son una buena alternativa para la conectividad, distribución y conservación de los ecosistemas.

Los SIG han demostrado ser una herramienta útil para la generación de cartografías de idoneidad de hábitat sustentable, parches de población y reproducción, corredores biológicos y probabilidad de incendio dentro de los mismos corredores, con la finalidad de proteger la biodiversidad, mantener la conectividad y, sobre todo, conservar el equilibrio dentro de las ANP.

Literatura citada

- Alatorre, L. C., Torres, M. E., Rojas, H. L., Bravo, L. C., Wiebe, L. C., Sandoval, F., & López, E. (coords.) (2015). *Geoinformática aplicada a procesos geoambientales en el contexto local y regional: teledetección y sistemas de información geográfica*. Ciudad Juárez: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
- Álvarez, M. F., Rodríguez, J. R., Fernández, N., & Gil, S. (2003). *Los sistemas de información geográfica aplicados a la prevención de incendios forestales. Propuesta para la planificación de la quema de rastrojos en la Comarca de Aranda de Duero (Burgos)*. Presentado en la 5ª Semana Geomática "Cartografía, Telemática y Navegación", Barcelona. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10612/2675>

- Amaya, D., & Armenteras, D. (2012). Incidencia de incendios sobre la vegetación de Cundinamarca y Bogotá, DC (Colombia), entre 2001 y 2010. *Acta Biológica Colombiana*, 17(1), 143-158.
- Bolívar, B. S. (2009). *Análisis del hábitat óptimo y modelado de nicho ecológico para la conservación del venado cola blanca en el centro de Veracruz* (Tesis de maestría). Recuperado de <https://docplayer.es/38343137-Analisis-del-habitat-optimo-y-modelado-de-nicho-ecologico-para-la-conservacion-del-venado-cola-blanca-en-el-centro-de-veracruz.html>
- Boraschi, S. F. (2009). Corredores biológicos: una estrategia de conservación en el manejo de cuencas hidrográficas. *Kurú. Revista Forestal Mesoamericana*, 6(17), 1-5, 2215-2504.
- Caranza y Ocegüera (2015), Peligro, L.D.P.M.E. Informe sobre el estado de la migración de la mariposa monarca y solicitud para incluir la reserva de la biósfera mariposa monarca.
- Castañeda, M. F., Endara, Á. R., Villers, M. L., & Nava, E. G. (2015). Evaluación forestal y de combustibles en bosques de *Pinus hartwegii* en el Estado de México según densidades de cobertura y vulnerabilidad a incendios. *Madera y Bosques*, 21(2), 21, 45-58.
- Cerano, J., Villanueva, J., & Fulé, P. (2010). Reconstrucción de incendios y su relación con el clima para la reserva cerro El Mohinora, Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 63-74.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp) (2012). Monitoreo de la cotorra serrana occidental (*Rhynchopsitta pachyrhyncha*) en las Áreas de Protección de Flora y Fauna Tutuaca, Campo Verde, Papigochic y la Región Prioritaria para la Conservación Madera, en el estado de Chihuahua. Recuperado de https://simec.conanp.gob.mx/ficha_monitoreo.php?menu=1&id=14
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) (2016). MaxEnt. En *Nichos y Áreas de Distribución*. Recuperado de <http://nicho.conabio.gob.mx/la-calibracion-del-modelo/maxent>.
- Conafor (2010). Entidades de la Administración Federal y gobiernos estatales. Consultado en mayo 2020, disponible en: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/7/247CONAFOR,%20>

- entidades%20y%20Gobierno%20Federal,%20preparados%20para%20la%20temporada%20de%20incendios%202010.pdf
- Duarte, G., & Piqué, T. (2001). NTP 599: *Evaluación del riesgo de incendio: criterios*. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, España. Recuperado de [www.insst.es › documents › ntp_599.pdf](http://www.insst.es/documents/ntp_599.pdf)
- Erives, V. (2014). Estimación de zonas con probabilidad a incendio forestal en las ANP Tutuaca y Papigochi: una exploración mediante regresión logística (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez.
- Fierro, C. D., Torres, M. E., Alatorre, L. C., & Rojas, H. L. (2013). Modelado de nicho ecológico para la predicción del área de distribución actual y potencial del venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*) en el estado de Chihuahua. En L. C. Alatorre, M. E. Torres, H. L. Rojas, L. C. Bravo, L. C. Wiebe, F. Sandoval, & E. López (coords.), *Geoinformática aplicada a procesos geoambientales en el contexto local y regional: tele-detección y sistemas de información geográfica* (pp. 369-387). Ciudad Juárez: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
- Ibarra, J. L., & Huerta, F. M. (2014). Modelado espacial de incendios: una herramienta predictiva para el bosque La Primavera, Jalisco, México. *Revista Ambiente & Água*, 11(1), 445-458.
- Isaacs, P. J. (2011). Modelo de conectividad espacial empleando sistemas de información geográfica, calidad de hábitat y distribución caso tapir de montaña (*Tapirus pinchaque*) en el Eje Cafetero colombiano (Tesis de maestría). Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/49475>
- Manzo, L., Sánchez, S., & Álvarez, R. (2009). *Evaluación del riesgo de incendio estacional usando NOAA-AVHRR: consideraciones preliminares en México*. Presentado en el XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Calatayud. Recuperado de www.aet.org.es/congresos/xiii/cal69.pdf
- Martínez, N., Aguirre, É., Eguiarte, L. E., & Jaramillo, J. P. (2016). Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (Pinaceae) en México: algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences*, 94(1), 5-24.

- Mas, J. F. (coord.) (2011). *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio* [Libro electrónico]. doi: 10.22201/ciga.9786077908555e.2011
- Mateo, R., Felicísimo, Á., & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84(2), 217-240.
- Moizo, P. (2004). La percepción remota y la tecnología SIG: una aplicación en ecología de paisaje. *GeoFocus. Revista Internacional Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica* (4), 1-24.
- Montalvo, N. (1998). Determinación de áreas con riesgo potencial de erosión con sistemas de información geográfica y percepción remota sector: Quebrada La Solana, río Quiroz, margen izquierda río Macara. Piura-región Grau . En A. Maskrey (ed.), *Navegando entre brumas. La aplicación de los sistemas de información geográfica al análisis de riesgo en América Latina*. Red de estudios sociales en Prevención de desastres en América Latina. Recuperado de <https://www.desenredando.org/public/libros/1998/neb/>
- Morfín, J. E., Jardel, E. J., Michel, J. M., E. Alvarado (2012). *Caracterización y cuantificación de combustibles forestales*. Guadalajara: Comisión Nacional Forestal/Universidad de Guadalajara.
- Nasi, R., Dennis, R., Meijaard, E., Applegate, G., & Moore, P. (2002). Los incendios forestales y la diversidad biológica. *Unasylva. Revista Internacional de Silvicultura e Industrias Forestales*, 53(209), 36-40.
- Norris, D. (2014). Model Thresholds are More Important than Presence Location Type: Understanding the Distribution of Lowland Tapir (*Tapirus terrestris*) in a Continuous Atlantic Forest of Southeast Brazil. *Tropical Conservation Science*, 77(33), 529-547.
- Organismo de Supervisión de los Recursos Forestales y de la Fauna Silvestre (OSINFOR) (2013). *Modelamiento espacial de nichos ecológicos para la evaluación de presencia de especies forestales maderables en la amazonía peruana*. Recuperado de <https://www.osinfor.gob.pe/publicaciones/modelamiento-espacial-de-nichos-ecologicos-para-la-evaluacion-de-presencia-de-especies-forestales-maderables-en-la-amazonia-peruana/>

- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259.
- Plasencia, A. H., Escalona, G., & Esparza, L. G. (2014). Modelación de la distribución geográfica potencial de dos especies de psitácidos neotropicales utilizando variables climáticas y topográficas. *Acta Zoológica Mexicana*, 30(3), 471-490.
- Pulido, L. A., Rudas, A., Betancourt, J. A., Grant, W. E., & Vílchez, S. J. (2015). Distribución inusual y potencial de la garrapata común del gana-

Patrones de distribución de H5N1 y H1N1, y riesgo en América del Norte

Daniel Núñez Salazar • María Elena Torres Olave • Mario Iván Uc Campos
• Manuel O. González León • Luis Carlos Bravo Peña • Luis Carlos Alatorre Cejudo

Los virus gripales altamente patógenos tipo A (H5N1 y H1N1, entre otros) han sido responsables de las pandemias humanas graves y pueden ser encontrados en seres humanos, cerdos, aves, caballos, mamíferos acuáticos, gatos y caninos, por lo cual existe la posibilidad de transmisión de dichos virus de los animales a los seres humanos y viceversa (Cheung, & Poon, 2007; Iftimovici *et al.*, 1979). Los síntomas iniciales de la infección por las gripes tipo A de las cepas H5N1 y H1N1 son problemas respiratorios habituales de cualquier resfriado común, pero que rápidamente progresan a una forma más complicada (Newman *et al.*, 2008).

En 1992, el Instituto de Medicina de Estados Unidos definió como enfermedades emergentes aquellas cuya incidencia (número de casos nuevos de una enfermedad en una población y en un periodo determinados) se ha incrementado desde hace veinte años, o que amenaza con acrecentarse en un futuro; dentro de las cuales se encuentran los virus de la influenza. De estos se tiene al menos conocimiento de dos tipos de virus que son pandémicos y de importancia médica: H5N1 y H1N1 (World Health Organization [WHO], 2005). En el ámbito mundial desde 2003 han ocurrido severos brotes de influenza aviar de alta patogenicidad H5N1 (IAAP – H5N1, por sus siglas en inglés) en aves de corral, aves silvestres y seres humanos (Isoda *et al.*, 2006).

Por otro lado, se observa que la pandemia de la gripe porcina H1N1 en 1918-1919 causó la muerte a nivel mundial de veinte a cuarenta millones de personas, lo que representó de 2.5 a 5 % de la población global, y se calcula que, al menos, 20 % de la población mundial se infectó con el virus H1N1 (Hilleman, 2002; Webster *et al.*, 1992).

El virus influenza A (H1N1), inicialmente llamado influenza porcina, se originó a través de una recombinación triple de virus de origen humano, aviar y porcino; su circulación se detectó inicialmente en cerdos y en algunos casos humanos en Estados Unidos en 1998 y 2005 (Vincent *et al.*, 2008).

Se observa que el virus de la gripe aviar (H5N1) se disemina a través de las aves migratorias silvestres (familia *Anatidae* [patos y gansos]), granjas avícolas con deficientes medidas de bioseguridad, traslado de aves de corral y productos avícolas, mercados de aves vivas y el comercio legal e ilegal de aves silvestres (Bonn, 2006). La epizootia (enfermedad contagiosa que ataca a un número inusual de animales al mismo tiempo y lugar, y se propaga con rapidez) de la gripe aviar altamente patógena H5N1 tuvo su origen en Asia, diseminándose en forma progresiva al Medio Oriente, Europa y África (Morris, & Jackson, 2005).

La mayor parte de los países señalan el contacto con personas enfermas como la fuente de contagio del virus. No se había demostrado transmisión natural de un cerdo a otro, debido a que el virus necesitaba cepas de humanos y de aves para que se activara, fue hasta muy recientemente, en el brote de Noruega, cuando veintitrés granjas resultaron infectadas por transmisión de un cerdo a otro (Hofshagen *et al.*, 2009). Por otro lado, se observa que las personas que trabajan en grandes instalaciones de cerdos y aves tienen un mayor riesgo de contraer infecciones por los virus de influenza y, a su vez, pueden transmitir dichos virus tanto a los cerdos como a las aves (Gray, Trampel, & Roth, 2007).

INCUBACIÓN

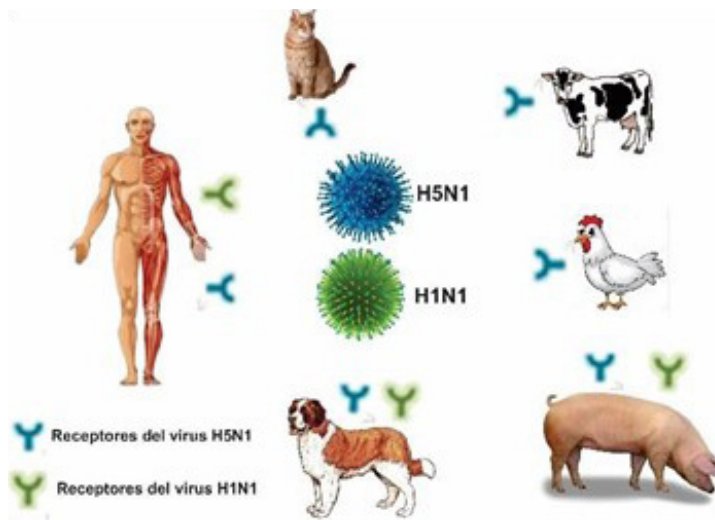
El H5N1, en el caso de los anátidos (patos y gansos), coloniza las células intestinales sin causar enfermedad, luego se excreta en altas concentraciones por las heces, lo que indica que las aves acuáticas tienen una manera muy eficiente de transmitir los virus (Brown *et al.*, 2007). Puesto

que una gran cantidad de patos jóvenes susceptibles emigran cada año a través del mundo, muchos pájaros son infectados por la presencia del virus en el agua; esto explicaría la alta incidencia de la infección en los anátidos: hasta un 30 % está infectado antes de la inmigración (Weber, & Stilianakis, 2007).

RECEPTORES DE LOS VIRUS H5N1 Y H1N1

En la Figura 1 se pueden observar los diversos receptores de los virus H5N1 y H1N1. El cuerpo humano es receptor de ambos virus, de igual manera, el cerdo y los perros; mientras que las aves de corral (gallinas) son receptoras únicamente del virus H5N1 (Echeverry, & Rodas, 2011). Actualmente en Norteamérica no se han realizado estudios de la coincidencia espacial y riesgos de la gripe aviar (H5N1) y de la gripe porcina (H1N1).

Figura 1. Receptores de los virus H5N1 y H1N1



Fuente: elaboración propia con base en Echeverry y Rodas (2011).

SÍNTOMAS DE LOS VIRUS H5N1 Y H1N1

Algunos de los pacientes infectados con el virus H5N1 pueden desarrollar problemas gastrointestinales, que pueden ir acompañados de diarrea, vómito y dolor abdominal, y que en su mayoría ocasionan pérdidas huma-

nas (Gambotto *et al.*, 2008). Las cepas pandémicas de la influenza H1N1 han mostrado síntomas muy similares a los descritos para el subtipo H5N1, como se describe en el peor de estos brotes en 1918, solo que en el subtipo H5N1 el virus se concentra directamente en los pulmones ocasionando la muerte en la mayoría de los casos, mientras que en el H1N1 el virus presenta una mayor afección en la tráquea (Shenderovich *et al.*, 1979).

Se observa que los sistemas de información geográfica (SIG) se utilizan básicamente para analizar la asociación entre medioambiente y enfermedad. Actualmente, se amplían sus aplicaciones por la necesidad de incrementar la eficiencia de los programas de salud en la toma de decisiones, debido a la limitación de recursos y al proceso de descentralización de los servicios de salud en la mayoría de los países (Bottinelli *et al.*, 2002). La vigilancia epidemiológica basada en la evaluación del riesgo de exposición se focaliza en los estratos de la población que presentan una mayor probabilidad de contraer los virus (Stärk *et al.*, 2006). La vigilancia epidemiológica de la influenza aviar de alta patogenicidad basada en evaluación del riesgo es recomendada por la Organización Mundial de Sanidad Animal (OIE [por sus siglas en inglés], 2007).

Por todo lo anteriormente mencionado, el análisis de la distribución espacial de *Branta canadensis* (ganso canadiense) y de los casos confirmados de H1N1 en seres humanos, así como la estimación de riesgo en zonas de importancia epidemiológica, pueden ser de gran utilidad para detectar áreas de primer contacto con las gripes aviar (H5N1) y porcina (H1N1).

Antecedentes

Los anátidos migratorios juegan un papel muy importante en la propagación a larga distancia del virus de la gripe aviar altamente patógena desde Asia hasta Europa y, posteriormente, a África y América del Norte (Gilbert *et al.*, 2006). El subtipo H5N1 de la IAAP no se encuentra presente en el continente americano, pero las rutas migratorias, el comercio de productos avícolas, el movimiento de personas y otros factores de riesgo hacen que el continente esté expuesto a sufrir la introducción del virus en un momento dado (Food and Agriculture Organization of the United

Nations [FAO], 2006). Otros subtipos virales de alta patogenicidad se han presentado en México en 1994 (H5N2), por lo que queda en evidencia la factibilidad para que este tipo de virus infecte a las poblaciones de aves de la región, pero también la capacidad de algunos países para detectar, controlar y erradicar la enfermedad (Krauss *et al.*, 2004).

El virus de influenza H1N1 circulaba desde 1918 en la población humana como único virus de influenza. La pandemia de 1957 se inició cuando un virus de origen aviar del subtipo H2N2 aportó, mediante una unión, tres genes al virus H1N1 circulante, lo que se denomina variación genética. Los genes donados fueron los de la HA, NA y PB1 (Belshe, 2005; Kawaoka, Krauss, & Webster, 1989). La gripe A (H1N1) de 2009 es una pandemia causada por una variante de la influenza-virus de tipo A de origen porcino. El origen de la infección es una variante de la cepa H1N1, que contiene material genético proveniente de una cepa aviar, dos porcinas y una humana, que sufrió una mutación y dio un salto entre especies de los cerdos a los seres humanos, para luego contagiarse de persona a persona (Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2009a).

Las enfermedades transmitidas por vectores constituyen un grave riesgo para los seres humanos y una constante preocupación para las autoridades sanitarias, porque la salud y la enfermedad están relacionadas con el ambiente y las formas de vida del hombre (OPS, 1996).

DESCRIPCIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LA ESPECIE

Branta canadensis, también conocido como ganso canadiense, es un ave anseriforme de la familia *Anatidae*; es nativa de Canadá y Estados Unidos y en época de invierno se refugia en México, a partir de los meses de octubre y noviembre. Dentro de Norteamérica se encuentran las principales rutas migratorias que tienen estas aves (Integrated Taxonomic Information System [ITIS], 2013) (Figura 2).

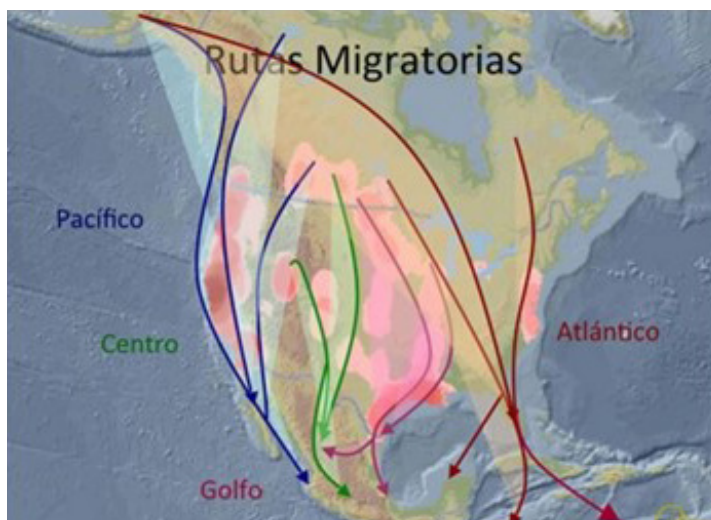
Históricamente, la situación de la especie estuvo amenazada como consecuencia de la depredación que se hizo sobre la misma entre comienzos del siglo XIX y mediados del XIX. Sin embargo, una serie de leyes conservacionistas y la dedicación de las agencias protectoras de la vida salvaje de Canadá y Estados Unidos lograron revertir la situación,

llegando a duplicarse en 1974 la cantidad de individuos que había hacia 1950 (BirdLife International, 2009).

INTERACCIÓN DE LA ESPECIE CON EL SER HUMANO

Las poblaciones de estas aves se han establecido en las zonas urbanas y suburbanas, donde se sitúan en los campos de césped. También se ven a menudo en tierras agrícolas (Yarza, 2012).

Figura 2. Principales rutas migratorias de aves acuáticas



Fuente: DUMAC (2008).

Se observa que los virus de origen animal, como los de la gripe aviar de los subtipos H5N1 y H9N2 o los de la gripe porcina de los subtipos H1N1 y H3N2, pueden causar enfermedades cuando infectan al ser humano (Brown *et al.*, 2006).

Por otra parte, los cerdos han jugado un papel importante como intermediarios en la propagación de los virus de la gripe de las aves a las personas, combinando los materiales genéticos de las gripes porcina y aviaria, incluyendo su capacidad para infectar a otros huéspedes (Goteira, & Valero, 2009). Podría potencialmente causar una pandemia si guar-

dase suficientes genes del virus humano para permitir una transmisión interhumana eficaz (Matrosovich *et al.*, 1997).

El principal factor de riesgo de infección humana parece ser la exposición directa o indirecta a animales infectados, vivos o muertos, o a entornos contaminados (Brown *et al.*, 2007).

SIG y vigilancia epidemiológica

Los SIG se han venido desarrollando por más de veinte años y aplicando en diversas ramas de la ciencia. En el sector de la salud pública, en particular en la epidemiología, los SIG ofrecen múltiples oportunidades; a la vez que brindan una perspectiva espacial de las enfermedades, constituyen una poderosa herramienta para facilitar los procesos de análisis de la información y de la toma de decisiones en los servicios de salud. La utilización de los SIG permite ampliar las posibilidades en el monitoreo y control del fenómeno salud-enfermedad, siendo de gran utilidad para el análisis espacial y temporal de los eventos y para generar nuevas hipótesis de investigación (Clarke, McLafferty, & Tempalski, 1996). Dentro de estas nuevas tecnologías, el modelado de nicho ecológico (MNE) es probablemente el método más adecuado que actualmente existe para estimar la distribución geográfica real y potencial de las especies (Guisan, & Thuiller, 2005). Se denomina nicho ecológico a la estrategia de supervivencia utilizada por una especie, que incluye la forma de alimentarse, de competir con otras, de cazar, de evitar ser comida. Se refiere no solo al espacio físico ocupado por un organismo, sino también a algunos fenómenos biológicos (como las enfermedades de transmisión, por ejemplo la gripe aviar H5N1 y la gripe porcina H1N1) (Margalef, 1981).

Por otro lado, se observa que el algoritmo de Máxima Entropía (MaxEnt), *software* desarrollado por Philips, Anderson, & Schapire (2006), se utiliza para modelar el nicho ecológico y predecir la distribución de las especies. En general, este algoritmo detecta las relaciones no aleatorias entre dos conjuntos de datos: a) los registros georreferenciados de la presencia de la especie y b) un conjunto de coberturas tipo ráster, de datos digitales que representan las variables físico-químicas y biológicas

pertinentes para determinar la distribución de la especie en una escala particular de análisis (Phillips *et al.*, 2006).

Hasta septiembre de 2007, se ha confirmado la muerte de 200 personas en once de los doce países donde se detectó la infección del virus A(H1N1) en seres humanos; mientras que la OMS (WHO, 2009) contabilizó 16 000 defunciones en 64 países en 2009; cifras que se pueden comparar con la pandemia por influenza en 1918, que van de 20 a 40 millones de muertes (López *et al.*, 2009). Sin embargo, la transmisión sostenida del virus entre personas aún no se ha producido (FAO, 2006), por lo que luchar contra la enfermedad en las aves domésticas y silvestres es esencial para reducir la cantidad de virus circulante, disminuyendo con ello el riesgo de contagio en el ser humano y la amenaza de una posible pandemia de influenza humana (Dotis, & Roilides, 2009).

Los brotes de gripe aviar altamente patógena pueden causar grandes pérdidas para el sector avícola, porcícola y de turismo cinegético, además de que pueden provocar riesgos para el bienestar humano (Gensheimer *et al.*, 2003). Aunque en este momento la enfermedad causada por el virus de influenza A (H1N1) es moderada y solamente se complica en pacientes con condiciones médicas previas (diabetes, obesidad, inmunodepresión, etcétera), se debe recordar que ante el virus de la influenza A los seres humanos no tienen inmunidad (WHO, 2009).

El conocimiento de la distribución de estas enfermedades puede contribuir a la vigilancia de emergencias o reemergencias de las mismas, además de expandir el panorama que se tiene de la distribución de este importante grupo de virus. Por tanto, el objetivo de este trabajo fue estimar los patrones biogeográficos de H5N1 y H1N1 (*Branta canadensis* como reservorio del virus H5N1 y los casos confirmados en seres humanos de H1N1), y su hipótesis: mediante la estimación de patrones de distribución de *Branta canadensis* y casos confirmados en personas de H1N1, a través de SIG, es posible identificar zonas de primer contacto con los virus H5N1 (altamente patógeno) y H1N1.

Materiales y métodos

ÁREA DE ESTUDIO

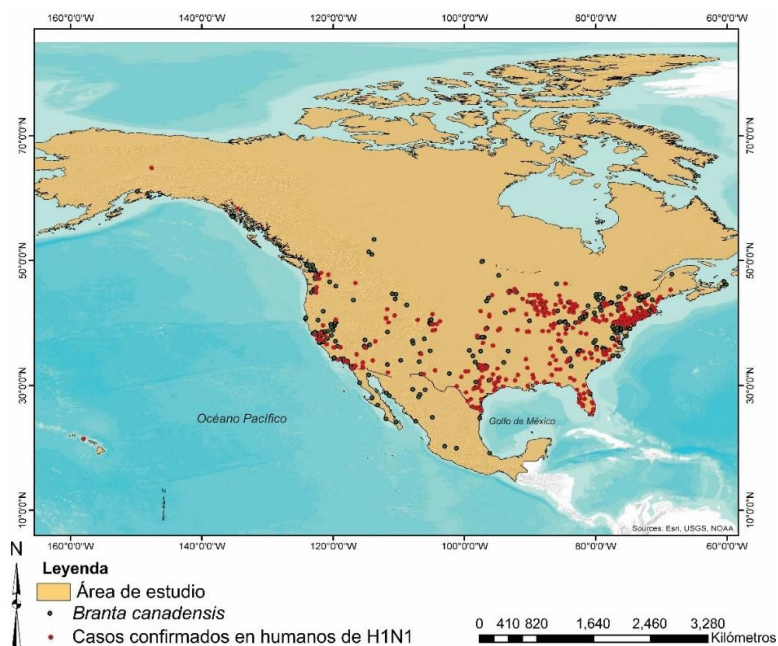
La República Mexicana se encuentra localizada entre las coordenadas 32°43' y 14°32' latitud norte, y entre 86°42' y 118°43' longitud oeste; limita al norte con Estados Unidos, al sur con el océano Pacífico, al sureste con Guatemala y Belice, al oeste con el océano Pacífico y al este con el golfo de México y el mar Caribe (Figura 3) (Ayllón, & Chávez, 1990). Tiene una extensión de 1 972 550 km² y comprende 5075 islas. La división político-administrativa consta de 31 estados y la Ciudad de México.

Estados Unidos comprende cuatro regiones geoeconómicas: el este incluye los montes Apalaches, Nueva Inglaterra y la costa atlántica; la región del centro y oeste se extiende desde el límite occidental del lago Erie hasta las montañas Rocallosas, pasando por el río Misisipi; el norte se caracteriza por la horticultura y su producción de leche; en el sur se podrán encontrar cosechas de maíz y de otros cereales, así como la cría de bovinos. La parte continental de Estados Unidos limita al norte con Canadá y el océano Ártico, al sur con México, al este con el océano Atlántico y al oeste con el océano Pacífico. Dada la gran extensión del país, la diversidad de climas es muy grande. En el centro el clima es continental (United States Geological Survey [USGS], 2003).

MODELADO DE NICHOS ECOLÓGICO

Para el estudio de estimación de nicho ecológico de ganso canadiense (*Branta canadensis*) como reservorio del virus de la gripe aviar (H5N1), se obtuvieron de la página web de Información mundial de biodiversidad biológica (Global Biodiversity Information Facility o GBIF, en inglés) (<http://www.gbif.org/species>)– los datos de ocurrencia de la especie (23 845 ocurrencias). De igual manera, para la estimación de la distribución del virus H1N1, se obtuvieron los casos confirmados en Estados Unidos, 7246 (EmerGeo, 2009). Se realizó una depuración de la base de datos de los registros de ocurrencia de *Branta canadensis* y los casos confirmados de H1N1 mediante Microsoft Office Excel 2013™ y ArcMap™ en su versión 10.2. Cada punto registra la información de su ubicación: latitud y longitud en grados decimales. Se llevó a cabo una depuración, luego de la

Figura 3. Localización del área de estudio (en negro se observan las ocurrencias de *Branta canadensis* y en puntos rojos, los casos confirmados en seres humanos de H1N1)



Fuente: elaboración propia.

cual quedaron únicamente 399 ocurrencias para el caso de *Branta canadensis* como reservorio del virus de la gripe aviar (H5N1) y un total de 327 casos de H1N1. De la página de WorldClim (<http://www.worldclim.org>) se obtuvieron 19 variables bioclimáticas; estas capas contienen información que se deriva de la temperatura mensual y los valores de precipitación, con el fin de generar las variables más significativas para el modelo –representan tendencias anuales y factores limitantes para la distribución de las especies– con una resolución (homologada) de ~1 km (Hijmans *et al.*, 2005).

La preparación de las variables ambientales consistió en modificar el tipo de formato a ASCII (ya que MaxEnt solo reconoce este formato) y en recortar las variables al área de estudio. Para la estimación de la distribución de *Branta canadensis* H5N1 y H1N1 en seres humanos, se efec-

tuó la correlación espacial de las 19 variables bioclimáticas en el área de estudio. Para esto, se generaron 1000 puntos aleatorios sobre el área de estudio y se extrajeron los valores de cada variable. Posteriormente, se analizaron los valores en el *software* IBM SPSS Statistics 22™ mediante la correlación Spearman entre pares de variables, descartando aquellas que tuviesen valores de correlación sobre 0,8 (Pliscoff, & Fuentes, 2011). Las variables que presentaron una menor correlación y que se utilizaron para la generación de ambos modelos son las que aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables bioclimáticas con valores de correlación menor a 0.8

id	Variable ambiental
BIO 2	Rango de temperatura media mensual
BIO 7	Rango anual de temperatura (P5-P6)
BIO 12	Precipitación anual
BIO 13	Precipitación del mes más húmedo
BIO 14	Precipitación del mes más seco
BIO 15	Estacionalidad de la precipitación
BIO 16	Precipitación del trimestre más húmedo
BIO 17	Precipitación del trimestre más seco
BIO 18	Precipitación del trimestre más cálido
BIO 19	Precipitación del trimestre más frío

Fuente: elaboración propia con base en los resultados de SPSS y de Hijmans *et al.* (2005).

Se utilizó el algoritmo de MaxEnt, debido a que su aplicación en trabajos previos ha dado buenos resultados (Philips *et al.*, 2006). Para ambos modelos se generaron veinte réplicas, de esta manera se realizaron particiones aleatorias de los datos en cada replicación y cada modelo se validó con un porcentaje definido por el usuario (en este caso es del 50 %) (Anderson, Peterson, & Gómez, 2002). Se realizó un muestreo con reemplazo (*bootstrap*), ya que el número de presencias es pequeño en comparación con el área de estudio, lo que significa que los registros de presencia se pueden utilizar más de una vez en el conjunto de datos de validación para cada réplica (Philips, & Dudik, 2008). Para evaluar la contribución de las variables ambientales a la predicción de ambos modelos, se analizaron los resultados de dos vías que el programa MaxEnt emplea: la estimación de los porcentajes de contribución relativa al mo-

delo y los resultados de la prueba Jackknife (Yang *et al.*, 2013). En el caso de la prueba de Jackknife, se crean tres tipos de gráficas. El primer tipo se construye con todas las variables, excluyendo una ambiental, la cual afecta al modelo. A fin de estimar cuáles son las variables más importantes en el modelo, se realizó una prueba Jackknife, para descartar las variables que no contribuyeron al modelo y posteriormente se corrió esta prueba nuevamente, con los datos depurados (Baldwin, 2009). Se optó por la salida logística debido a la facilidad de su interpretación, ya que tiene valores de probabilidad que fluctúan entre 0 y 1, donde los valores cercanos a 1 muestran la presencia de *Branta canadensis* como reservorio del virus de la gripe aviar y el virus H1N1 en humanos, mientras que los valores cercanos a 0 indican la ausencia (Anderson, Lew, & Peterson, 2003).

El proceso de evaluación para ambos modelos se ejecutó con los parámetros establecidos por Philips *et al.* (2006). Este proceso se realizó a través de la curva Receiver Operating Characteristics (ROC – Curva operativa característica del receptor), calculando el Area Under the Curve (AUC – Área bajo la curva) (Fielding, & Bell, 1997), que se obtiene comparando la proporción de falsos y verdaderos positivos, es decir, desplegando en el eje X la proporción de falsos positivos (1-especificidad) y en el eje Y la proporción de positivos verdaderos (sensibilidad) (Mateo, Felicísimo, & Muñoz, 2011). La precisión del modelo es mayor cuando la proporción de positivos verdaderos es mayor a la de positivos falsos, lo cual se expresa en una curva que es específica que mientras mayor sea su precisión, más se acercará a la esquina izquierda superior del gráfico, generando un “área de curva” mayor; el AUC con valor de 0.5 indica que el modelo no tiene poder predictivo, 1 significa una discriminación o un modelo perfecto, y los valores por debajo de 0.5 indican una relación mucho menor que la esperada al azar (Guisan *et al.*, 2006). Posteriormente, de las veinte réplicas generadas para cada modelo independientemente se seleccionaron los tres modelos resultantes de MaxEnt con mayor porcentaje de área bajo la curva (Liu *et al.*, 2005), para incorporarlos en el *software* ArcGIS en su versión 10.2 de ESRITM. Posteriormente, se convirtieron de formato ASCII a ráster con el tipo de salida flotante (Pearson *et al.*, 2007). Mediante álgebra de mapas, se calculó en el mapa consenso y se definieron las áreas

potencialmente idóneas, donde la especie y los virus (H5N1 y H1N1) están presentes. Después, se realizó una reclasificación de los valores en función del umbral establecido por MaxEnt: 10 percentil (que indica la probabilidad de que el 10 % de los puntos de presencia puedan caer fuera del área de predicción del área de distribución potencial) (Pearson *et al.*, 2007). Con base en el promedio del décimo percentil (0.280333) de las tres mejores réplicas, se estableció el umbral de corte; aquellas probabilidades que estén por debajo del umbral para el modelo de *Branta canadensis* han sido transformadas a 0 y se interpretan como ausencia, mientras que los valores mayores al umbral son transformadas a 1 y representan presencia de la especie. En el caso del virus H1N1, los valores del umbral del décimo percentil que estén por debajo de 0.335, se transformaron a 0 y se interpretan como ausencia del virus, mientras que los mayores al umbral se transformaron a 1 y representan la presencia del virus H1N1.

CATEGORIZACIÓN DE RIESGO

Para la elaboración del mapa de riesgo, se consideraron algunos factores por los que las gripes aviar (H5N1) y porcina (H1N1) pueden estar presentes según el Manual de Vigilancia Epidemiológica de la Gripe Aviar propuesto por la FAO (2006).

Los factores considerados fueron:

- Áreas geoestadísticas básicas (AGEB) a nivel manzana obtenidas del Censo de Población y Vivienda 2010 del Inegi (<http://www.inegi.org.mx/>).
- Del portal de geoinformación de la Conabio, se obtuvieron los factores considerados para realizar el mapa de riesgo, como aeropuertos y carreteras (Sistema Nacional de información sobre biodiversidad [SNIB] en <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>)
- Del portal de United States Geological Survey (USGS, 2003), se obtuvieron los humedales que fueron el último factor a considerar para la elaboración del mapa de riesgo.

Se categorizaron las AGEB indicando qué población es más vulnerable a contraer el virus. Según la FAO (2016), las personas de la tercera edad y los niños son los más vulnerables a contraer los virus; de tal manera, se realizó la siguiente clasificación:

Tabla 2. Categorización de AGEB

Población (años)	Riesgo	Indicador
0-14	Alto	3
15-29	Bajo	1
30-49	Medio	2
50-59	Medio	2
60 y más	Alto	3

Fuente: elaboración propia con base en FAO (2006).

Posteriormente, según la FAO (2006), se generaron áreas de influencia para los aeropuertos. Se clasificaron de la siguiente manera:

Tabla 3. Áreas de influencia para los aeropuertos

Buffer (km)	Riesgo	Indicador
5	Alto	3
25	Medio	2
50	Bajo	1

Fuente: elaboración propia con base en FAO (2006).

Para la elaboración de las áreas de influencia de carreteras, se tuvo en cuenta el manual de la FAO (2006), *Preparing for Highly Pathogenic Avian Influenza. Animal Production and Health Manual*, el cual indica que el virus para ingresar deberá atravesar las fronteras; puede hacerlo vía vectores ovíparos migratorios, comercio transfronterizo de animales o productos, o mediante el movimiento de personas. Se generó un área de influencia de tres kilómetros de diámetro y un riesgo alto dentro de ella.

Los humedales se categorizaron según el manual antes mencionado de la FAO (2006), el cual indica que el riesgo se clasifica por área de influencia (Tabla 4).

Tabla 4. Categorización de humedales

<i>Buffer (km)</i>	<i>Riesgo</i>	<i>Indicador</i>
1	Bajo	1
5	Medio	2
10	Alto	3

Fuente: elaboración propia con base en FAO (2006).

Se exportaron cada una de las columnas, de acuerdo con el indicador establecido, y finalmente, mediante álgebra de mapas y la fórmula propuesta por la Cenapred (2014), se calculó el riesgo.

Ecuación 1. Cálculo lineal para la obtención de zonas de riesgo

$$(R) = (P) * (E) * (V)$$

Fuente: Cenapred (2014).

Donde:

- Peligro (P) = Grado de intensidad que pueda ocasionar daños en un sitio dado
- Grado de exposición (E) = Cantidad de personas, bienes y sistemas que se encuentran en el sitio considerado y que es factible que sean dañados por el evento
- Vulnerabilidad (V) = Sistemas propensos a ser afectados por el evento. La vulnerabilidad se expresa como un daño
- Riesgo (R) = Resultado de la multiplicación de los tres factores

Las variables utilizadas para medir la peligrosidad fueron los aeropuertos y las carreteras; por otro lado, las variables que identifican el grado de exposición fueron los humedales; y por último, las AGEB se utilizaron como la variable que calcular la vulnerabilidad (Cenapred, 2014). De esta manera, se calcularon las áreas de riesgo categorizándolas como baja, media y alta sobre el posible ingreso de la enfermedad.

Resultados

Los modelos arrojaron altos resultados predictivos de la distribución de *Branta canadensis* como reservorio del virus de la gripe aviar (H5N1) y los casos confirmados de la gripe porcina (H1N1). Los resultados del AUC y

los porcentajes de contribución muestran la importancia de las variables. Para el caso del modelo del virus H5N1, las variables que presentaron una mayor contribución fueron rango anual de temperatura (BIO 7), rango de temperatura media mensual (BIO 2), precipitación del trimestre más cálido (BIO 18) y precipitación del trimestre más húmedo (BIO 16).

Por otra parte, se observa que para el modelo del virus H1N1, las variables que presentaron una mayor contribución fueron rango anual de temperatura (BIO 7), precipitación anual (BIO 12), precipitación del trimestre más frío (BIO 19) y estacionalidad de la precipitación (BIO 15).

La cartografía generada para el virus H5N1 se obtuvo mediante las réplicas 9, 11 y 16 con un AUC mayor a 0.915, mientras que la cartografía generada para el virus H1N1, se generó mediante las réplicas 0, 13 y 18 con un AUC mayor a 0.91 (Tabla 5).

Tabla 5. Resultados del área bajo la curva (AUC) y porcentaje de contribución a los modelos de virus H5N1 (A) y H1N1 (B) de las variables de cada réplica

Modelo A				Modelo B			
Réplica	AUC	Variable	% de contribución	Réplica	AUC	Variable	% de contribución
9	0.919	BIO 7	41.3	0	0.917	BIO 7	24.9
		BIO 2	12.7			BIO 12	18.9
		BIO 18	11.9			BIO 19	15.2
11	0.919	BIO 7	28.2	13	0.916	BIO 7	35.9
		BIO 2	23.9			BIO 15	15.9
		BIO 16	13.8			BIO 12	15.8
16	0.917	BIO 7	40.8	18	0.918	BIO 7	29.9
		BIO 2	12.8			BIO 12	27
		BIO 18	11.3			BIO 2	16.1

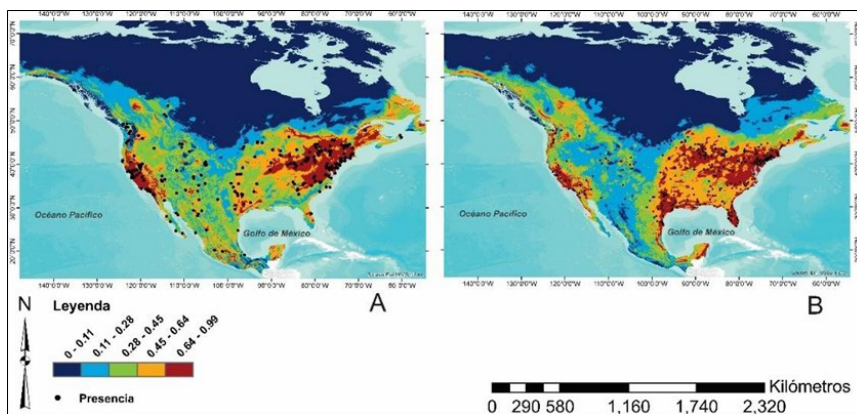
Fuente: elaboración propia.

Las cartografías resultantes de los modelos de MaxEnt (Figura 4) se interpretan como las áreas idóneas donde los virus (H5N1 y H1N1) pueden estar presentes en una escala de baja a alta probabilidad de idoneidad. Se observa que la distribución de *Branta canadensis* como reservorio del virus de la gripe aviar (H5N1, Modelo A) tiene una mayor probabilidad de presencia en los lugares de color rojo, ya que son sitios donde existe una mayor concentración de la población principalmente,

así como también están cercanos a humedales. Por otra parte, el virus de la gripe porcina (H1N1, Modelo B) tiene una mayor probabilidad de presencia en zonas costeras que cuentan con una mayor variación de clima. Dentro de los estadísticos que arroja MaxEnt, se encuentra el Test de Jackknife, que representa la importancia de las variables considerando el AUC con los datos de entrenamiento. Se observa la ganancia que genera cada variable en tres diferentes escenarios: corriendo el modelo con una sola variable (azul), con todas las variables menos una (verde) y con todas las variables (rojo), lo que refleja cuánta información útil contiene cada una (Figura 5).

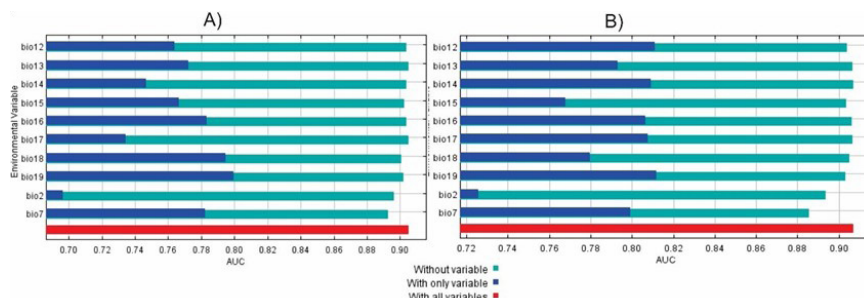
Los resultados para el caso del modelo del virus H5N1 (A) indican que las variables más importantes, es decir, determinan en mayor porcentaje el área de la distribución son BIO 7 (rango anual de temperatura), BIO 16 (precipitación del trimestre más húmedo) y BIO 19 (precipitación del trimestre más frío); para el caso del modelo del virus H1N1 (B) son BIO 12 (precipitación anual), BIO 19 (precipitación del trimestre más frío) y BIO 14 (precipitación del mes más seco). En los mapas dicotómicos generados de ausencia-presencia, se muestra la probabilidad de ocurrencia de ambos virus: H5N1 y H1N1 (Figura 6).

Figura 4. Mapas de idoneidad de *Branta canadensis* (A) y de los casos confirmados con el virus H1N1 (B). Los lugares con mayor idoneidad de nicho ecológico se colorean en tonalidades roja y naranja



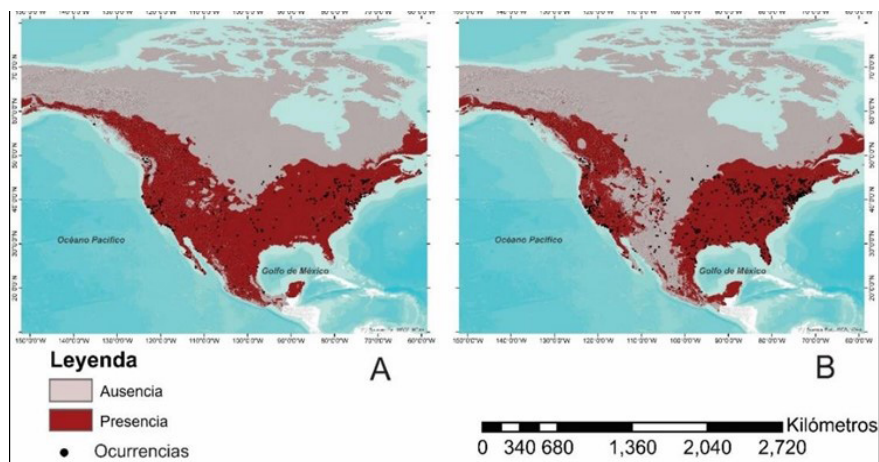
Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Test de Jackknife para el modelo de *Branta canadensis* como reservorio del virus de la gripe aviar (A) y el modelo de la gripe porcina (B)



Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Mapa dicotómico del modelo de *Branta canadensis* como reservorio del virus de la gripe aviar (A) y mapa dicotómico de los casos confirmados del virus H1N1 (B)

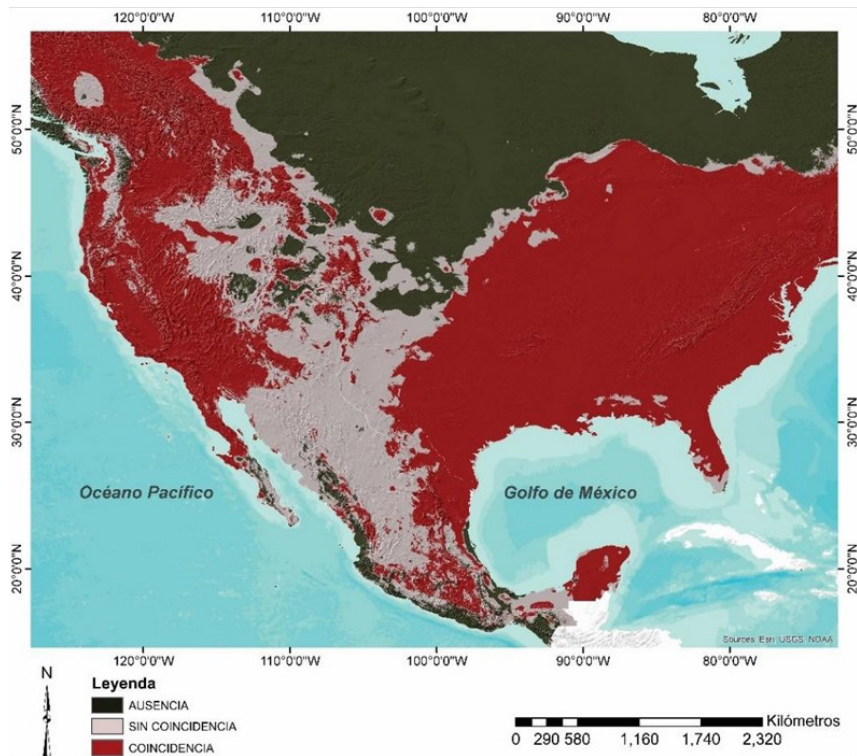


Fuente: elaboración propia.

Los resultados arrojan que el virus H5N1 se encuentra presente en casi toda la República Mexicana, debido a que los principales reservorios del mismo son los patos y gansos; en este caso, se modeló la distribución potencial de *Branta canadensis* como reservorio del virus H5N1. El color rojo indica las zonas de coincidencia de *Branta canadensis* como reservorio del virus de la gripe aviar (H5N1) y de los casos confirmados en seres

humanos del virus H1N1; las áreas de color claro indican las regiones donde no coinciden y, finalmente, el color verde oscuro indica las áreas de ausencia de ambas cepas (Figura 7).

Figura 7. Coincidencia de *Branta canadensis* como reservorio del virus de la gripe aviar (H5N1) y de los casos confirmados en seres humanos del virus H1N1



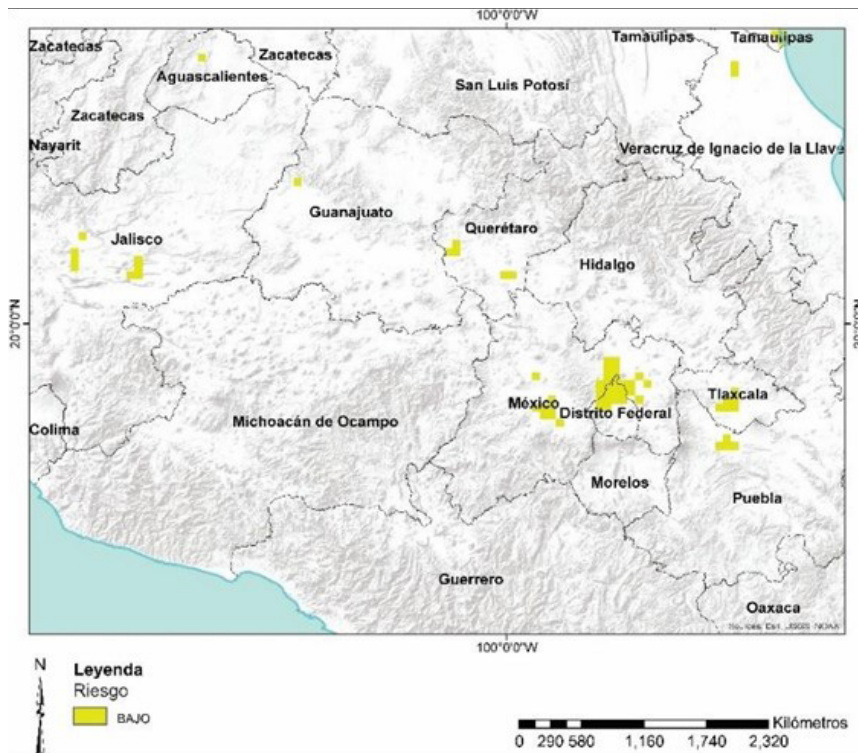
Fuente: elaboración propia.

El virus puede estar presente en muchas zonas, debido a que las poblaciones de estos anátidos en época de invierno se alojan en humedales que abarcan gran parte de la República Mexicana, por lo que de esta manera pueden contagiar tanto a personas como a otras especies y así el virus puede diseminarse con gran facilidad en gran parte del territorio nacional, debido a que existen las condiciones ambientales para

que se desarrolle. El área mayormente afectada por el virus son las regiones que tienen una mayor población, así como también las zonas donde las temperaturas son elevadas.

En cuanto al factor riesgo, es posible identificar las áreas de riesgo bajo principalmente en los estados de Jalisco, Querétaro, Tlaxcala y el Distrito Federal (Figura 8).

Figura 8. Riesgo de contagio bajo por los virus H5N1 y H1N1

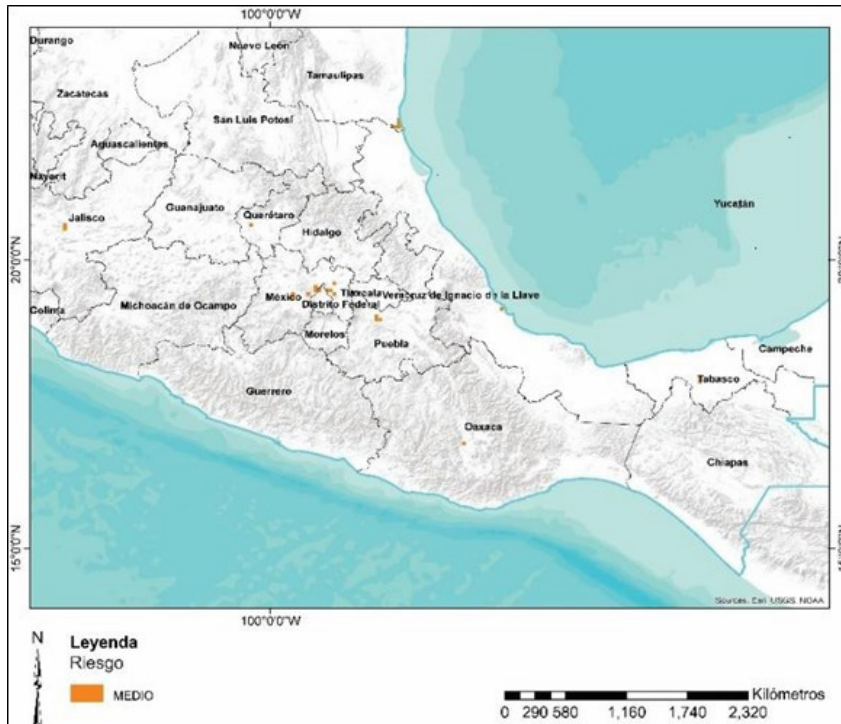


Fuente: elaboración propia.

Resultado obtenido a partir de la aplicación de la ecuación del Cenapred (2014).

Las zonas de riesgo medio se localizan en ciertas partes del estado de Tamaulipas y en una pequeña parte de Jalisco (Figura 9).

Figura 9. Riesgo de contagio medio por los virus H5N1 y H1N1

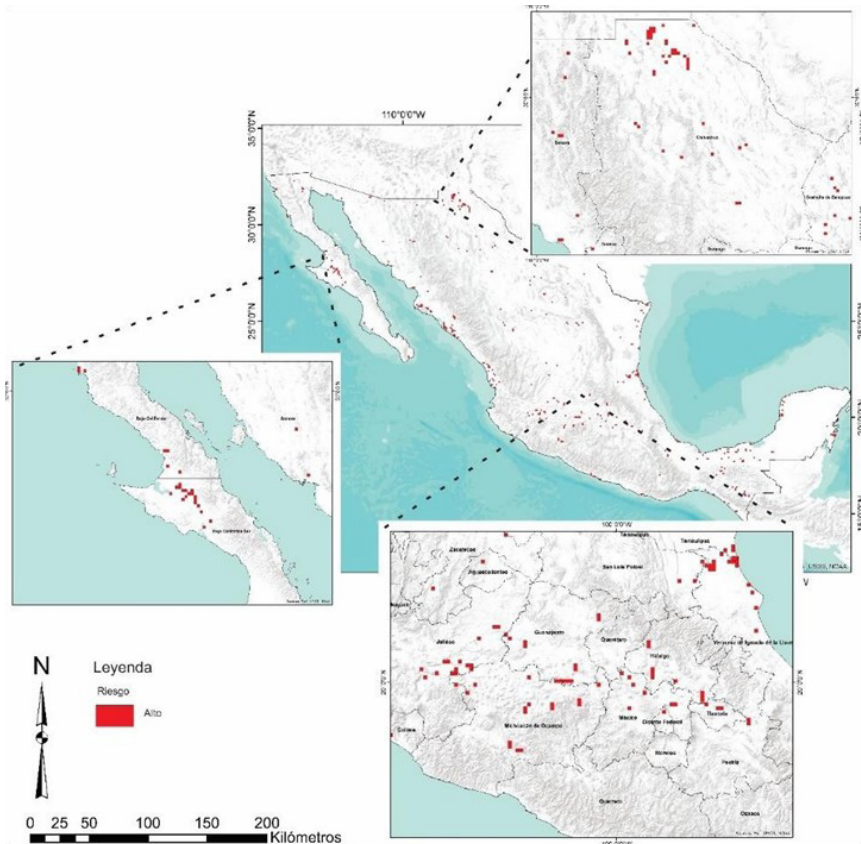


Fuente: elaboración propia.

Resultado obtenido a partir de la aplicación de la ecuación del Cenapred (2014).

Las áreas de riesgo alto se encuentran en gran parte distribuidas en todo el país, pero en su mayoría en la zona norte, como el estado de Chihuahua, así como en Baja California y en la parte centro de la República Mexicana, donde existe una mayor concentración de población susceptible a contraer el virus, como en las zonas metropolitanas, principalmente (Figura 10).

Figura 10. Riesgo de contagio alto por los virus H5N1 y H1N1



Fuente: elaboración propia.

Resultado obtenido a partir de la aplicación de la ecuación del Cenapred (2014).

Discusión

En 1997 Fielding y Bell llevaron a cabo revisiones de los diferentes estadísticos utilizables para evaluar la calidad de los modelos ROC y AUC. El valor de AUC está comprendido entre 0 y 1; un valor de 1 indica que todos los casos se han clasificado correctamente y uno de 0.5, que el modelo no es diferente de clasificar los casos al azar; los valores menores de 0.5 indican que el modelo es realmente malo, ya que clasifica erróneamente más casos que el azar. Para el caso del modelo de *Branta canadensis* como reservorio del

virus de la gripe aviar (H5N1, Modelo A), se observa un valor de AUC de 0.941 y para el modelo de los casos confirmados del virus H1N1 (Modelo B), un valor de AUC de 0.940, lo que indica que ambos modelos fueron buenos y más aceptables que un modelo al azar (Johnson, & Omland, 2004).

De acuerdo con Suárez *et al.* (2004), un motivo de preocupación es que el virus H5N1 es endémico en aves de corral en algunas partes del mundo y no se puede predecir cómo se comportará bajo la presión de una pandemia. La coincidencia en el mismo espacio geográfico del virus H5N1 con el H1N1 puede favorecer la recombinación entre los mismos, agravando las consecuencias de infección en los seres humanos (OPS, 2009a).

Bottinelli *et al.* (2002) utilizaron los SIG para identificar zonas de riesgo para dengue en el municipio de Cabo Corrientes en el estado de Jalisco, donde se analizaron tres componentes esenciales: la fuente de riesgo (el vector), la posible trayectoria de propagación del vector (radio de acción del mosquito) y, por último, la población susceptible de ser afectada. Al comparar el resultado de este trabajo con el nuestro, reflejó ser menos detallado, ya que solo se tuvo en cuenta la presencia del vector y la densidad poblacional, por lo que no brinda elementos suficientes que permitan a los que toman decisiones disminuir el riesgo. Mientras que en esta investigación, se tomaron en cuenta componentes como la población susceptible de contraer los virus, así como los aeropuertos, carreteras y humedales; de esta manera, se lograron obtener resultados más precisos.

Conclusión

Se obtuvieron los modelos de distribución potenciales donde los virus H5N1 y H1N1 pueden tener presencia, además de que se lograron determinar las áreas de riesgo de estos grupos importantes de virus en México categorizándolas en baja, media y alta. La hipótesis se cumple, debido a que sí es posible el monitoreo de *Branta canadensis* como reservorio del virus de la gripe (H5N1) y de los casos confirmados del virus H1N1 por medio de los SIG.

De las diecinueve variables obtenidas, se utilizaron únicamente diez, debido a que se eliminaron aquellas que presentaban una mayor

correlación para evitar redundancia en los datos y, por supuesto, en los resultados. Mediante el modelado de nicho ecológico con MaxEnt, se generaron cartografías de la distribución espacial potencial de *Branta canadensis* como reservorio del virus H5N1 y del virus H1N1, y se identificaron aquellas variables ambientales que influyen en la existencia de ambos virus en Norteamérica.

Estas herramientas deben tomarse en cuenta para trascender la investigación básica y, de esta manera, pasar a formar parte de los programas de gobierno encargados del control de enfermedades de transmisión vectorial.

La generación del modelo tiene como limitante que el resultado es de estimación de la idoneidad, es decir, existe la probabilidad de que en las zonas aptas para la existencia de ambos virus no se presente ningún registro y, por el contrario, que en los casos donde no existe presencia de virus, puedan darse ocurrencias por cambios climáticos globales, entre otros factores no considerados en el proceso de modelación. Los resultados de AUC son excelentes, por lo que las probabilidades de que el modelo se acerque a la realidad son muy altas. Se debe dar mayor atención a las variables que resultaron más importantes para la generación del modelo, pues son indicadores de la presencia de los virus H5N1 y H1N1, lo cual permite elaborar estrategias de control y saneamiento para evitar epidemias en el país.

Los resultados permiten identificar específicamente que para el modelo de *Branta canadensis* como reservorio del virus de la gripe aviar (H5N1), las variables que predicen el patrón de distribución fueron BIO 7 (rango de temperatura), BIO 19 (precipitación del trimestre más frío) y BIO 2 (rango de temperatura media mensual); y para el modelo de los casos confirmados del virus H1N1, las variables que predicen el patrón de distribución fueron BIO 7 (rango de temperatura), BIO 12 (precipitación anual) y BIO 2 (rango de temperatura media mensual), por lo que las medidas de mitigación pueden ser puntuales y aumentar la efectividad de los resultados en beneficio de la población.

Es indispensable mencionar que existen variables, como las rutas de otras aves, que son reservorios del virus H5N1 y que se consideran huéspedes amplificantes del virus que es mantenido en la naturaleza en

un ciclo de transmisión. De incluirse en el modelo mejoraría sustancialmente el conocimiento de áreas potenciales para la distribución de este grupo de virus. Además, cabe mencionar que las bases de datos generadas en la modelación se pueden actualizar con información como las variaciones temporales, sitios endémicos, subtipos virales, etcétera. De esta manera, es posible realizar una vigilancia epidemiológica de la enfermedad basada en riesgo, además de reducir los costos de las operaciones de vigilancia en los servicios veterinarios nacionales de la región.

En cuanto al análisis de riesgo para la vigilancia epidemiológica basado en la identificación de áreas propensas a contraer los virus de las gripes aviar y porcina, permite la implementación de estrategias de vigilancia epidemiológica basada en evaluación de riesgo, destacando aquellas inversiones gubernamentales (medicamentos, estrategias de higiene, etcétera) en las áreas donde la probabilidad de que estén presentes los virus sea mayor. Por lo tanto, la información obtenida en esta investigación es adecuada y coadyuva a la detección oportuna de estos grupos importantes de virus y a una alerta rápida de cualquier emergencia sanitaria, los cuales constituyen elementos cruciales para evitar su diseminación hacia otras áreas y controlarlos en el lugar de origen.

Cabe destacar que en esta investigación, se pueden mejorar sus resultados añadiendo diversos componentes que sean de vital importancia para identificar con mayor precisión aquellas zonas expuestas a los virus, como pueden ser incluir las granjas avícolas y porcícolas, AGEB actualizados, lugares públicos, etcétera.

Literatura citada

- Anderson, R. P., Lew, D., & Peterson, A. T. (2003). Evaluating predictive models of species' distributions: Criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling*, 162(3), 211-232.
- Anderson, R. P., Peterson, A. T., & Gómez, M. (2002). Using niche-based GIS modeling to test geographic predictions of competitive exclusion and competitive release in south american pocket mice. *Oikos*, 98(1), 3-16.

- Ayllón, M. T., & Chávez, J. (1990). *México: sus recursos naturales y su población*. México: Limusa.
- Backer, J., van Roermund, H., Fischer, E., van Asseldonk, M., & Bergevoet, R. (2015). Controlling highly pathogenic avian influenza outbreaks: An epidemiological and economic model analysis. *Preventive Veterinary Medicine*, 121(1-2), 142-150.
- Baldwin, R. A. (2009). Use of Maximum Entropy Modeling in Wildlife Research. *Entropy*, 11(4), 854-866.
- Belshe, R. B. (2005). The Origins of Pandemic Influenza — Lessons from the 1918 Virus. *New England Journal of Medicine*, 353, 2209-2211.
- BirdLife International (2009). *Branta canadensis*. Lista roja de especies amenazadas de la UICN <https://www.iucnredlist.org/species/22679935/131909406>.
- Bonn, D. (2006). Wild Birds, poultry, and avian influenza. *The Lancet Infectious Diseases*, 6(5), 262.
- Bottinelli, O. R., Marder, G., Ulón, S. N., Ramírez, L., & Sario, H. R. (2002). *Estratificación de áreas de Riesgo-Dengue en la ciudad de Corrientes mediante el uso de los (SIG) Sistemas de Información Geográfico*. Recuperado de <https://hum.unne.edu.ar/investigacion/geografia/labtig/publicaciones/public09.pdf>
- Brown, J. D., Stallknecht, D. E., Beck, J. R., Suárez, D., & Swayne, D. (2006). Susceptibility of North American Ducks and Gulls to H5N1 Highly Pathogenic Avian Influenza Viruses. *Emerging Infectious Diseases*, 12(11), 1663-1670.
- Brown, J. D., Swayne, D. E., Cooper, R. J., & Burns, R. E. (2007). Persistence of H5 and H7 avian influenza viruses in water. *Avian Diseases*, 51(1), 285-289.
- Cartografía y Datos geográficos. Instituto Geográfico Nacional (2015). <http://www.ign.es/ign/layoutIn/actividadesSistemaInfoGeografica.do>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred) (2014). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos*. México: Cenapred.
- Cheung, T. K., & Poon, L. L. (2007). Biology of influenza A virus. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1102(1), 1-25.

- Clarke, K. C., McLafferty, S. L., & Tempalski, B. J. (1996). On epidemiology and geographic information systems: A review and discussion of future directions. *Emerging Infectious Diseases*, 2(2), 85-92.
- Dotis, J., & Roilides, E. (2009). H1N1 influenza A infection. *Hippokratia*, 13(3), 135-138.
- Drake, J., & Lodge, D. M. (2006). Allee effects, propagule pressure and the probability of establishment: Risk analysis for biological invasions. *Biological Invasions*, 8(2), 365-375.
- Ducks Unlimited de México (DUMAC) (2008). Migración. Recuperado de <http://www.dumac.org/dumac/habitat/esp/nentorno01a.htm>
- Echeverry, D. M., & Rodas, J. D. (2011). Influenza virus A H5N1 and H1N1: Features and zoonotic potential. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 24(4), 634-646.
- EmerGeo (2009). EmerGeo provides H1N1 flu outbreak situational awareness tools. Recuperado de <http://www.emergeo.com/emergeo-provides-h1n1-flu-outbreak-situational-awareness-tools>
- Fielding, A. H., & Bell, J. F. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, 24(1), 38-49.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2006). *Preparing for Highly Pathogenic Avian Influenza* [Libro electrónico]. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a0632e/a0632e00.htm>
- (2016). Influenza aviar. Recuperado de http://www.fao.org/avianflu/es/qanda_es.html
- Gambotto, A., Barratt, S. M., De Jong, M. D., Neumann, G., & Kawaoka, Y. (2008). Human infection with highly pathogenic H5N1 influenza virus. *Lancet*, 371(9622), 1464-1475.
- Gensheimer, K. F., Meltzer, M. I., Postema, A. S., & Strikas, R. A. (2003). Influenza pandemic preparedness. *Emerging Infectious Diseases*, 9(12), 1645-1648.
- Gilbert, M., Xiao, X., Domenech, J., Lubroth, J., Martin, V., & Slingenbergh, J. (2006). *Anatidae* migration in the western palearctic and spread of highly pathogenic avian influenza H5N1 virus. *Emerging Infectious Diseases*, 12(11), 1650-1656.

- Gotera, J., & Valero, N. (2009). Influenza A (H1N1): temor a una pandemia. *Investigación Clínica*, 50(3), 279-282.
- Gray, G. C., Trampel, D. W., & Roth, J. A. (2007). Pandemic influenza planning: Shouldn't swine and poultry workers be included? *Vaccine*, 25(22), 4376-4381.
- Gill, F. (2001a). BVSDE. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd29/influenza.pdf>
- (2001b). Influenza: una enfermedad emergente. Documento recuperado de <https://docplayer.es/21381977-Influenza-una-enfermedad-emergente.html>
- Guisan, A., Broennimann, O., Engler, R., Vust, M., Yoccoz, N. G., Lehmann, A., & Zimmermann, N. E. (2006). Using niche-based models to improve the sampling of rare species. *Conservation Biology*, 20(2), 501-511.
- Guisan, A., & Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: Offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8(9), 993-1009.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978.
- Hilleman, M. R. (2002). Realities and enigmas of human viral influenza: Pathogenesis, epidemiology and control. *Vaccine*, 20(25-26), 3068-3087.
- Hofshagen, M., Gjerset, B., Er, C., Tarpai, A., Brun, E., Dannevig, B., Bruheim, T., Fostad, I. G., Iversen, B., Hungnes, O., & Lium, B. (2009). Pandemic influenza A(H1N1)v: Human to pig transmission in Norway? *Eurosurveillance*, 14(45).
- Iftimovici, R., Iacobescu, V., Mihail, A., Teodorescu, D., Gianga, I., Milici, V., Tudor, G., Moraru, G., Bogos, L., Gologan, G., Ghil, K. Z., & Vladescu, S. (1979). Serological investigations on the circulation of an influenza virus A(H1N1) strain in swine and horses. *Virologie*, 30(1), 19-23.
- Instituto Geográfico Nacional (s.f.). <http://www.ign.es/ign/layoutIn/actividadesSistemaInfoGeografica.do>

- Integrated Taxonomic Information System (ITIS) (2013). *Branta canadensis* (Linnaeus, 1758). Recuperado de http://www.itis.gov/servlet/SingleRpt/SingleRpt?search_topic=TSN&search_value=174999
- Isoda, N., Sakoda, Y., Kishida, N., Bai, G. R., Matsuda, K., Umemura, T., & Kida, H. (2006). Pathogenicity of a Highly Pathogenic Avian Influenza Virus, A/Chicken/Yamaguchi/7/04 (H5N1) in Different Species of Birds and Mammals. *Archives of Virology*, 151(7), 1267-1279.
- Johnson, J. B., & Omland, K. S. (2004). Model Selection in Ecology and Evolution. *Trends in Ecology & Evolution*, 19(2), 101-108.
- Kawaoka, Y., Krauss, S., & Webster, R. G. (1989). Avian-to-human transmission of the PB1 gene of influenza A viruses in the 1957 and 1968 Pandemics. *Journal of Virology*, 63(11), 4603-4608.
- Kormondy, E. J. (1985). *Conceptos de ecología*. Madrid: Alianza.
- Krauss, S., Walker, D., Pryor, S. P., Niles, L., Chenghong, L., Hinshaw, V. S., & Webster, R. G. (2004). Influenza A viruses of migrating wild aquatic birds in North America. *Vector Borne and Zoonotic Diseases*, 4(3), 177-189.
- Liu, C., Berry, P. M., Dawson, T. P., & Pearson, R. G. (2005). Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography*, 28(3), 385-393.
- López, M., García, J., Pacheco, R. L., & Escamilla, R. A. (2009). La influenza A/H1N1 2009. Una crónica de la primera pandemia del siglo XXI. *Revista Digital Universitaria*, 11(4), 1067-6079.
- Margalef, R. (1981). *Ecología*. Bogotá: Planeta.
- Martínez, R. M., Tuya, L. C., Martínez, M., Pérez, A., & Cánovas, A. M. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman: caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8(275-79). Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/rhcm/v8n2/rhcm17209.pdf>
- Mateo, R. G., Felicísimo, Á. M., & Muñoz, J. (2011). Modelos de distribución de especies: una revisión sintética. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84(2), 217-240.
- Matrosovich, M. N., Gambaryan, A. S., Teneberg, S., Piskarev, V. E., Yamnikova, S. S., Lvov, D. K., Robertson, J. S., & Karlsson, K. A. (1997). Avian influenza A viruses differ from human viruses by recognition of

- sialyloligosaccharides and gangliosides by a higher conservation of the HA receptor-binding site. *Virology*, 233(1), 224-234.
- Morris, R. S., & Jackson, R. (2005). *Epidemiology of H5N1 avian influenza in Asia and implications for regional control* (Reporte de la FAO). Recuperado de www.fao.org/docs/eims/upload/246974/aj122e00.pdf
- Newman, A. P., Reisdorf, E., Beinemann, J., Uyeki, T. M., Balish, A., Shu, B., Lindstrom, S., Achenbach, J., Smith, C., & Davis, J. P. (2008). Human case of swine influenza A (H1N1) triple reassortant virus infection, Wisconsin. *Emerging Infectious Diseases*, 14(9), 1470-1472.
- Odum, E. P. (1972). *Ecología*. México: Interamericana.
- Organización Mundial de Sanidad Animal (OIE) (2007). <http://www.oie.int>
- Organización Panamericana de la Salud (OPS) (1996). Uso de sistemas de información geográfica en epidemiología. *Boletín Epidemiológico*, 17(1), 1-8.
- (2009a). Casos de influenza por un nuevo subtipo: actualización regional. *Alertas Epidemiológicas*, 6(14), 1-4.
- (2009b). Pandemia (H1N1) 2009. Recuperado de http://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=805&Itemid=569&lang=es
- Pearson, R. G., Raxworthy, C. J., Nakamura, M., & Peterson, A. T. (2007). Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: A test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*, 34(1), 102-117.
- Philips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259.
- Philips, S. J., & Dudík, M. (2008). Modeling of Species Distributions with MaxEnt: New Extensions and a Comprehensive Evaluation. *Ecography*, 31(2), 161-175.
- Pliscoff, P., & Fuentes, T. (2011). Modelación de la distribución de especies y ecosistemas en el tiempo y en el espacio: una revisión de las nuevas herramientas y enfoques disponibles. *Revista de Geografía Norte Grande* (48), 61-79.
- Secretaría de Salud (s.f.). Zoonosis y vectores. Recuperado de <http://salud.edomexico.gob.mx/html/article.php?sid=332>

- Shenderovich, S. F., Molibog, E. V., Lakhno, M. A., Zakstel'skaia, L., & Zhdanov, V. M. (1979). Antigenic and biological characteristics of the A (H1N1) strains that caused the 1977-1978 epidemic. *Voprosy Virusologii* (5), 480-486.
- Sims, L., & Benigno, S. (2005). Origen y evolución de la gripe aviar H5N1 altamente patógena en Asia. *Veterinary Record*, 159-164.
- Stärk, K. D. C., Regula, G., Hernández, J., Knopf, L., Fuchs, K., Morris, R. S., & Davies, P. (2006). Concepts for risk-based surveillance in the field of veterinary medicine and veterinary public health: Review of current approaches. *BMC Health Services Research*, 6, 20
- Suárez, D. L., Senne, D. A., Banks, J., Brown, I. H., Essen, S. C., Lee, C., Manvell, R. J., Mathieu, C., Moreno, V., Pedersen, J. C., Panigrahy, B., Rojas, H., Spackman, E., & Alexander, D. J. (2004). Recombination resulting in virulence shift in avian influenza outbreak, Chile. *Emerging Infectious Diseases*, 10(4), 693-699.
- Suárez, C. L., & Verdasquera, D. (2000). Enfermedades emergentes y reemergentes: factores causales y vigilancia. *Revista Cubana de Medicina General Integral*, 16(6), 593-597.
- Turismo.org (2011). Información general de Estados Unidos. Recuperado de <http://turismo.org/informacion-general-de-estados-unidos/>
- United States Geological Survey (USGS) (2003). North America Wetlands GRID. Recuperado de <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/4fb69909e4b03ad19d64b4a2>
- Vincent, A. L., W, M., Lager, K. M., Janke, B. H., & Richt, J. A. (2008). Swine influenza viruses: A North American perspective. *Advances in Virus Research*, 72, 127-154.
- Weber, T. P., & Stilianakis, N. (2007). Ecologic immunology of avian influenza (H5N1) in migratory birds. *Emerging Infectious Diseases*, 13(8), 1139-1143.
- Webster, R. G., Bean, W. J., Gorman, O. T., Chambers, T. M., & Kawaoka, Y. (1992). Evolution and ecology of influenza A viruses. *Microbiological Reviews* 56(1), 152-179.
- World Health Organization (WHO) (2005). Avian influenza A (H5N1) infection in humans. *New England Journal of Medicine*, 353, 1374-1385.

- (2009). Emergencies preparedness, response. Assessing the severity of an influenza pandemic. Recuperado de http://www.who.int/csr/disease/swineflu/assess/disease_swineflu_assess_20090511/en/index.html
- (2014). Enfermedades transmitidas por vectores. Recuperado de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs387/es/>
- Yang, X.-Q., Kushwaha, S. P. S., Saran, S., Xu, J., & Roy, P. S. (2013). Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, 51, 83- 87.
- Yarza, F. (2014). *Branta canadensis*. *Animal Diversity Web*. Recuperado de https://animaldiversity.org/accounts/Branta_canadensis/

Implementación de SIG para la rehabilitación forestal y agroforestería en las ANP de Tutuaca y Papigochi

César Arturo Gutiérrez Ramos • Mario Iván Uc Campos
María Elena Torres Olave • Lara Cecilia Wiebe Quintana
Manuel Octavio González León

México es la cuarta nación en cuanto a riqueza de especies se refiere, destacando no solo por las que alberga, sino también por su riqueza de endemismos y por la gran variedad de genética mostrada en muchos grupos taxonómicos (Sarukhán *et al.*, 2009). Dentro de esta variedad se encuentran los bosques y selvas, los cuales son fuentes de producción de oxígeno, participan en el ciclo hidrológico, protegen al suelo de la erosión y contribuyen a una reserva biogenética excepcional (Mas, Sorani, & Álvarez, 1996). La conservación y manejo sustentable de los bosques del planeta, así como su restauración, son impostergables (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2013a). Una problemática histórica y actual es la desaparición de las cubiertas arboladas; pues está relacionada con la pérdida de la biodiversidad, la degradación de los suelos, los cambios de paisaje y de uso de suelo, y la acumulación atmosférica de CO₂; además, tal riqueza constituye un patrimonio nacional que es prioritario conservar por su enorme capacidad para generar beneficios ecológicos, sociales y económicos (Mas *et al.*, 1996).

Sin embargo, se observa que los ecosistemas terrestres han sufrido grandes transformaciones, en gran parte por el cambio de cobertura

vegetal y uso de suelo, y es cada vez más evidente la transformación que sufren el territorio y el paisaje; estos procesos comúnmente provocados por la acción antrópica, como la deforestación y degradación forestal, traen consecuencias en todas las escalas, por ejemplo, se ha comprobado que perturban el clima global y ponen en riesgo una fuente importante de captura de carbono (Pineda *et al.*, 2009). Entender el impacto que ocasiona el cambio de uso y cobertura del terreno significa estudiar factores ambientales y socioeconómicos que afectan su uso. Sin embargo, no existen análisis cuantitativos de la importancia relativa de dichos factores con el cambio de la cobertura y uso del terreno, ya que las interpretaciones de cómo estos factores interactúan para estimular el cambio varían ampliamente de una región a otra (Bocco, Mendoza, & Masera, 2001).

El manejo sustentable de las masas forestales es primordial para conservar la biodiversidad, mantener la composición forestal, sus valores asociados y el paisaje del ecosistema (Hernández *et al.*, 2013). Para garantizar lo anterior, se cuenta con Áreas Naturales Protegidas (ANP), que son herramientas de conservación que cumplen una amplia gama de objetivos y proporcionan una multitud de beneficios, tanto para los pobladores de zonas aledañas como para la región, el país y el planeta (Comisión Nacional para Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio], 2016c). En este contexto, las ANP juegan un papel de gran relevancia, al ser consideradas dentro de un marco real de operatividad y normatividad, pues ofrecen particularidades que permiten conservar los ecosistemas, al mismo tiempo en que asumen el factor social como aspecto clave para la generación de resultados, esto es, en cuidado y uso sostenible de los recursos naturales en beneficio de la sociedad y el entorno natural por igual (Ruiz, & Arellano, 2010).

Otra herramienta del manejo sustentable de los recursos naturales es la agroforestería, la cual es frecuentemente señalada como una solución a los problemas de degradación del suelo y del agua, y como una respuesta a la escasez y demanda de alimento, leña, ingreso, forraje animal y materiales de construcción. La agroforestería puede ofrecer soluciones parciales para diversos problemas productivos y de uso del suelo en las zonas rurales (Mendieta, & Rocha, 2007).

El término agroforestería no figuraba antes de 1977 como tal, sino que tenía otros equivalentes (silvoagricultura y agrosilvicultura); los primeros intentos para definir qué es la agroforestería se presentaron a mediados de la década de los setenta, proliferaron en la siguiente década y no dejaron de manifestarse en los noventa (Ospina, 2004).

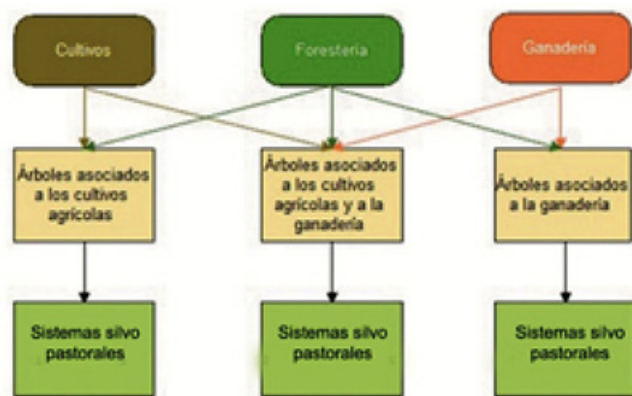
Los sistemas agroforestales son una forma de uso del suelo en donde leñosas perennes interactúan biológicamente en un área con cultivos o animales, con el propósito fundamental de recuperar, diversificar y optimizar la producción respetando el principio de sostenibilidad (López, 2008).

Las técnicas agroforestales son utilizadas en zonas de diversidad ecológica, económica y social; en regiones con suelos fértiles, los sistemas agroforestales pueden ser muy productivos y sostenibles; igualmente, estas prácticas tienen un alto potencial para mantener y mejorar la productividad en áreas que presenten problemas de baja fertilidad y exceso o escasez de humedad en los suelos (Farrel, & Altieri, 1999). Es una actividad practicada a nivel mundial, dirigida a la conservación y fertilidad del suelo, así como a la diversificación de la producción agrícola para mejorar la economía del agricultor e incrementar la producción de madera para combustible y construcción (Lagerlöf *et al.*, 2014). Los propietarios de tierras (predios o parcelas), granjeros y agentes de extensión necesitan estar mejor informados acerca de las diferentes oportunidades de la agroforestería y especies de árboles potenciales (Ellis *et al.*, 2000).

Una de las primeras clasificaciones fue expuesta por Combe y Budowski en 1979, la cual considera un primer nivel tomando en cuenta los tipos de cultivos asociados (Figura 1).

Como primera instancia, Paquette y Domon (1997) –mediante información de alta resolución de las cualidades geomorfológicas de los periodos 1842-1871 y 1881-1951 del municipio de Godmanchester ubicado en Quebec, Canadá– categorizaron el cambio y uso del suelo, obtuvieron como resultado que la fluctuación constante en el paisaje agroforestal y la falta de influencia de las características abióticas en la dinámica de uso del suelo representan dos particularidades específicas de este paisaje del siglo XIX.

Figura 1. Clasificación de los sistemas agroforestales según los cultivos asociados



Fuente: elaboración propia con base en la Conafor (2013a).

Reisner *et al.* (2007) mencionan que se ha propuesto la agroforestería como una alternativa de uso de suelo para Europa. Ellos integran en un sistema de información geográfica (SIG): datos del suelo, clima, topografía y cobertura del suelo, para identificar regiones destinadas para áreas agroforestales, donde i) Se dé el crecimiento productivo de ciertos árboles y ii) En donde los sistemas agroforestales puedan reducir el riesgo de la erosión del suelo, la lixiviación de los nitratos y contribuyan al aumento de la diversidad en el paisaje.

En trabajos más recientes, como el de Marull *et al.* (2014), se realizó un estudio histórico del área catalán en Europa donde se evaluó el cambio de uso del suelo. Los resultados muestran el papel importante para la conectividad que desempeñan los mosaicos agroforestales tradicionales, proporcionando una matriz de tierra heterogénea, pero continua, capaz de mantener una alta riqueza de especies. Sin embargo, estos mosaicos agroforestales están actualmente desapareciendo debido a la expansión urbana en curso y a la intensificación de la agricultura en la llanura, además de la deforestación que lleva al abandono rural en las montañas.

Fratini *et al.* (2016) muestran el lado negativo de la sobrepoblación de especies animales, así como el deterioro de los sistemas agroforestales.

les, lo que causa un desequilibrio en los ecosistemas agrícolas y forestales. Su propósito es dar a conocer algunas posibilidades para la recuperación de la sustentabilidad.

Por otro lado, Ellis *et al.* (2000) crearon una plataforma llamada The Florida Agroforestry Decision Support System (FADSS), la cual está basada en el Structured Query Language (SQL). Esta integra información geográfica de diferentes variables, como el clima y características del suelo, además de incorporar una base de datos de quinientos árboles y cincuenta propiedades de los mismos. Además, permite al usuario conocer las diferentes oportunidades de la agroforestería en Florida, Estados Unidos.

Los principales problemas presentados en el ANP de Papigochi son el resultado de la fragmentación del hábitat causada por el cambio de uso del suelo para su empleo agrícola, pecuario o asentamientos humanos. Mientras que en el ANP de Tutuaca son causados principalmente por las actividades forestales y las obras mineras antiguas, lo que genera problemas de contaminación del agua y el suelo por metales pesados (plata, plomo y zinc) en las zonas de aprovechamiento minero.

Papigochi presenta mucha actividad forestal que, además de afectar al suelo y las poblaciones de flora silvestre, también altera los sitios de anidación y alimentación de las aves presentes. La tala clandestina en Papigochi también es causante de incendios forestales gracias a que la materia vegetal desechada se convierte en combustible de ignición. Además, los mismos pobladores provocan incendios para obtener permisos para el aprovechamiento forestal y la agricultura.

Las ANP han adquirido gran importancia en México, ya que son regiones poco modificadas. Cada beneficio de las ANP está relacionado con objetivos específicos del manejo y la conservación, tales como el mantenimiento de muestras de áreas con grandes formaciones bióticas y rasgos fisiográficos en un estado natural, la protección de especies o hábitats endémicos, la conservación de paisajes sobresalientes o rasgos naturales de valor estético, y la conservación de áreas donde los recursos renovables puedan ser cosechados y utilizados con base en un rendimiento sustentable.

Además, estas zonas tienen un gran valor socioeconómico en México, debido a que un gran número de poblaciones humanas tienen la oportunidad de vivir en un ANP y participar directamente en su manejo integral.

La importancia de Tutuaca radica en su gran diversidad de especies, principalmente la presencia de aves migratorias –entre las más importantes está la cotorra serrana occidental (*Rhynchopsitta pachyrhyncha*)–. Mientras que en Papigochi está dada por la biodiversidad de los bosques de árboles esclerófilos de hoja perenne, debido a que estos ayudan a la captación de agua, producción de oxígeno, y captura de carbono; además del aprovechamiento de su madera y su intervención en otras prácticas de valor incuestionable.

La agroforestería es una herramienta que ayuda en el manejo de áreas forestales, principalmente en las zonas de amortiguamiento, contribuyendo a la conservación de la biósfera y sustentabilidad de las ANP. El objetivo planteado en este trabajo fue obtener un plan de reforestación y manejo sustentable de ANP, implementando la agroforestería como la principal herramienta; y su hipótesis: el empleo de métodos geoespaciales mediante SIG permitirá ubicar los espacios idóneos para la recuperación de especies arbóreas valiosas y caracterizar las regiones ideales para especies de doble uso.

Materiales y métodos

ÁREA DE ESTUDIO

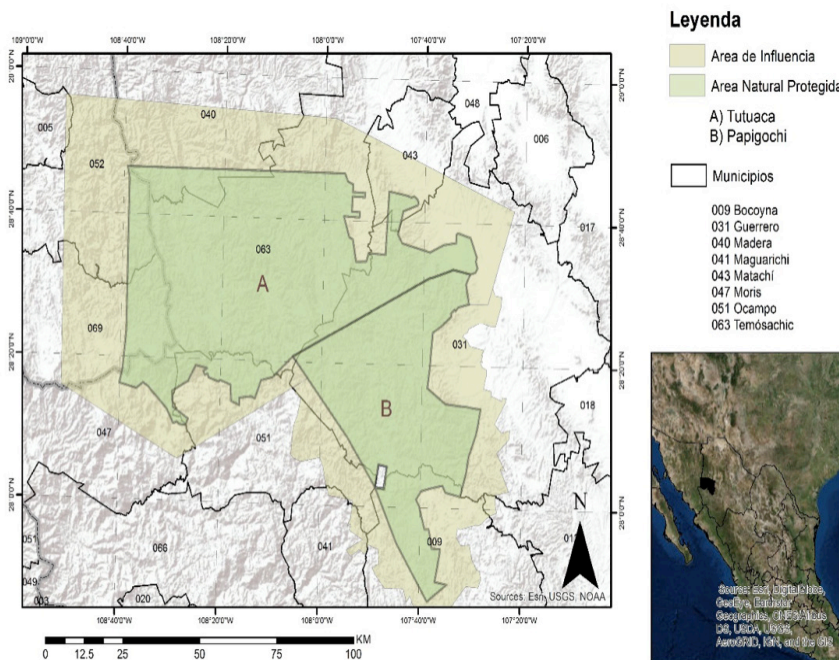
Se encuentra al oeste del estado de Chihuahua (Figura 2). El ANP de Tutuaca se ubica en los municipios de Temósachi, Guerrero, Matachí, Madera, Moris y Ocampo, está comprendida entre los paralelos 28°19' y 28°48' latitud norte y los meridianos 107°45' y 108°35' longitud oeste (Conanp, 2014). Sus rangos altitudinales van desde 400 hasta 2760 metros sobre el nivel del mar (msnm) (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [Conanp], 2014). Tiene un área de 436 985.55 ha y su área de influencia es de 449 816.601 ha (Conabio, 2016b). Su vegetación consiste mayormente de bosque de coníferas y de encinos, además de vegetación

inducida; cuenta con 4168 habitantes, aproximadamente (Sistema de Información, Monitoreo y Evaluación para la Conservación [SIMEC], 2016b).

Por otro lado, el ANP de Papigochi se encuentra en los municipios de Guerrero, Bocoyna y una pequeña parte de Temósachi y Ocampo; su delimitación queda comprendida entre los paralelos 27°45' y 28°35' latitud Norte y los meridianos 107°20' y 108°15' longitud Oeste; con un área de 222 763.85 y un área de influencia de 181 988.94 ha; la altitud de la zona es desde 500 hasta 3000 msnm (Conanp, 2012). Su vegetación está constituida por coníferas, encinos, pastizales, áreas sin vegetación y vegetación inducida; cuenta con 6907 habitantes, aproximadamente (SIMEC, 2016a).

Figura 2. Área de estudio.

Áreas Naturales Protegidas de Tutuaca y Papigochi



Fuente: elaboración propia.

Metodología

Primeramente, se realizó la modelación de la distribución potencial de cuatro especies arbóreas representativas o endémicas del área de interés (Tabla 1).

Tabla 1. Especies arbóreas locales de las ANP de Tutuaca y Papigochi

Especie	Tutuaca	Papigochi
Quercus tarahumara	Endémica	Representativa
Pseudotsuga menziesii	Representativa	
Pinus cembroides	Representativa	
Picea chihuahuana	Representativa	Endémica

Fuente: elaboración propia con base en SIMEC (2016a) y SIMEC (2016b).

Para el modelamiento se utilizó el *software* Máxima Entropía (MaxEnt).

La idea de MaxEnt es estimar una distribución de probabilidad final encontrando la distribución de probabilidad de entropía máxima (es decir, que está más extendida o más cercana al uniforme), sujeto a un conjunto de restricciones que representan nuestra información incompleta sobre la distribución final. Cuando MaxEnt se aplica al modelo de distribución de especies de presencia solamente, los píxeles del área de estudio constituyen el espacio en el que se define la distribución de probabilidad MaxEnt, los píxeles con registros de ocurrencia de especies conocidas constituyen los puntos de muestreo y las “características” son variables climáticas, categoría de suelos, tipo de vegetación u otras variables ambientales, y sus funciones (Phillips, Anderson, & Schapire, 2006).

Los registros de presencia de la especie se obtuvieron de la página web de Información Mundial de Biodiversidad Biológica (GBIF, por sus siglas en inglés) (<http://www.gbif.org/species>). Los datos de ocurrencia son registrados con su información de ubicación: latitud (Y) y longitud (X) en grados decimales.

Estos se depuraron eliminando los campos que no correspondieran al nombre de la especie y sus coordenadas, utilizando el *software* MO Excel 2007™ para después eliminar los puntos que se encontraran fuera del área de estudio mediante ArcMap en su versión 10.3 de ESRI™.

Como “características” se utilizaron las variables bioclimáticas obtenidas de la página web WorldClim (<http://www.worldclim.org/bio-clim>), las cuales se derivan de las temperaturas mensuales y valores de precipitación para generar las variables más significativas biológicamente; representan las tendencias anuales (por ejemplo, temperatura media anual, precipitación anual), la estacionalidad (por ejemplo, rango anual de temperatura y precipitación) y factores ambientales extremos (por ejemplo, temperatura del mes más frío y más caliente) (Hijmans *et al.*, 2005). Además, se tomaron en cuenta variables topográficas, como la altitud, pendientes y la orientación de laderas, generadas a partir del modelo digital de elevaciones de WorldClim. Todas las variables utilizadas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Variables o características utilizadas

Nombre	Variable	Resolución	Extensión
Bio1	Temperatura media anual	1 km	Global
Bio2	Rango de temperatura media mensual	1 km	Global
Bio3	Isotermalidad (Bio2/Bio7)*(100)	1 km	Global
Bio4	Estacionalidad de la temperatura	1 km	Global
Bio5	Temperatura máxima del mes más cálido	1 km	Global
Bio6	Temperatura mínima promedio del periodo más frío	1 km	Global
Bio7	Oscilación anual de la temperatura	1 km	Global
Bio8	Temperatura media del trimestre más húmedo	1 km	Global
Bio9	Temperatura media del trimestre más cálido	1 km	Global
Bio10	Temperatura media del trimestre más seco	1 km	Global
Bio11	Temperatura promedio del cuatrimestre más frío	1 km	Global
Bio12	Precipitación anual	1 km	Global
Bio13	Precipitación del mes más húmedo	1 km	Global
Bio14	Precipitación del mes más seco	1 km	Global
Bio15	Estacionalidad de la precipitación	1 km	Global
Bio16	Precipitación del trimestre más húmedo	1 km	Global
Bio17	Precipitación del trimestre más seco	1 km	Global
Continúa...			

Nombre	Variable	Resolución	Extensión
Bio19	Precipitación del trimestre más frío	1 km	Global
Alt	Modelo digital de elevaciones	1 km	Global
Pendientes	Pendientes	1 km	Nacional
Orientación	Orientación de laderas	1 km	Nacional

Fuente: elaboración propia con base en Hijmans *et al.* (2005).

Se analizó la correlación espacial de las variables en el área de estudio mediante los datos de presencia de cada especie, con el fin de eliminar información redundante. Para ello, mediante ArcMap, se extrajeron los valores de las variables con base en los puntos de presencia para posteriormente analizarlos con el *software* IBM SPSS Statistics 22TM utilizando la correlación de Spearman de dos colas, *bootstrap* de 1000 repeticiones, a un 95 % de nivel de confianza.

Restrepo y González (2007) mencionan que el coeficiente de correlación de Spearman es un coeficiente no paramétrico alternativo al coeficiente de correlación de Pearson cuando este no cumple los siguientes supuestos:

1. Debe existir una relación de tipo lineal entre las variables (X, Y).
2. Para cada valor de X, hay una subpoblación de valores de Y normalmente distribuidos.
3. Para cada valor de Y, hay una subpoblación de valores de X normalmente distribuidos.

Martínez Ortega *et al.* (2009) recomiendan el uso del coeficiente de correlación de Spearman cuando los datos presentan valores extremos, ya que dichos valores afectan el coeficiente de correlación de Pearson, o ante distribuciones no normales, lo cual sucede en nuestro caso por la pequeña muestra que se tiene. Se omitieron en el análisis las variables con correlación de 0.80 en adelante, cuyo nivel de correlación, como lo mencionan los autores anteriores, va de “buena” a “perfecta” correlación.

Como último paso antes de realizar el análisis de MaxEnt fue necesario que las bases de datos de presencia estuvieran en formato de base de datos csv (comma-separated values) y que las variables a utilizar

estuvieran en formato ASCII con la misma extensión, tamaño de pixel y sistema de coordenadas (Phillips *et al.*, 2006).

MaxEnt produce como resultado principal un mapa o modelo del nicho fundamental de la especie mostrando la probabilidad prevista de que las condiciones sean adecuadas o no, con valores de 0 a 1, siendo 1 las condiciones más óptimas (Phillips, 2011). En este proceso, se generaron veinte modelos para México utilizando el método de remuestreo *bootstrap*, el cual consiste en una selección por muestreo con sustitución de los puntos de presencia, con el número de muestras igual al número total de puntos de presencia (Phillips, 2011).

La evaluación de los modelos se realizó mediante la curva operada por el receptor (ROC, por sus siglas en inglés) calculando el área bajo la curva (AUC, por sus siglas en inglés) (Phillips *et al.*, 2006). Los valores de AUC varían entre 0.5 para un modelo aleatorio no informativo y 1 para un modelo con discriminación perfecta (Guisan *et al.*, 2006). Se seleccionaron los tres modelos con el valor mayor de AUC, los cuales se promediaron con ArcMap, para después reclasificarlos mediante el promedio de los valores en función del umbral del 10 percentil (que indica la probabilidad de que el 10 % de los puntos de presencia pueden caer fuera del área de predicción del área de distribución potencial) (Naranjo, Moreno, & Martín, 2014).

Mediante la base de datos de la página The World Agroforestry Centre (ICRAF) (<http://www.worldagroforestry.org/output/agroforestry-tree-database>), se realizó una búsqueda de las diferentes plantas utilizadas para la agroforestería. El ICRAF es un centro de investigación del CGIAR y sus instalaciones principales están en Nairobi, Kenia, con seis oficinas regionales en Camerún, China, India, Indonesia, Kenia y Perú. El ICRAF genera conocimientos científicos de forma directa e indirecta sobre la agroforestería, o árboles en sistemas granjeros y de agricultura; además, difunde este conocimiento para desarrollar opciones políticas y promover prácticas que mejoren los medios de subsistencia y benefician el medioambiente (The World Agroforestry Centre, 2016).

En la búsqueda, se tomaron en cuenta las especies nativas de México, que además tienen aprovechamiento alimenticio, de tala y fijación

de nitrógeno, ya que son los puntos importantes a tratar en el área de interés.

Con base en el “Anexo: Resumen del Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Tutuaca” (Conabio, 2016b) y el “Programa de manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Papigochi” (Conanp, 2012) se realizó una lista de las posibles especies agroforestales. De la lista resultante, se buscó en la base de datos de la Conabio de especies exóticas invasoras (<http://www.biodiversidad.gob.mx/especies/Invasoras/especies.html>), con el fin de descartar las especies que se encontrarán en esta lista, ya que los textos antes mencionados indican que está prohibida su introducción.

Se prosiguió a realizar una revisión bibliográfica acerca de las especies a caracterizar, con el fin de descartar las especies que necesitan características ambientales muy diferentes al área de estudio. Las especies elegidas y sus preferencias medioambientales se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Preferencias ambientales de las especies agroforestales

	Región y temperatura media anual	Altitud (msnm)	Precipitación anual (mm)	Rangos de humedad	Textura de suelos	pH del suelo	Rocas
<i>Cupressus lindleyi</i>	Subhúmeda, 12 °C	1300-3000	1000 a 3000	Subhúmedo	Fina y media	Ligeramente ácido a neutro	Ígnea y sedimentaria
<i>Alnus acuminata</i>	Húmeda-subhúmeda, 4 a 27 °C	1300-2800	1000 a 3000	Húmedo-subhúmedo	Media	Ácido de 4-6	
<i>Quercus rugosa</i>	Templada subhúmeda	1100-3050	1540 a 1619	Subhúmedo	Fina	5.3-6.3	

Fuente: elaboración propia con base en la Conabio (2016a), Conabio (2016d) y Conabio (2016f).

Las capas utilizadas se muestran en la Tabla 4, las cuales se recorrieron con respecto a nuestra área de interés. Posteriormente, se reclasificaron con valores de 0 si las condiciones no son las necesarias para la planta y de 1 si la descripción cumple con lo necesario. Se realizó una intersección de todas las variables para luego realizar una suma de to-

dos los valores 0 y 1, para al final solo tomar en cuenta los lugares que cumplen con todas las condiciones. La capa de pH (potencial de hidrógeno) se omitió al final, porque todo el territorio es apto en cuestiones del mismo para todas las especies. Se produjeron seis criterios para el *Cupressus lindleyi* y cinco para las otras dos.

La capa que contiene la variable de pH son valores puntuales, por lo cual se tuvo que interpolar y validar. Para ello, la base de datos se ha depurado con base en el Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (AEDE); estos han sido estandarizados (se eliminó información redundante con base en la ubicación geográfica, el primer cuartil de 25 % y el tercer cuartil de 75 %), como lo sugieren Uc Campos *et al.* (2015).

Se interpoló mediante el método Kriging, que es una técnica que emplea la dependencia espacial existente entre las observaciones para estimar los valores de una variable en lugares no muestreados, sin sesgo y con mínima varianza (Lozano *et al.*, 2004). Se interpoló el 95 % de las muestras dentro del área de interés mediante el geoestadístico de Kriging ordinario (k_o), ajustando los estadísticos de semivariograma, *nugget* y *sill*, y tomando una anisotropía verdadera. El método Kriging proporciona un análisis más elaborado y con un fundamento estadístico, por lo que puede ser el preferido cuando la intensidad de muestreo es mayor, aunque esto significaría costos mayores (Villatoro, Henríquez, & Sancho, 2008).

Tabla 4. Capas utilizadas en el análisis de caracterización de las especies agroforestales

Nombre de la capa	Formato	Escala	Variable que representa	Fuente	URL (año)
Conjunto de datos vectoriales edafológicos Serie II	Puntos	1:250000	pH	Inegi	http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/edafologia/vectorial_seriei.aspx (2006)
Continuo de elevaciones Mexicano 3	Ráster	15 m	Altitud	Inegi	http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx (2013)

Continúa...

Nombre de la capa	Formato	Escala	Variable que representa	Fuente	URL (año)
Climas	Polígono	1:1000000	Región y temperatura media anual	Conabio	http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/ (1998)
Precipitación anual en México (1910-2009)	Polígono	1:1000000	Precipitación anual	Conabio	http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/ (2014)
Rangos de humedad	Polígono	1:4000000	Rangos de humedad	Conabio	http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/ (1990)
Conjunto de datos vectoriales. Perfiles de suelos	Polígono	1:1000000	Textura de suelo	Inegi	http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267636 (2014)
Rocas	Polígono	1:1000000	Tipo de rocas	Inegi	http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/geologia/infoescala.aspx

Fuente: elaboración propia.

Para validar la interpolación, se utilizó el otro 5 % de los datos de la base de datos. Para ello, se ha recurrido a la metodología de Raíz del error medio cuadrático (RMSE), el cual debe ser calculado como se muestra en la siguiente ecuación (Ritter, Muñoz, & Regalado, 2008).

$$RMSE = \sqrt{\sum \frac{(Pi - Oi)^2}{N}} \text{ Ec. 1}$$

Donde:

- RMSE = Raíz del error medio cuadrático
- Oi = Valor observado
- Pi = Valor de predicción
- N = Tamaño de la muestra

Para finalizar, en este trabajo se utilizó la capa vectorial “Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie v (continuo nacional)”, del Inegi, descargada del portal de la Conabio (<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>). Se recortó la capa con base en el área de interés, para posteriormente realizar una reclasificación de las categorías de uso del suelo, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Reclasificación de las categorías de la capa de uso del suelo y vegetación

Categoría original	Categoría nueva
Agricultura de riego anual	Agricultura
Agricultura de riego anual y permanente	
Agricultura de riego permanente	
Agricultura temporal anual	
Asentamientos humanos	Asentamientos humanos
Zona urbana	Bosque de ayarín
Bosque de ayarín	
Bosque de encino	Bosque de encino
Bosque de encino-pino	Bosque de pino / encino
Bosque de pino-encino	
Bosque de pino	Bosque de pino
Cuerpo de agua	Cuerpo de agua
Selva baja caducifolia	Selva baja caducifolia
Pastizal inducido	Pastizal
Pastizal natural	
Desprovisto de vegetación	Sin vegetación aparente
Sin vegetación aparente	
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino	Vegetación secundaria
Vegetación secundaria arbórea de bosque de selva baja caducifolia	
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino	
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino-pino	
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	

Fuente: elaboración propia.

Resultados

Como primeros resultados, se obtuvieron los tres mejores modelos de los veinte llevados a cabo para la predicción de cada especie arbórea local, los cuales se seleccionaron —como se menciona anteriormente— conforme a la mayor AUC obtenida por cada modelo. Los modelos que se tomaron en cuenta, se presentan en la Tabla 6, que muestra que todos los modelos, excepto el de *Pinus cembroides*, tienen valores más altos que 0.94 en la AUC promedio.

Tabla 6. Valores estadísticos obtenidos a partir de la modelación de MaxEnt con los mejores modelos

Especie	Modelo	AUC media	Test AUC	10 percentil	Especie	Modelo	AUC media	Test AUC	10 percentil
<i>Picea chihuahuana</i>	3	0.973	0.9928	0.4962	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	17	0.942	0.9653	0.2099
	11		0.9912	0.3953		5		0.965	0.0684
	13		0.988	0.1009		19		0.9465	0.087
<i>Pinus cembroides</i>	19	0.878	0.8793	0.2813	<i>Quercus tarahumara</i>	0	0.973	0.9889	0.4986
	7		0.877	0.1553		14		0.9886	0.2082
	13		0.8741	0.2911		18		0.9824	0.2361

Fuente: elaboración propia con base en resultados derivados de MaxEnt.

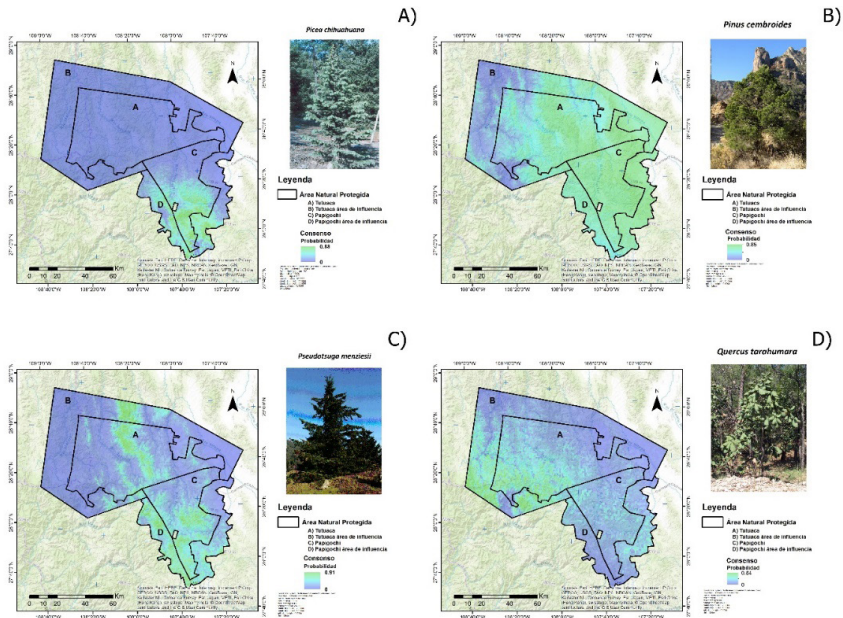
En la Figura 3 se muestran los mapas consenso, que indican la probabilidad de distribución de cada especie en el área. Sus valores van de 0 a 1, donde el valor más alto muestra la mayor probabilidad de que exista esta especie en el área de estudio. En la Figura 4 se presentan los mapas dicotómicos de ausencia-presencia generados a partir del reclasificado de los mapas consenso.

En la Figura 5 se muestran la ROC de cada especie. El AUC de entrenamiento promedio para las repeticiones es 0.973, mientras que la desviación estándar es 0.021 para *Picea chihuahuana*; 0.878 y 0.024 para *Pinus cembroides*; 0.942 y 0.013 para *Pseudotsuga menziesii*; y 0.973 y 0.011 para *Quercus tarahumara*, respectivamente.

En la Tabla 7 se proporcionan las estimaciones de las contribuciones relativas de las variables utilizadas en el modelo MaxEnt. Los valores mostrados son promedios sobre las repeticiones.

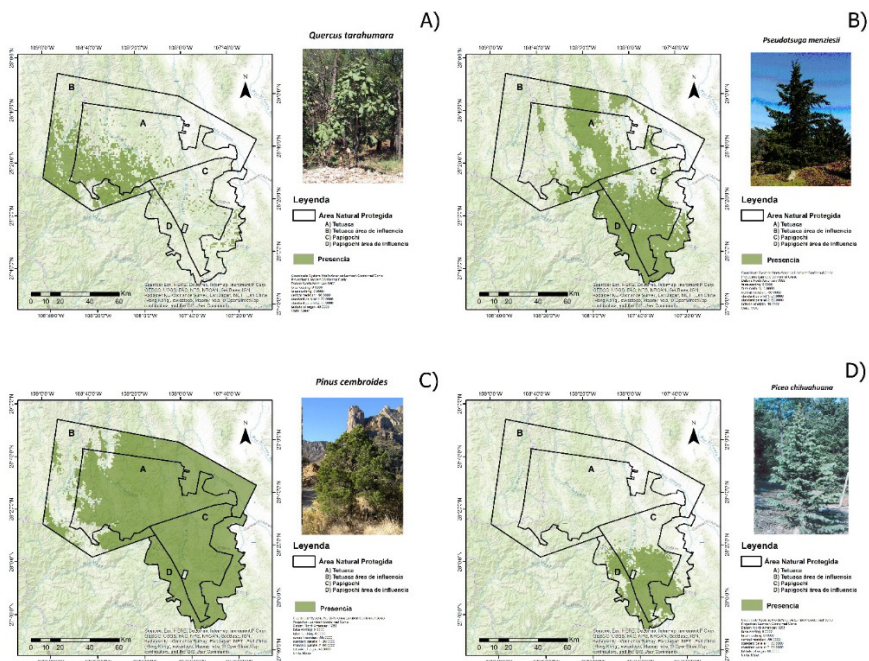
En la Figura 6 se muestra el resultado del análisis de Jackknife con respecto al AUC y se presenta la importancia de las variables en el modelaje. Para *Picea chihuahuana*, la variable Bio14 (precipitación del mes más seco) es la que más información aporta al modelo; en el caso de *Pinus cembroides*, la variable Alt es la más importante; para *Pseudotsuga menziesii*, la variable Bio14 es la más significativa; y, finalmente, para *Quercus tarahumara* es la variable Bio3 (isotermalidad).

Figura 3. Mapas consenso: A) *Picea chihuahuana*; B) *Pinus cembroides*; C) *Pseudotsuga menziesii*; D) *Quercus tarahumara*



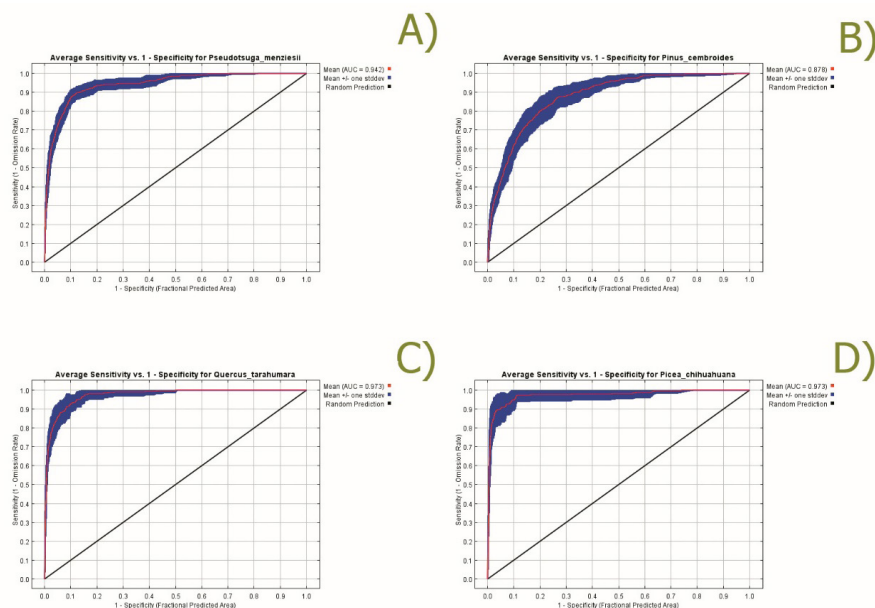
Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Mapas dicotómicos: A) *Quercus tarahumara*; B) *Pseudotsuga menziesii*; C) *Pinus cembroides*; D) *Picea chihuahuana*



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Curvas operadas por el receptor (ROC): A) *Pseudotsuga menziesii*; B) *Pinus cembroides*; C) *Quercus tarahumara*; D) *Picea chihuahuana*



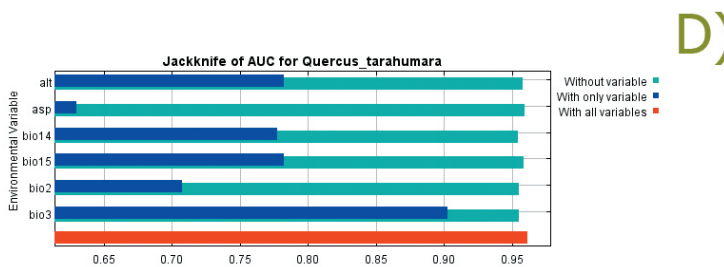
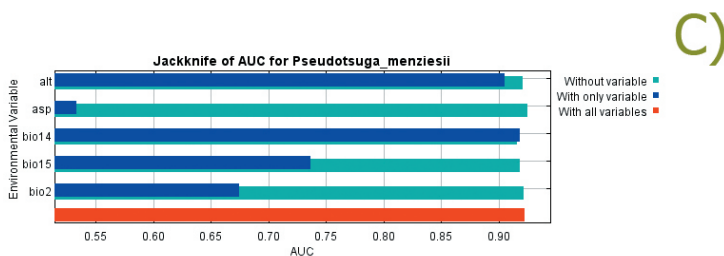
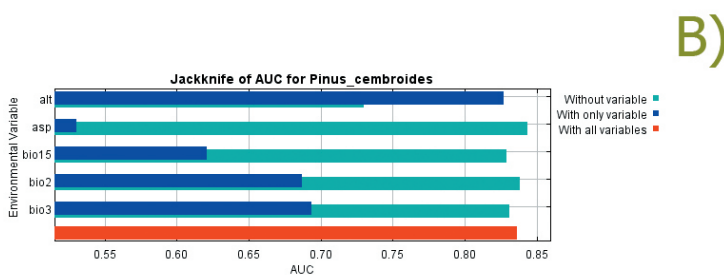
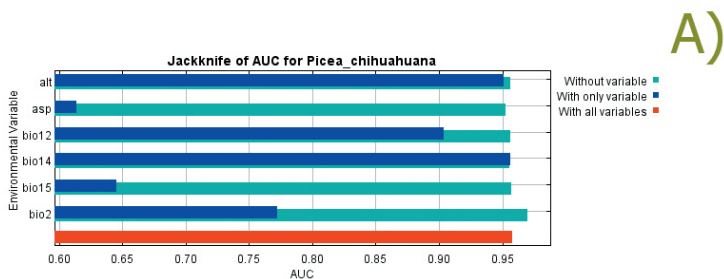
Fuente: elaboración propia con base en resultados derivados de MaxEnt.

Tabla 7. Contribuciones de variables en el modelaje de MaxEnt para cada especie

Especie	Variable	Porcentaje de contribución	Especie	Variable	Porcentaje de contribución
<i>Picea chihuahuana</i>	Bio14	71.8	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Bio14	46.3
	Bio2	12.9		Alt	43.9
	Alt	10.4		Bio15	6.7
	Asp	2.7		Asp	2.1
<i>Pinus cembroides</i>	Alt	75.3	<i>Quercus tarahumara</i>	Bio3	41.3
	Bio3	10.2		Bio15	18.9
	Asp	5.9		Alt	16.2
	Bio15	5.1		Bio14	11.2

Fuente: elaboración propia con base en resultados derivados de MaxEnt.

Figura 6. Resultados de Jackknife en el modelaje: A) *Picea chihuahuana*; B) *Pinus cembroides*; C) *Pseudotsuga menziesii*; D) *Quercus tarahumara*



Fuente: elaboración propia con base en resultados derivados de MaxEnt.

Con base en las fichas técnicas de la Conabio (2016), se generaron las tablas 8, 9, 10 y 11. En la Tabla 8 se muestran las resistencias y tolerancias de las especies a diferentes factores, tanto físicos como biológicos y climáticos. Se puede ver que, en relación con los suelos, *Quercus rugosa* tolera casi todo tipo de suelos, sequías y hasta la contaminación por fluoruro; *Cupressus lindleyi* tolera suelos bastante pobres y degradados, y tiene resistencia a los hongos; *Alnus acuminata* resiste heladas y hongos, y es tolerante a suelos compactos y pobres, entre otros; mientras que *Pinus cembroides* resiste las heladas y algunos hongos, pero a la vez tolera temperaturas muy elevadas.

Tabla 8. Resistencias y tolerancias de las especies agroforestales

	Resistencia	Tolerancia 2	Tolerancia 3	Tolerancia 4	Tolerancia 5	Tolerancia 6	Tolerancia 7	Tolerancia 8
<i>Quercus rugosa</i>	Sequía	Suelos someros	Suelos ácidos	Suelos secos	Suelos húmedos	Suelos pedregosos	Semi-sombra	Contaminación (fluoruro)
<i>Cupressus lindleyi</i>	Hongos	Suelos someros	Suelos arenosos	Suelos pobres	Suelos ácidos	Suelos calizos	Suelos secos	
<i>Alnus acuminata</i>	Heladas/hongos	Suelos someros	Suelos compactados	Suelos pobres				
<i>Pinus cembroides</i>	Heladas/sequías	Temperaturas elevadas	Suelos someros					

Fuente: elaboración propia con base en Conabio (2016a), Conabio (2016d) y Conabio (2016f).

La Tabla 9 muestra las diferentes desventajas de las especies, así como a qué factores son sensibles o intolerantes. Por ejemplo, *Cupressus lindleyi* es sensible a la contaminación ambiental, al viento, al daño por bacterias e insectos y tolera muy poco la sombra; mientras que *Alnus acuminata*, al igual que la especie anterior, es sensible al viento y al daño por insectos, pero también a ciertos tipos de hongos.

Tabla 9. Sensibilidades e intolerancia de las especies agroforestales

	Sensible	Sensible	Sensible	Sensible	Sensible	Intolerante
<i>Cupressus lindleyi</i>	Contaminación ambiental	Daño por viento	Competencia por maleza	Daño por bacterias	Daño por insectos	Poca tolerancia a la sombra
<i>Alnus acuminata</i>	Daño por viento	Competencia por maleza	Daño por hongos	Daño por insectos		
<i>Quercus rugosa</i>	Daño por insectos	Daño por hongos	Daño por ácaros			
<i>Pinus cembroides</i>	Daño por insectos	Contaminación ambiental				

Fuente: elaboración propia con base en Conabio (2016a), Conabio (2016d) y Conabio (2016f).

Las tablas 10 y 11 muestran los usos antropogénicos y las aportaciones medioambientales de las especies, respectivamente. La madera de *Quercus rugosa* se utiliza como combustible y en la industria, se emplea como curtiente de pieles y para medicamentos; además, esta especie es formadora de suelos, de cobertura de hojarasca y ayuda a la infiltración del agua, entre otros.

La madera de *Alnus acuminata* se emplea en diferentes ámbitos: combustible, en la industria, material de construcción y artesanal, pero además tiene usos medicinales; en el ambiente ayuda al control de la erosión, favorece la fertilidad de los suelos y sirve como rompevientos, además de refugio o sombra para los animales.

La madera de *Pinus cembroides* es talada por el ser humano porque se emplea en una diversidad de ámbitos como en el caso anterior; además, ayuda a la conservación de los suelos, infiltración del agua, se utiliza como ornamento y su fruto sirve como alimento.

Cupressus lindleyi tiene los mismos usos antropogénicos que *Pinus cembroides*, pero en cuestión ambiental ayuda en la conservación de los suelos y sirve como rompevientos, además de tener un uso ornamental y de utilizarse como refugio o sombra.

Tabla 10. Usos antropogénicos de las especies agroforestales

	Uso 1	Uso 2	Uso 3	Uso 4	Uso 5	Uso 6
<i>Quercus rugosa</i>	Madera combustible	Fruto comestible	Curtiente	Forrajero	Madera industrializable	Medicinal
<i>Alnus acuminata</i>	Madera combustible	Madera construcción	Madera industrializable	Madera artesanal	Medicinal	Curtiente
<i>Pinus cembroides</i>	Adhesivo	Madera combustible	Fruto comestible	Madera construcción		
<i>Cupressus lindleyi</i>	Madera combustible	Madera construcción	Madera industrializable	Madera maderable		

Fuente: elaboración propia con base en Conabio (2016a), Conabio (2016d) y Conabio (2016f).

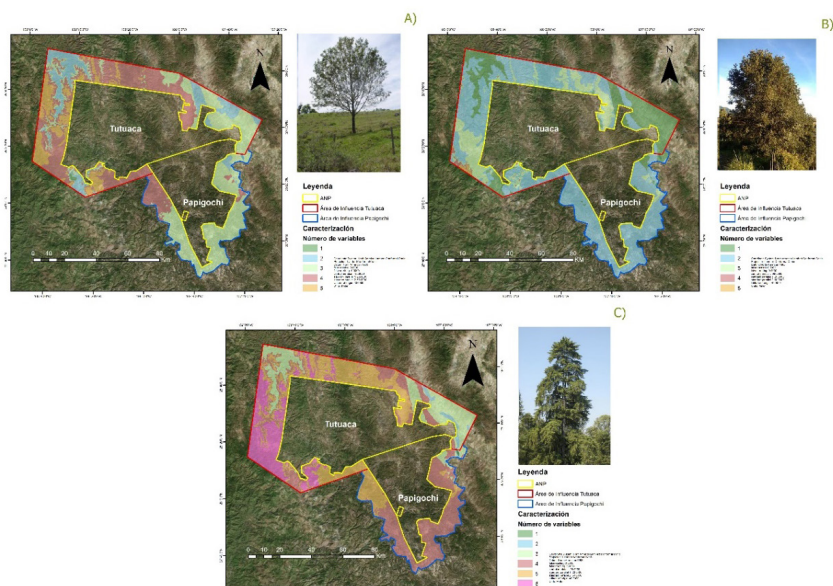
Tabla 11. Aportaciones ambientales de las especies agroforestales

	Servicio 1	Servicio 2	Servicio 3	Servicio 4	Servicio 5	Servicio 6
<i>Alnus acuminata</i>	Cobertura de hojarasca	Control de suelos (erosión, nitrógeno, estabilización de pendientes)	Fertilidad de suelos/barbecho	Rompevientos	Cerca viva	Refugio/sombra
<i>Quercus rugosa</i>	Cobertura de hojarasca	Formador de suelos	Conservación de suelos	Infiltración y conservación de mantos acuíferos	Ornamental	Refugio/sombra
<i>Pinus cembroides</i>	Conservación de suelos	Infiltración de agua; restablecimiento de mantos subterráneos	Ornamental	Refugio/sombra	Alimento silvestre	
<i>Cupressus lindleyi</i>	Conservación de suelos	Barrera rompevientos	Ornamental	Refugio/sombra		

Fuente: elaboración propia con base en Conabio (2016a), Conabio (2016d) y Conabio (2016f).

Como resultados principales de la caracterización, se obtuvieron tres mapas (Figura 7). Cabe destacar que para *Pinus cembroides* se utilizó el mapa dicotómico resultante de la modelación. Estos mapas muestran la ubicación geográfica de las áreas más aptas para las especies destinadas a sistemas agroforestales. Los valores representan el número de variables que son aptas para las especies, que van del 1 al 6, dependiendo de cada una.

Figura 7. Mapas de caracterización para las especies agroforestales: A) *Alnus acuminata*; B) *Quercus rugosa*; C) *Cupressus lindleyi*



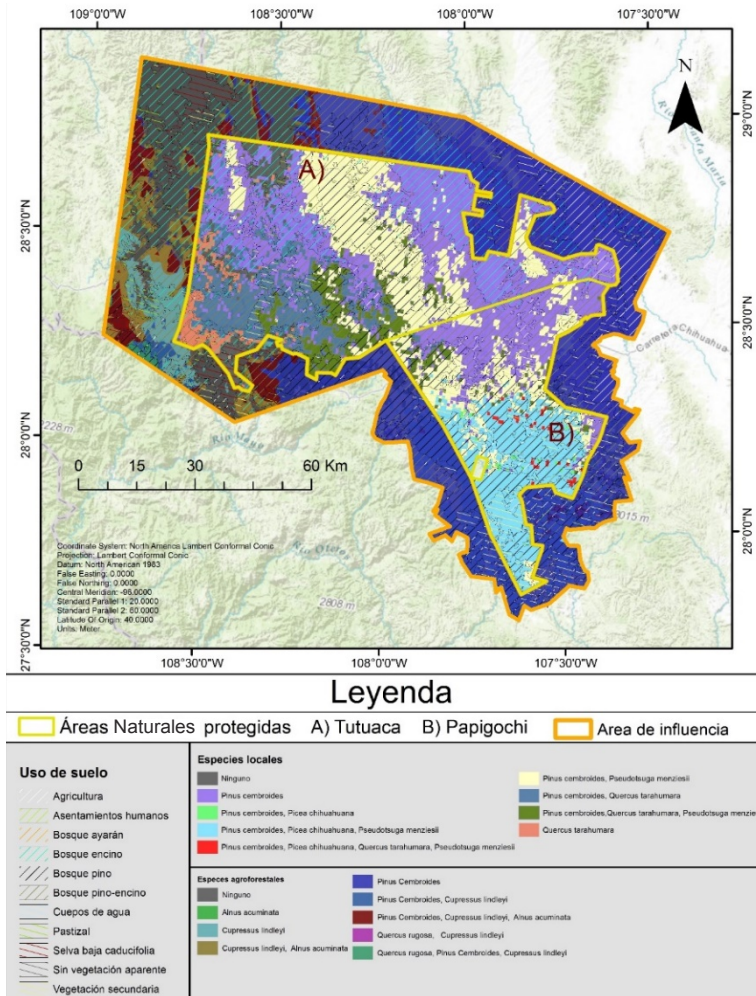
Fuente: elaboración propia.

Para *Alnus acuminata*, el área más apta para plantar la especie va desde el noroeste hasta el suroeste; para *Quercus rugosa* está al noroeste de la zona de influencia del ANP de Tutuaca; mientras que para *Cupressus lindleyi*, el área más apta es al noroeste, al igual que para *Quercus rugosa*, solo que con mayor espacio. A simple vista, *Quercus rugosa* tiene menos espacio.

Como producto final, se obtuvo la Figura 8 en donde se pueden distinguir los diversos usos de suelo de las ANP de Tutuaca y Papigochi resaltadas con líneas diagonales de diferentes colores; por ejemplo, los espacios con agricultura contienen líneas blancas; el bosque de pino, líneas negras; el pino encino, líneas verde olivo; etcétera. Las intersecciones de las especies locales se presentan en el área núcleo y cada color representa las especies arbóreas ideales para plantar; el color gris indica que ninguna especie es recomendable, mientras que el color rojo marca las zonas donde todas las especies son una buena opción, según los resultados obtenidos por MaxEnt. Finalmente, las especies de doble uso se

caracterizaron en las zonas de influencia de dichas ANP, donde, asimismo, el color gris representa los sitios en donde ninguna especie es recomendada para su plantación. No existe un lugar idóneo para las cuatro especies, pero los colores vino y verde representan el mayor número de especies ideales (tres especies).

Figura 8. Aptitud de reforestación y agroforestería en las ANP de Tutuaca y Papigochi.



Fuente: elaboración propia.

Discusión

Los SIG fueron una herramienta de suma utilidad en este proyecto, permitiendo el análisis de varios insumos geográficos para llegar al resultado final. Se pudo obtener una cartografía que muestra la distribución potencial de cuatro especies arbóreas importantes del área de estudio: *Pseudotsuga menziesii*, *Picea chihuahuana*, *Quercus tarahumara* y *Pinus cembroides*. Las primeras tres son de importancia ecológica, ya que son endémicas del país y tanto la *Pseudotsuga menziesii* como la *Picea chihuahuana* están en peligro de extinción. *Pinus cembroides* es de importancia económica para las poblaciones rurales, ya que su fruto resulta una actividad económica muy importante, además de las aportaciones al medioambiente que generan los árboles. También, nos permitieron ubicar las áreas idóneas para la utilización de cuatro especies arbóreas de los sistemas agroforestales (*Pinus cembroides*, *Cupressus lindleyi*, *Quercus rugosa* y *Alnus acuminata*), tomando en cuenta variables climáticas y propiedades de los suelos. Por lo anterior, se acepta la hipótesis, ya que se encontraron los lugares apropiados para el establecimiento de las especies.

Los modelos de distribución de especies son una herramienta empírica, robusta, repetible y fácil de utilizar, que puede ayudar a identificar potenciales zonas a conservar o restaurar (Morales, 2012). MaxEnt es un algoritmo cuya teoría es sumamente entendida y que en la práctica ha demostrado dar buenos resultados; sin embargo, es un método que tiende a “abrazar” los datos y por ello resulta mejor para “interpolarse” entre puntos de ocurrencia que para predecir áreas no observadas (Conabio, 2016e).

Los modelos de *Picea chihuahuana*, *Pseudotsuga menziesii* y *Quercus tarahumara* presentan valores del AUC superiores a 0.94, mientras que los de *Pinus cembroides* son de 0.87 en adelante; aun así esto indica que la habilidad del modelo para predecir los valores de presencia es aceptable o buena, porque tiene valores significativamente más altos que 0.5, que es un modelo realizado al azar (Phillips *et al.*, 2006).

Las variables más destacables en los modelos fueron Bio14 (precipitación del mes más seco) y Alt (altitud). La precipitación es un factor primordial para el desarrollo de las plantas y en condiciones naturales es su principal factor limitativo; casi todos los procesos fisiológicos de

los vegetales están afectados en mayor o menor medida por el agua (Gutiérrez *et al.*, 2015); por ello, la precipitación ha sido considerada como un factor crítico que regula la productividad de los ecosistemas (Plasencia, Escalona, & Esparza, 2014). La importancia de la variable altitudinal es que, al aumentar la altitud, también lo hace la cantidad de luz, por lo que aumentan las precipitaciones hacia las máximas altitudes (Emck, Moreira, & Richter, 2006).

La importancia de las coníferas en México se debe al aporte económico, ya que más del 70 % de los aprovechamientos forestales corresponden a estas especies, lo que nos lleva a realizar o recopilar estudios que conduzcan a alternativas de conservación y uso racional de los bosques (García, 2012).

Por un lado, *Pseudotsuga menziesii* es abundante e importante económicamente en Estados Unidos y Canadá, pero en México es escasa y se ha incluido en la NOM-059-SEMARNAT-2010, bajo la categoría de protección especial, lo que prohíbe su aprovechamiento (Domínguez *et al.*, 2014). Es una especie considerada de alta sensibilidad climática (Villanueva *et al.*, 2009). La variable de precipitación del mes más seco en el modelo actúa como limitante.

Mientras que la importancia de *Picea chihuahuana* radica en que su distribución geográfica en México se limita a muy pocas y pequeñas poblaciones en la sierra Madre Occidental, considerándose así como un elemento relictado endémico (García, 2008). Por ello, *Picea chihuahuana* ya ha sido modelada mediante MaxEnt por Aguilar *et al.* (2015), resultando también la variable Bio14 (Precipitación del mes más seco) la más importante a nivel estatal. Esta especie muestra un hábitat bastante restringido.

En Chihuahua y el norte de Durango entre los 2280 y 2400 msnm, se localiza *Quercus tarahumara*, un encino roble de distribución restringida que crece principalmente sobre suelos someros, hidrotérmicamente alterados (González *et al.*, 2012).

La distribución de *Pinus cembroides* se restringe a las montañas de baja altura que rodean al altiplano árido de México; por ello, la variable altitudinal es la más importante en el modelo (Romero, García, & Marie, 1996). La importancia de *Pinus cembroides* radica en que, como lo mencionan Villarreal *et al.* (2009), de esta especie se obtienen semillas comesti-

bles o piñones, leña, postes, madera para construcción de vivienda y muebles rústicos, árboles de Navidad, resina, además de servir de abrigo a la fauna silvestre y, en algunos casos, como áreas de recreo. Esta especie es de suma importancia para las comunidades rurales; además, como menciona Zavaleta (2011), funciona exitosamente para la retención de agua.

Existe una gran oportunidad para expandir la agroforestería cuyas prácticas bien diseñadas proporcionan apoyo a las operaciones agrícolas ayudando a aumentar sus ingresos. Los atributos de la agroforestería encajan perfectamente en las necesidades sociales para mantener tanto la productividad como las ganancias, los recursos naturales y el ambiente actual, así como para futuras generaciones (National Agroforestry Center, 2013). Moreno, Toledo, & Casas (2013) en su texto, “Los sistemas agroforestales tradicionales de México: una aproximación biocultural”, destacan la baja presencia de sistemas agroforestales en el norte del país, lo cual puede deberse a que efectivamente no existan sistemas agroforestales tradicionales en esta parte del país, porque no se han realizado los estudios correspondientes, o bien porque el alcance de la revisión llevada a cabo por ellos fue limitado.

Las interacciones positivas entre *Alnus acuminata* y cultivos asociados han sido reportadas previamente. Por ejemplo, en Uganda, esta especie benefició a los cultivos asociados cuando se cultivaron como árboles o setos; este efecto puede haberse originado por su capacidad para fijar el nitrógeno atmosférico, que puede haber sido transferido a través del suelo a los cultivos asociados (Muthuri *et al.*, 2005). Estudios realizados por Ospina *et al.* (2005) exponen que el aliso (*Alnus acuminata*), en plantaciones de dos años con una densidad de 1600 árboles/ha y una altura promedio de 6.2 m, ha demostrado incrementar el nitrógeno en el suelo en 279 kg/ha/año, además de que se desarrollan muy bien con el pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y en sitios sometidos a pastoreo. Los resultados generados por Siriri *et al.* (2009) muestran que una poda relativamente suave de *Alnus Acuminata* para la generación de estiércol verde, puede aumentar el rendimiento del maíz; además, mencionan que es un árbol menos competitivo que otras especies. Sin embargo, se observó que *Alnus acuminata* perjudicó el rendimiento de los cultivos en Kifu, Uganda, reduciendo en 26 % el rendimiento del maíz al ser planta-

dos como fronteras en condiciones más húmedas (precipitación media anual de 1240 mm); asimismo, en sistemas combinando alisos y cardamomo grande adecuados para recuperar tierras marginales o áridas para uso productivo, así como para satisfacer una serie de necesidades de agricultores (Muthuri *et al.*, 2005).

En varias localidades del estado de Chiapas y en otras entidades del país, se han realizado planes de reforestación utilizando especies de rápido crecimiento como el ciprés mexicano (*Cupressus lusitanica*), debido a que esta especie es maderable (elaboración de polines y tablas). Pero su uso promovido por programas locales y regionales de reforestación no considera los impactos ecológicos favorables o nocivos que pueda tener sobre la estructura y el funcionamiento de los bosques (Sáenz *et al.*, 2010). *Cupressus lusitanica* o *Cupressus lindleyi* tiene éxito como rompevientos en las tierras altas (Mendieta, & Rocha, 2007). Sáenz *et al.* (2010) mencionan que esta especie, se asocia con suelos pobres y de poca humedad residual, así como con *Chloris gayana* (pasto Rhodes) o *Eragrostis curvula* (pasto llorón), pero además es una buena alternativa rentable para la producción de árboles de Navidad. Reportes generados por Sáenz *et al.* (2010) muestran que en terrenos con suelos luvisol o andosol, con problemas de degradación y una pendiente menor a 10 % y a 2260 msnm, la producción de avena variedad Cevamex, al ser asociada con 1250 árboles de *P. michoacana* o *Cupressus lindleyi*, fue superior entre 2.3 a 3.7 t ha⁻¹ de materia seca respecto a las variedades Saia, Papigochi y Chihuahua. Sáenz *et al.* (2010) concluyen que después de veintiocho años de la reforestación de *Cupressus lusitanica* en “La Milpoleta” (Cristóbal de las Casas, Chiapas), se han provocado cambios notables en su composición y estructura en comparación con los bosques de pino-encino sin reforestación causando mayor concentración de fósforo y de suelos más arenosos, por lo que las condiciones parecen ser propicias para el crecimiento y desarrollo de especies arbóreas nativas.

Existe una tendencia en los años recientes para establecer más plantaciones de restauración con encinos, como es el caso de *Quercus rugosa* Neé, en la sierra de Guadalupe (Ramírez, & Rodríguez, 2004). Se sugiere como una especie clave en la rehabilitación y restauración de bosques, debido a que puede establecerse en etapas tempranas de la

sucesión secundaria e incluso en suelos desnudos y erosionados (Conafor, 2007). Esta especie aporta beneficios importantes, ya que contribuye a la formación y estabilización de los suelos, y ayuda a mantener el equilibrio ecológico de las cuencas, pues contribuye a la infiltración y la conservación de los mantos acuíferos subterráneos (Conafor, 2007). La biomasa de *Quercus rugosa* Neé se podría utilizar porque su defoliación ocurre durante los meses de marzo y abril; sin embargo, por las cantidades elevadas de hojas que caen de los árboles, el crecimiento de los pastos debajo de *Quercus* es muy reducido o nulo, lo cual no permite la presencia de pastizales deseables (Carrillo, 2014). Carrillo (2014) también menciona que la colecta de materia seca de *Quercus rugosa* Neé en las mesetas fue económicamente más factible, debido a que la producción fue más elevada, lo que redujo los costos de la cosecha y el procesado; estas hojas pueden ser incluidas en dietas de ovejas.

Conclusiones

Es importante recalcar que hoy en día es de suma importancia recuperar nuestros suelos y vegetación, para minimizar los efectos del cambio climático, además de buscar alternativas más ecológicas en cuanto a las actividades económicas.

MaxEnt generó modelos fiables con AUC mayores a 0.87, que muestran los lugares óptimos para cada especie. La utilización de MaxEnt junto con otra información y procesos geoespaciales puede convertirse en una herramienta de gran importancia, permitiéndonos un uso más racional y eficiente de los recursos naturales, además de predecir escenarios y aumentar la eficacia de programas de conservación y manejo de dichos recursos.

Las técnicas de agroforestería han sido aplicadas por numerosos autores concluyendo en su mayoría que permiten continuar con las actividades económicas primarias tomando en cuenta el factor ambiental. Los sistemas agroforestales han demostrado ser una herramienta eficaz para aumentar la calidad de la agricultura, ganadería y silvicultura, generando menos afectaciones al medioambiente, ahorrando significativas cantidades de dinero y proporcionando otras soluciones al ambiente de

forma paralela, como la captación del agua y la recuperación de los suelos. Entre las principales características negativas están la competencia entre plantas y las necesidades específicas de cada especie. Al caracterizar las diferentes especies para prácticas agroforestales, se pudieron localizar los sitios en donde las variables edafoclimáticas son óptimas para cada especie, con el fin de indicar los espacios en donde se requerirá menos esfuerzo para su adecuación y donde las plantas se podrán desarrollar más fácilmente.

El uso de los SIG en este tipo de trabajos, permite el ahorro económico y de tiempo generando productos fiables y a escala deseada. Para trabajos posteriores, se sugiere generar estudios de suelo *in situ* y proporcionar información más fidedigna. Además, para la elección de las especies agroforestales, se deberían hacer encuestas o conocer más a fondo las actividades económicas y necesidades de los asentamientos humanos en el área, así como los problemas ecológicos más específicos.

En la presente compilación, se han expuesto trabajos en donde se han obtenido resultados que permiten analizar el territorio desde el punto de vista geográfico y espacial. Mediante el uso y aplicación de herramientas geotecnológicas de SIG, percepción remota y algoritmos de predicción, como MaxEnt, además de variables edafoclimáticas, topográficas, etcétera, es posible determinar zonas de interés para la protección de la flora y la fauna; aunado a esto, analizar la distribución potencial de las especies sobre corredores biológicos en el territorio ofrece a los tomadores de decisiones una percepción geoespacial de su comportamiento, permitiendo tomar las mejores alternativas para el cuidado, monitoreo y conservación de las especies en riesgo o en peligro de extinción.

Por otro lado, la combinación de estas técnicas, algoritmos y herramientas de geoprocésamiento de imágenes de satélite, permite obtener análisis multitemporales del territorio, así como generar el comportamiento espectral y fenológico de la vegetación. La aplicación de estos métodos y geoprocésos mediante herramientas de SIG es de gran utilidad cuando se es necesario analizar el daño provocado por plagas sobre una cobertura forestal durante un periodo de tiempo. Se pueden obtener así resultados del dosel de verdor de la vegetación y su respuesta espectral modificada por los daños de los insectos. Asimismo, es posible determi-

nar las zonas de la distribución potencial y de traslape de ciertas especies forestales que podrán ser atacadas por estos organismos, ayudando así a analizar las regiones en el territorio que podrían ser reforestadas y que, a la vez, estarían en riesgo por alguna plaga.

Dentro del análisis del territorio es relevante saber identificar las zonas potenciales de la reforestación. Técnicas como la agroforestería son empleadas para la conservación de las especies de flora y fauna, ayudando a la conservación del territorio. El uso de SIG, procesamiento de imágenes satelitales y algoritmos de distribución potencial, como MaxEnt, son de vital importancia cuando se requiere aplicar técnicas de reforestación. El apoyo que ofrecen estas nuevas tecnologías es la generación de resultados donde es posible identificar las regiones con condiciones óptimas y adecuadas para el desarrollo biológico de las especies endémicas (reforestación).

Por último, la aplicación de métodos, herramientas geotecnológicas y técnicas de geoprocésamiento ha sido importante en los últimos años en el sector salud. Comprender y predecir cómo se distribuyen vectores de transmisión de enfermedades en el territorio y espacio geográficos es de gran ayuda, debido a que es posible determinar las zonas que cumplen con las condiciones ambientales óptimas para que se desarrollen estos organismos, así como obtener y predecir la población que se encuentra en riesgo de transmisión de enfermedades por dichos vectores.

Literatura citada

- Aguilar, V., Melgoza, A., Villarreal, F., & Wehenkel, C. (2015). Modeling the potential distribution of *Picea chihuahuana* Martínez: An endangered species at the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Forests*, 6(3), 692-707.
- Bocco, G., Mendoza, M., & Masera, O. R. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, 44, 18-38.
- Carrillo, O. (2014). *Evaluación del uso de Quercus rugosa* Neé y *Quercus resinosa* Liebm. en la alimentación de pequeños rumiantes (Tesis

- de doctorado). Universidad Autónoma de Nuevo León/Facultad de Ciencias Biológicas. Recuperado de <http://eprints.uanl.mx/4066/1/1080253555.pdf>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp) (2012). Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Papi-gochi. Semarnat. Recuperado de <http://www.conanp.gob.mx/anp/consulta/PM APFF PAPIGOCHIC-PARA CONSULTA.pdf>
- (2014). Programa de manejo. Área de protección de la flora y fauna Tutuaca. Semarnat. Recuperado de http://www.conanp.gob.mx/datos_abiertos/DGCD/120.pdf
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) (2016a). *Alnus acuminata*. Recuperado de http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/9-betullm.pdf
- (2016b). Anexo: Resumen del Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Tutuaca. Recuperado de <http://www.conanp.gob.mx/anp/consulta/PM TUTUACA RESUMEN.pdf>
- (2016c). Áreas protegidas. Recuperado de <http://www.biodiversidad.gob.mx/region/areasprot/beneficios.html>
- (2016d). *Cupressus lindleyi*, 3. Recuperado de http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/26-cupre1m.pdf
- (2016e). Nichos y áreas de distribución. Recuperado de <http://nicho.conabio.gob.mx/la-calibracion-del-modelo/maxent>
- (2016f). *Quercus rugosa*, 4. Recuperado de http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/31-fagac10m.pdf
- Comisión Nacional Forestal (Conafor) (2007). *Quercus rugosa* Neé, 7. Recuperado de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/995Quercus rugosa.pdf>
- (2013a). *Bosques, cambio climático y REDD+ en México. Guía básica*. México: Conafor.
- (2013b). Sistemas agroforestales maderables en México. Recuperado de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/8/5572SISTEMAS AGROFORESTALES MADERABLES EN MEXICO AVM.pdf>

- Domínguez, P. A., Chávez, G. A., Rodríguez, E., Corral, J. J., Goche, J. R., & Díaz, M. A. (2014). Caracterización silvícola de *Pseudotsuga menziesii* en la reserva de la biósfera "La Michilía". *Madera y Bosques*, 20(2), 23-31. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v20n2/v20n2a3.pdf>
- Ellis, E. A., Nair, P. K. R., Linehan, P. E., Beck, H. W., & Blanche, C. A. (2000). A GIS-based database management application for agroforestry planning and tree selection. *Computers and Electronics in Agriculture*, 27(1-3), 41-55.
- Emck, P., Moreira, A., & Richter, M. (2006). El clima y sus efectos en la vegetación. *Botánica Económica de los Andes Centrales*, 11-36. Recuperado de http://geografia.uc.cl/images/academicos/Andres_Moreira/Emck_Richter_Moreira_Andes.pdf
- Farrel, J., & Altieri, M. (1999). Sistemas agroforestales. En M. Altieri, *Agroecología. Bases científicas para una agricultura sustentable* (pp. 229-243). Montevideo: Nordan-Comunidad. Recuperado de http://www.agroecologia.net/wp-content/uploads/2014/01/Agroecologia-bases-altieri.pdf?rs_file_key=56011645352d3c991bb6f0689476573
- Fratini, R., Riccioli, F., Argenti, G., & Ponzetta, M. P. (2016). The sustainability of wildlife in agroforestry land. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 8, 148-157.
- García Arévalo, A. (2008). Vegetación y flora de un bosque relictual de *Picea chihuahuana* Martínez del norte de México. *Polibotánica*, 25, 45-68. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/polib/n25/n25a5.pdf>
- García Ayala, H. (2012). *Picea chihuahuana* Martínez (Pinaceae) (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Recuperado de <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1018/62124s.pdf?sequence=1>
- González, M. S., González, M., Tena, J. A., Ruacho, L., & López, I. L. (2012). Vegetación de la sierra Madre Occidental, México: una síntesis. *Acta Botánica Mexicana*, 100, 351-403. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/abm/n100/n100a12.pdf>
- Guisan, A., Broennimann, O., Engler, R., Vust, M., Yoccoz, N. G., Lehmann, A., & Zimmermann, N. E. (2006). Using niche-based models to

- improve the sampling of rare species. *Conservation Biology*, 20(2), 501-511. Recuperado de http://www.waldschutz.ch/staff/niklaus.zimmermann/papers/ConsBiol_20_0501_Guisan.pdf
- Gutiérrez, J. V., Rodríguez, D. A., Villanueva, A., García, S., & Romo, J. L. (2015). Calidad del agua en la producción de *Pinus cembroides* Zucc. en vivero. *Agrociencia*, 49, 205-219. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v49n2/v49n2a8.pdf>
- Hernández, J., Aguirre, Ó. A., Alanís, E., Jiménez, J., Treviño, E. J., González, M. A., Luján, C., Olivas, J. M., & Domínguez, L. A. (2013). Efecto del manejo forestal en la diversidad y composición arbórea de un bosque templado del noroeste de México. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(2), 189-199.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965-1978. Recuperado de <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.1276/pdf>
- Lagerlöf, J., Adolfsson, L., Börjesson, G., Ehlers, K., Palarès, G., & Sundh, I. (2014). Land-use intensification and agroforestry in the Kenyan Highland: Impacts on soil microbial community composition and functional capacity. *Applied Soil Ecology*, 82, 93-99.
- López, G. (2008). Sistemas agroforestales tropicales. Sagarpa, 8. Recuperado de <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasCOUSSA/Sistemas Agroforestales.pdf>
- Lozano, Z., Bravo, C., Ovalles, F., Hernández, R. M., Moreno, B., Piñango, L., & Villanueva, J. G. (2004). Selección de un diseño de muestreo en parcelas experimentales a partir del estudio de la variabilidad espacial de los suelos. *Bioagro*, 16(1), 61-72.
- Martínez, R. M., Tuya, L. C., Martínez, M., Pérez, A., & Cánovas, A. M. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman: caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8(2). Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/rhcm/v8n2/rhcm17209.pdf>
- Marull, J., Tello, E., Wilcox, P. T., Coll, F., Pons, M., Warde, P., Valldeperas, N., & Ollés, A. (2014). Recovering the landscape history behind a Mediterranean edge environment (The Congost Valley, Catalonia,

- 1854-2005): The importance of agroforestry systems in biological conservation. *Applied Geography*, 54, 1-17.
- Mas, J. F., Sorani, V., & Álvarez, R. (1996). Elaboración de un modelo de simulación del proceso de deforestación. *Investigaciones Geográficas (Mx)*, Es5, 43-57. Recuperado de http://www.igeograf.unam.mx/web/sigg/docs/pdfs/publicaciones/inves_geo/boletines/-5/art_5.pdf.
- Mendieta, M., & Rocha, L. R. (2007). *Sistemas agroforestales*. Managua; Universidad Nacional Agraria. Recuperado de <http://repositorio.una.edu.ni/id/eprint/2443>
- Morales, S. N. (2012). Modelos de distribución de especies: *software* MaxEnt y sus aplicaciones en conservación. *Revista Conservación Ambiental*, 2(1), 1-3. Recuperado de <http://www.ecomabi.cl/biblioteca/category/45-volumen-2-numero-1?download=300:notas-y-comentarios-modelos-de-distribucion-de-especies-software-maxent-y-sus-aplicaciones-en-conservacion>
- Moreno, A. I., Toledo, V. M., & Casas, A. (2013). Los sistemas agroforestales tradicionales de México: una aproximación biocultural. *Botanical Sciences*, 91(4), 375-398. Recuperado de http://botanicalsciences.com.mx/index.php/botanicalSciences/article/viewFile/419/pdf_96
- Muthuri, C., Ong, C., Black, C. R., Ngumi, V. W., & Mati, B. M. (2005). Tree and crop productivity in *Grevillea*, *Alnus* and *Paulownia*-based agroforestry systems in semi-arid Kenya. *Forest Ecology and Management*, 212(1-3), 23-39. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/251585774_Tree_and_crop_productivity_in_Grevillea_Alnus_and_Paulownia-based_agroforestry_systems_in_semi-arid_Kenya
- Naranjo, M., Moreno, Á. C., & Martín, S. (2014). ¿Dónde buscar troglobiontes? Ensayo de una cartografía predictiva con MaxEnt en Gran Canaria (islas Canarias). *Arxius de Miscellania Zoologica*, 12, 83-92.
- National Agroforestry Center (2013). ¿Qué es agroforestería?, 2. Recuperado de https://nac.unl.edu/documents/workingtrees/infosheets/WhatisAF_Spanish.pdf

- Ospina, A. (2004). Agroforestería: definición y concepto. En *Agroforestería en Latinoamérica: experiencias locales* (pp. 11-19). Bolivia: Movimiento Agroecológico para Latinoamérica y el Caribe.
- Ospina, C. M., Hernández, R. J., Gómez, D. E., Godoy, J. A., Aristizábal, F. A., Patiño, J. N., & Medina, J. A. (2005). *El aliso o cerezo*. Colombia: Cenicafe. Recuperado de <http://www.cenicafe.org/es/publications/aliso.pdf>
- Paquette, S., & Domon, G. (1997). The transformation of the agroforestry landscape in the nineteenth century: A case study in southern Quebec (Canada). *Landscape and Urban Planning*, 37(3-4), 197-209.
- Phillips, S. (2011). A brief tutorial on MaxEnt. Recuperado de [http://nicho.conabio.gob.mx/la-calibracion-del-modelo/maxent](http:// nicho.conabio.gob.mx/la-calibracion-del-modelo/maxent)
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259. Recuperado de <http://rob.schapire.net/papers/ecolmod.pdf>
- Pineda, N. B., Bosque, J., Gómez, M., & Plata, W. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes: una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, 69, 33-52. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112009000200004&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Plasencia, A. H., Escalona, G., & Esparza, L. G. (2014). Modelación de la distribución geográfica potencial de dos especies de psitácidos neotropicales utilizando variables climáticas y topográficas. *Acta Zoológica Mexicana*, 30(3), 471-490. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/azm/v30n3/v30n3a2.pdf>
- Ramírez, A., & Rodríguez, D. A. (2004). Efecto de calidad de planta, exposición y micrositio en una plantación de *Quercus rugosa*. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 10(1), 5-11. Recuperado de <https://chapingo.mx/revistas/phpscript/download.php?file=completo&id=NTk3>

- Reisner, Y., De Filippi, R., Herzog, F., & Palma, J. (2007). Target regions for silvoarable agroforestry in Europe. *Ecological Engineering*, 29(4), 401-418.
- Restrepo, L. F., & González, J. (2007). De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(2), 183-192. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/rccp/v20n2/v20n2a10.pdf>
- Ritter, A., Muñoz, R., & Regalado, C. M. (2008). Capacidad de predicción de modelos aplicados a ZNS: herramienta informática para la adecuada evaluación de la bondad-de-ajuste con significación estadística. En J. Martínez, & N. Sánchez (eds.), *Estudios de la zona no saturada del suelo* (pp. 259-264). Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Romero, A., García, E., & Marie, P. (1996). *Pinus cembroides* s. l. y *Pinus johannis* del altiplano mexicano: una síntesis. *Acta Botánica Gallica*, 143(7), 681-693. Recuperado de <http://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=tabg20>
- Ruiz, H. & Arellano, J. (2010). Instrumentos y estrategias. Áreas Naturales Protegidas. En R. Durán, & M. Méndez, *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán* (pp. 414-418). Recuperado de http://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Sitios/Biodiversidad/pdfs/Cap8/05_Areas_naturales_protegidas.pdf
- Sáenz, J. T., González, J. A., Jiménez, J., Larios, A., Gallardo, M., Villaseñor, F. J., & Ibáñez, C. (2010). *Alternativas agroforestales para reconversión de suelos forestales*. Sagarpa. Recuperado de http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1293/ALTERNATIVAS_AGROFORESTALES_PARA_RECONVERSION_DE_SUELOS_FORESTALES.pdf?sequence=1
- Sarukhán, J., Koleff, P., Carabias, J., Soberón, J., Dirzo, R., Llorente, J., Halffter, G., González, R., March, I., Mohar, A., Anta, S., & De la Maza, J. (2009). *Capital natural de México. Síntesis: conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad*. Conabio. Recuperado de bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium/Documentos/6362.pdf
- Siriri, D., Ong, C., Wilson, J., & Boffa, J. M. (2009). Tree species and pruning regime affect crop yield on bench terraces in SW Uganda. *Agroforestry Systems*, 78(1), 65-77. Recuperado de <https://www.researchgate>.

- net/publication/225385562_Tree_species_and_pruning_regime_affect_crop_yield_on_bench_terraces_in_SW_Uganda
- Sistema de Información, Monitoreo y Evaluación para la Conservación (SIMEC) (2016a). Área de Protección de Flora y Fauna Papigochic. Recuperado de <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=43&=11>
- (2016b). Área de Protección de Flora y Fauna Tutuaca. Recuperado de <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=50&=11>
- The World Agroforestry Centre (2016). Recuperado de from <http://www.worldagroforestry.org>
- Uc Campos, M. I., María Elena T. O., Manuel Octavio G. L. Correspondencia espacial entre Ph y Sb en el Estado de Chihuahua, México: Mediante Métodos Geoestadísticos. Memorias de resúmenes en extenso SELPER-XXI-México-UACJ-2015 <http://selper.org.mx/images/Memorias2015/assets/et015.pdf>
- Villanueva, J., Fulé, P. Z., Cerano, J., Estrada, J., & Sánchez, I. (2009). Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la sierra Madre Occidental con anillos de crecimiento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Ciencia Forestal en México*, 34(105), 39-71. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/cfm/v34n105/v34n105a3.pdf>
- Villarreal, J. Á., Mares, Ó., Cornejo, E., & Capó, M. A. (2009). Estudio florístico de los piñonares de *Pinus pinceana* Gordon. *Acta Botánica Mexicana*, 89, 87-124. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/abm/n89/n89a7.pdf>
- Villatoro, M., Henríquez, C., & Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*, 32(1), 95-105.
- Zavaleta, E. (2011). Retención de agua de una plantación de *Pinus cembroides subsp. Orizabensis* D. K. Bailey. Universidad Veracruzana. Recuperado de <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/31396/1/elizabetzabaletahuerta.pdf>

Dinámica temporal de la actividad vegetal en zonas degradadas por *Ips confusus* en bosque de *Pinus cembroides*: región central de Chihuahua (2000-2014)

Juan Diego Maldonado Marín • Luis Carlos Alatorre Cejudo

María Elena Torres Olave • Érick Sánchez Flores

Alfredo Granados Olivas • Luis Carlos Bravo Peña

En la actualidad son varios problemas que afectan a las regiones forestales de México, principalmente incendios, sequías, deforestación, plagas (Meneses, 2012), así como cambios en el régimen de las temperaturas máximas y mínimas, entre muchos otros (Alatorre *et al.*, 2014). En México existe una especie de pino que presenta la mayor distribución en todo el país, nombrado científicamente como *Pinus cembroides* y comúnmente conocido como pino piñón o pino piñonero. Se extiende tanto en la sierra Madre Oriental, con presencia en los estados de Coahuila, Hidalgo, Nuevo León, Querétaro y San Luis Potosí, como en la sierra Madre Occidental, en las entidades de Chihuahua, Durango, Sonora y Zacatecas (Conafor, 2014).

Esta especie es de gran importancia ecológica, debido a que se desarrolla en laderas con pendientes abruptas, secas, rocosas, y al pie de las montañas. Tarda varios años en fructificar por primera vez, sin embargo, algunas de las ventajas es que evita la erosión de las laderas y permite la infiltración del agua, lo que ayuda al restablecimiento de los mantos acuíferos; además, es tolerante a las heladas, sequías y temperaturas ele-

vadas. Una desventaja es que es susceptible a daños por plagas y enfermedades (Conafor, 2014).

Desde años atrás *Pinus cembroides* ha presentado una grave problemática, ya que muestra procesos de degradación por distintos factores (Flores, Nájera, & Morales, 2003), por ejemplo, hongos y plagas de insectos raiceros, defoliadores, carpófagos, descortezadores y barrenadores (Mendoza, Cibrián, & García, 2011), que en cierta medida han comenzado a disminuir sus poblaciones. De manera específica, el descortezador *Ips confusus*, que se desarrolla de forma natural en los bosques de coníferas, es necesario para el funcionamiento del ecosistema. Sin embargo, en respuesta a factores abióticos de estrés puede aumentar su densidad a niveles que alteran los procesos ecológicos de los bosques, en específico de *Pinus cembroides* (Ojeda, 2010). Las plagas tienen un efecto cíclico natural, ya que la población de insectos se incrementa tras temporadas de sequías prolongadas e incendios forestales, factores que debilitan los árboles en las zonas boscosas (Cuéllar *et al.*, 2013).

En la sierra Madre Occidental, se ha presentado el ataque de descortezadores en los bosques de pino piñonero en forma dispersa en el estado de Chihuahua, con presencia en distintos municipios. Desde 2012 la Conafor recibió reportes donde el insecto invadió predios en Balleza, extendiéndose a territorios forestales de Bocoyna, Carichí, Chihuahua, Cuauhtémoc, Cusihuiriachi, Guerrero, Madera, Nonoava y Riva Palacio; en total, dieciocho ejidos, diez propiedades privadas, una colonia agrícola y un parque nacional, se vieron afectados. Los insectos dañaron varias hectáreas de pinos generando una mortalidad severa (Conafor, 2014).

La relevancia en este proyecto está dada por la reciente aparición del *Ips confusus* en una región al norte del municipio de Cuauhtémoc, en el estado de Chihuahua (Maldonado, Moreno, & Alatorre, 2013). De manera específica, la colonia Chupaderos, localizada al noreste del municipio y distinguida por tener tanto terrenos agrícolas como forestales, presenta una grave afectación en el bosque de *Pinus cembroides*, y sin duda la pérdida de este puede traer graves consecuencias económicas y ecológicas para la zona. Entre las afectaciones económicas está la baja producción de la semilla de piñón, que tiene un gran valor económico;

además, la creciente pérdida produce una afectación del ecosistema del bosque de la región (García, & Cibrián, 2011).

Para el estudio de esta problemática, las nuevas herramientas tecnológicas, como los sistemas de percepción remota, son de gran ayuda, porque permiten adquirir información sobre algún objeto o fenómeno a distancia sin tener un contacto directo (Chuvieco, 1995). Para lograr identificar ciertas coberturas de uso de los suelos, se pueden aplicar métodos, como la clasificación supervisada (Loya *et al.*, 2012).

Se puede dar seguimiento a las variaciones que ha tenido esta especie, a través de imágenes de satélite e índices de vegetación. Algunas imágenes de satélite de la serie Landsat generan información de gran interés para el seguimiento de la vegetación a escala regional; la resolución temporal al obtener imágenes cada dieciséis días permite plantear un seguimiento continuo en los cambios de la vegetación en cuanto a su verdor y actividad fotosintética aplicando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (Ceroni, Achkar, & Gazzano, 2013).

Existen diversos estudios donde se han aplicado distintas metodologías mediante imágenes satelitales (Chuvieco, 1998), a través de las cuales se detectan los cambios estacionales que se presentan en la vegetación (Gómez, 2005). El NDVI mide la relación entre la energía absorbida y emitida por los objetos terrestres, la cual se calcula a partir de las diferencias entre la región del espectro electromagnético del rojo (0.6-0.7 μm) y del infrarrojo cercano (0.7-2.0 μm) (Semar, 2012), y que se presenta en valores que van de -1 a +1 (Meneses, 2012), permitiendo conocer el estado del vigor vegetal de grandes superficies al detectar fenómenos de amplio rango de variación (Iglesias, Barchuk, & Grilli, 2010).

Por otro lado, la generación de modelos que permita observar la distribución de las especies para determinar el nicho ecológico (Fierro *et al.*, 2013) también es posible para identificar el área de dispersión de las plagas forestales y para observar la tendencia de propagación, además de delimitar las áreas potenciales de ocurrencia. Actualmente, uno de los modelos más empleados para este propósito es el de la Máxima Entropía (MaxEnt), que explicita la distribución geográfica de las especies, utilizando como datos solo los sitios de presencia y las variables bioclimáticas asociadas a cada uno de dichos puntos de presencia (Pérez, 2014).

Todos los métodos mencionados en combinación con los sistemas de información geográfica (SIG) permiten realizar de una mejor manera el análisis en la zona afectada.

DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE

La especie de pino afectada, cuyo nombre común es pino piñón, es del género *Pinus* y de la especie *cembroides*. El pino piñonero es una especie originaria de México y se extiende hacia el sur de Estados Unidos. Es un árbol de cinco a diez metros, aunque puede llegar a medir hasta 15 m de altura; posee ramas ascendentes, delgadas y distribuidas irregularmente en el tallo. Es una especie de lento crecimiento. Los árboles tardan varios años en fructificar por primera vez, de 36 meses, y la producción de la semilla se da cada cinco o seis años. Se encuentra en asociación con los bosques de coníferas y es una de las especies de pino con mayor distribución en México (Conafor, 2011).

Sus requerimientos ambientales son rangos de altitud en valores medios que van de 2100 a 3100 m; mientras que la temperatura muestra rangos de -7 a 42 °C con una media de 17.9 °C; en cuanto a la precipitación, los rangos se presentan desde 365 a 800 mm anuales (Conafor, 2011). De acuerdo con el estudio presentado por Flores *et al.*, 2003, los aspectos ambientales bióticos que afectan a *Pinus cembroides* se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Plagas presentes en *Pinus cembroides*

Hospedero	Pinus cembroides			
Insectos raiceros	<i>Gallina ciega (Phyllophaga spp.)</i>			
Insectos defoliadores	<i>Gusanos de bolsa (Lophocmpa cibarini)</i>	<i>Tetralopha sp.</i>	<i>Aphis sp.</i>	<i>Pineus sp.</i>
Insectos carpófagos	<i>Conophthoruscembroides</i>	<i>Leptoglossus occidentalis</i>	<i>Eucosma bobana</i>	<i>Cecidomyia sp.</i>
Insectos descortezadores	<i>Ips confusus</i>	<i>Dendroctonus appropinquatus</i>	<i>Pityophthorus sp.</i>	
Barrenador de yemas y brotes	<i>Retinia arizonensis</i>	<i>Conophthorus terminalis</i>	<i>Dioryctria sp.</i>	

Fuente: (Flores, *et al.*, 2003)

PROCESO DE AFECTACIÓN

El descortezador *Ips confusus* es el que más daño causa en los pinos piñoneros. Se tienen registros de distribución únicamente en Baja California, Chihuahua, Coahuila, Hidalgo y San Luis Potosí. Presentan un ciclo de vida muy particular, ya que existen de tres a cuatro generaciones por año, provocando daños de mayor manera en árboles moribundos, recién muertos en pie, árboles recién caídos y trocería recién cortada. En condiciones favorables para los insectos, estos pueden matar árboles aparentemente sanos, caso en el que prefieren los maduros. Cuando atacan árboles recién muertos, se observan acumulaciones de aserrín rojizo en las hendiduras de la corteza; en cambio, cuando infestan árboles vivos los ataques quedan marcados por un grumo de resina blanquecino o rojizo. Las infestaciones del descortezador, se presentan en las ramas y en la parte alta del fuste (Cibrián *et al.*, 1995).

Los síntomas se manifiestan con un cambio de color verde a amarillento. Otros estudios demuestran que los síntomas observados fueron la marchitez de los brotes nuevos; los cuales toman una coloración verde pálido, posteriormente se tornaron amarillentos y, por último, rojizos. Las acículas que tomaron esta coloración, se desprendieron fácilmente del tallo. Las raíces fueron escasas, presentaron pudrición y se quebraron fácilmente; el tallo no presentaba resinación pero sí pudrición (Mendoza *et al.*, 2011). El pino se degrada en poco tiempo, provocando la pudrición de la base y, consecuentemente, secándose por completo, no permitiendo la recuperación de la especie. Las muestras tomadas en campo en noviembre de 2014, demuestran la gran población de estos insectos (Figura 1).

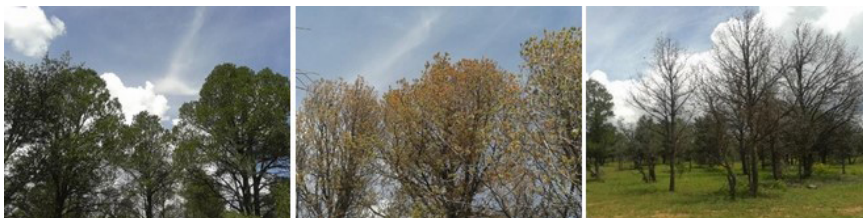
Figura 1. *Ips confusus*



Fuente: elaboración propia. Muestra tomada el 2 de noviembre de 2014.

El descortezador se puede identificar por su etapa de madurez: los que se encuentran en tonalidad de color negro son aquellos de edad adulta y que están en etapa de reproducción, mientras que los que presentan tonalidades café y amarillenta son los que aún están preparándose para la etapa de reproducción. La muestra fue tomada en un solo pino piñonero, retirando la corteza de una superficie aproximada de 0.20 m². Las fotografías tomadas en campo en el verano de 2014, demuestran de forma clara el proceso de afectación. La Figura 2A muestra un bosque sano, característico por las hojas aciculares en tonalidades verdes y un denso dosel forestal; la Figura 2B presenta *Pinus cembroides* en tonalidades amarillentas, indicando el inicio del daño; y, por último, la Figura 2C muestra la fase final de la afectación, donde la población de pinos ya no presenta ninguna actividad fotosintética y, por lo tanto, no es posible la recuperación.

Figura 2: A) Bosque de *Pinus cembroides* sano; B) Bosque de *Pinus cembroides* con fase de afectación intermedia; C) Bosque de *Pinus cembroides* seco por plaga



Fuente: elaboración propia

El presente proyecto de investigación aborda una temática de gran relevancia en la actualidad, por medio de técnicas de sensoría remota, SIG y modelado de nicho ecológico. Es de vital importancia dar un seguimiento a la problemática planteada, ya que en la zona de estudio no se ha presentado ningún interés por parte de las dependencias encargadas de controlar estos procesos de degradación forestal.

Es muy importante poder dar un diagnóstico de la evolución temporal de los procesos de degradación y el orden de magnitud (velocidad de propagación), para poder evitar que zonas similares puedan ser afectadas. Si bien la comunidad no es de gran interés turístico, o de gran calado forestal para la extracción de recursos maderables, el bosque que existe en la región sí presenta beneficios: en primer lugar, el bienestar del ecosistema y, en segundo, la economía para los habitantes de la comunidad que se dedican a la recolección de las semillas de piñón que produce el pino piñonero.

Realizar la investigación fue factible, ya que la zona es de fácil acceso y no implicó grandes costos de traslado para realizar el trabajo de campo, mientras que la información de gabinete necesaria también se pudo adquirir, porque únicamente se utilizaron imágenes satelitales de acceso gratuito del servidor web del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) y, a partir de ellas, se realizaron ciertos procedimientos y análisis. Por consiguiente, el objetivo de este trabajo es analizar la evolución temporal y espacial de la actividad vegetal en la especie de *Pinus cembroides*, aplicando sistemas de percepción remota y SIG para caracterizar el proceso de degradación a causa del descortezador *Ips confusus*.

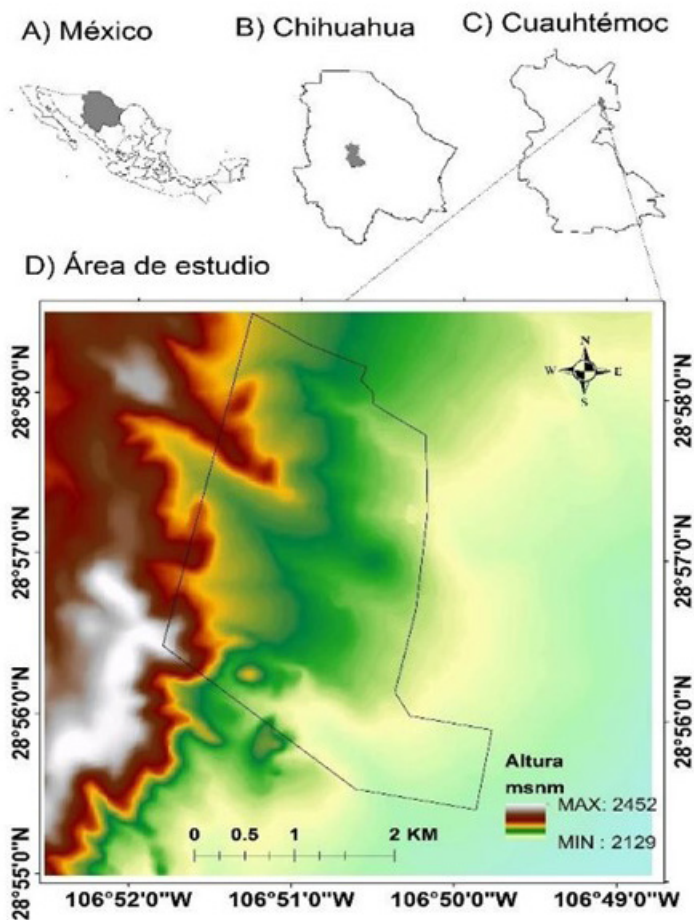
Y su hipótesis es que la utilización de una serie temporal de NDVI permite determinar la variación temporal y espacial de los procesos de degradación que actualmente aquejan al bosque de pino piñonero en el estado de Chihuahua. Además, mediante modelos de MaxEnt es posible identificar el nicho ecológico del pino piñonero, así como el descortezador *Ips confusus* para verificar su coincidencia espacial.

Metodología

ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza en la región noreste del municipio de Cuauhtémoc en el estado de Chihuahua. El poblado donde se realiza el proyecto se localiza en las coordenadas geográficas 28°55'40" N y -106°50'17" O. Limita al oeste con propiedades privadas, al norte y este con terrenos agrícolas pertenecientes a la colonia Chupaderos y al sur con el municipio de Riva Palacio (Figura 3). El área comprende una extensión de 1030 ha, con una altura promedio de 2200 msnm, entre las que se encuentran zonas de pastizales y bosques en asociación de pino-encino.

Figura 3. Localización del área de estudio



Fuente: elaboración propia.

Datos del Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (Inafed, 2014) describen las características del medio físico propias del municipio de Cuauhtémoc, Chihuahua. La orografía comprende la subprovincia fisiográfica, sierras y llanuras tarahumaras de la provincia denominada sierra Madre Occidental. El relieve en el área de

la colonia Chupaderos se conforma de serranías y llanuras con lomeríos en alturas que van de 2152 a 2442 msnm.

En cuestiones de hidrografía, el agua superficial se localiza básicamente en pequeños cuerpos de agua superficial; no cuenta con ríos, pero la zona es atravesada por varios arroyos, la mayor parte de ellos solo llevan agua en temporada de lluvias, que pertenecen en su totalidad a la vertiente interior formada por la cuenca de la laguna de Bustillos. El clima es considerado de transición, de semihúmedo a templado, con una temperatura media anual de 14 °C, una máxima de 22 °C y una mínima de 4 °C. La precipitación pluvial media anual es de 440-500 mm y tiene un promedio anual de 66 días de lluvia (García, 2014).

La vegetación existente consta de pastos, cactáceas, arbustivas y herbáceas. En el ecosistema de la fauna, se encuentran aves migratorias, guajolotes, correcaminos, palomas de collar, conejos, venados cola blanca, pumas, gatos monteses y coyotes. La región se encuentra ocupada por bosques de pino, pino-encino, encino y regiones aisladas de táscate (Inafed, 2014).

El tipo de suelo es ocupado en su mayoría por el tipo feozem, que significa tierra parda, y se caracteriza por tener una marcada acumulación de materia orgánica en su parte superior, por lo cual son fértiles y soportan una gran variedad de cultivos, así como pastizales; también se encuentran el planosol y el litosol, que son suelos de piedra (Alatorre *et al.*, 2014).

SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DE LA BASE DE DATOS

Para la elaboración de la clasificación de cobertura y uso de suelo, a través de métodos de clasificación supervisada, se trabajó con la imagen perteneciente al sensor Landsat 8 OLI, con fecha de adquisición 5/03/2014. Para la construcción de la serie temporal de imágenes Landsat, se obtuvieron las satelitales del servidor de USGS (<http://glovis.usgs.gov/>), las cuales corresponden a distintos sensores, entre ellos, Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI. Todas con una resolución espacial en la banda pancromática de 15 m y la multiespectral, de 30 m, además de una resolución temporal de 16 días (Inegi, 2014). Las imágenes seleccionadas para la serie temporal se encuentran en la proyección Universal Transversal Mercator (UTM) zona

13 N, Path/Row 33/40, las cuales corresponden a marzo y abril, meses de inicio de la primavera, para el periodo 2000-2014.

Tabla 2. Datos de las imágenes Landsat utilizadas en el área de estudio, para identificar la dinámica vegetal en el periodo 2000-2014

Imagen	Sensor	Fecha de adquisición
1	Landsat 5 TM	01/05/2000
2	Landsat 5 TM	17/03/2001
3	Landsat 5 TM	01/04/2003
4	Landsat 5 TM	09/03/2004
5	Landsat 5 TM	11/03/2007
6	Landsat 5 TM	11/03/2008
7	Landsat 5 TM	16/03/2009
8	Landsat 5 TM	19/03/2010
9	Landsat 5 TM	07/04/2011
10	Landsat 8 OLI	19/04/2013
11	Landsat 8 OLI	19/02/2014

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, se realizó un análisis interanual, con la finalidad de observar el comportamiento de la vegetación en las distintas estaciones del año. Para ello, se obtuvieron imágenes de forma estacional, es decir, desde enero hasta diciembre, para los años 2000 y 2014 (Tabla 3), en donde se presentaron algunos meses que están descubiertos de información, debido a la presencia nubosa en la temporada de lluvias.

Para la correcta utilización de las imágenes fue necesario efectuar algunas correcciones. Una de ellas es la corrección atmosférica, que elimina los ruidos causados a la señal que llega al sensor del satélite luego de haber atravesado la atmósfera; el efecto de distorsión de la señal produce errores en la localización de los niveles digitales (ND) de los píxeles. Además, pueden presentar alteraciones radiométricas y geométricas de manera que no coincidan con el tono, posición y tamaño de los objetos (Chuvieco, 1995). La atmósfera puede afectar la naturaleza de las imágenes de sensores remotos de diferentes formas, por lo que estos pueden ser sustanciales y deben ser corregidos; para ello, se aplicó a cada una

de las imágenes una corrección con el módulo *ATMOSC* del *software* IDRISI (Brizuela, Aguirre, & Velasco, 2007).

Tabla 3. Datos de las imágenes Landsat utilizadas en el área de estudio para identificar la dinámica vegetal de forma estacional para los años 2000 y 2014

Imagen	Landsat 5 TM Año 2000	Landsat 8 ^{OLI} Año 2014
1	10/01/2000	16/01/2014
2	27/02/2000	17/02/2014
3	14/03/2000	05/03/2014
4	15/04/2000	08/05/2014
5	06/09/2000	15/10/2014
6	09/11/2000	16/11/2014

Fuente: elaboración propia.

Una vez que las imágenes fueron corregidas atmosféricamente, se aplicó un proceso de georreferenciación, esto es, se utilizaron puntos de control para garantizar que las áreas coincidieran con las imágenes, para luego proceder a recortar el área de estudio con base en el polígono delimitado anteriormente.

Para desarrollar la modelación de la presencia de la especie del descortezador *Ips confusus* en la especie de *Pinus cembroides* para el estado de Chihuahua, se trabajó con puntos de ocurrencia derivada de Global Biodiversity Information Facility (<http://data.gbif.org/occurrences>).

Primeramente, para la especie de *Pinus cembroides* se obtuvieron los puntos de presencia para todo México y, posteriormente, la base de datos fue depurada, seleccionando los registros dentro de Chihuahua, además de eliminar aquellos duplicados. La base de datos original contaba con un total de 599 ocurrencias de *Pinus cembroides*, mientras que la base de datos final cuenta con 26 puntos, a la que se le agregaron puntos tomados en campo y proporcionados por la Comisión Nacional Forestal (Conafor).

La generación de la base de datos de *Ips confusus*, se elaboró a partir de registros presentes en el estado de Chihuahua, datos proporcionados por la Conafor en los años 2012 y 2013, además de puntos tomados de igual manera en campo dentro del área de estudio.

Para la modelación del nicho ecológico, se adquirieron variables bioclimáticas de WorldClim (<http://www.worldclim.org/current>). También fue adquirido un modelo digital de elevaciones, del cual se derivaron diferentes variables topográficas (Hijmans *et al.*, 2005).

Elaboración del mapa de cobertura y uso de suelo

Para el correcto funcionamiento del algoritmo de clasificación, es preciso establecer un conjunto de categorías que representen de forma adecuada la variabilidad de las cubiertas presentes en la totalidad del área de estudio (Alatorre *et al.*, 2014). El procedimiento consiste en la definición de categorías temáticas; de igual manera, la creación de áreas de entrenamiento representativas de las coberturas vegetales y uso de suelo se establecen con base en el conocimiento previo del área de estudio y los puntos de control tomados en campo de las siguientes categorías: bosque de pino, bosque de pino seco, bosque de pino-encino, pastizales, cuerpos de agua y zona agrícola.

La imagen utilizada para la clasificación supervisada corresponde al sensor Landsat 8 con fecha de adquisición 5/3/2014, la cual cuenta con una resolución espacial de 30 m en la banda multiespectral. El *software* a utilizar es IDRISI (versión Selva), con el módulo conocido como MAXLIKE, que genera una clasificación de máxima probabilidad de los datos de teledetección basada en la información contenida en un conjunto de archivos de firmas espectrales.

Los píxeles se asignan a la clase más probable sobre la base de una comparación de la probabilidad posterior de que puede pertenecer a cada una de las firmas espectrales que se consideren (IDRISI, 2014).

Posteriormente, se aplicó una validación a través de una matriz de confusión (Congalton, 1991), a partir de puntos tomados en campo y por fotointerpretación en imágenes de alta resolución proporcionadas por Google Earth.

CONSTRUCCIÓN DE LA SERIE TEMPORAL DEL NDVI

Para realizar el análisis temporal de la actividad vegetal, se construyó una serie temporal del NDVI, que arroja valores estimados del verdor del

bosque que resultan del análisis de datos espectrales obtenidos mediante imágenes de satélite. Se parte de la premisa de que el NDVI representa un indicador de la salud de la vegetación del ecosistema, que mide la relación entre la energía absorbida y emitida por los objetos terrestres, arrojando valores de la intensidad del verdor de la zona, y que da cuenta de la cantidad de vegetación presente en una superficie, así como su estado de salud. Es un índice adimensional y sus valores van de -1 a +1 (Meneses, 2012).

Los valores del índice que se encuentran por debajo del cero representan cuerpos de agua y suelo descubierto, mientras que los valores más altos son indicadores de la actividad fotosintética de las zonas de bosque, pastizal y actividad agrícola. Las series temporales del NDVI fueron obtenidas a partir de las imágenes Landsat, con el propósito de monitorizar la actividad vegetal. El NDVI debe ser calculado como se muestra en la siguiente ecuación (Rouse *et al.*, 1974):

$$NDVI = \frac{\rho_{IR} - \rho_R}{\rho_{IR} + \rho_R} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

- ρ_{IR} = Reflectividad en la región del infrarrojo cercano del espectro electromagnético
- ρ_R = Reflectividad en la región del rojo

Construcción de las series temporales de variables climáticas

La actividad vegetal se puede ver afectada por factores climáticos, como la disminución de la precipitación y temperaturas máximas y mínimas extremas. Para determinar el efecto de estos factores sobre las tendencias temporales de la actividad vegetal, se creó una serie temporal de variables climáticas (Medina, & Miramontes, 2014).

Para la obtención de la base de datos, se adquirió información existente en estaciones climatológicas pertenecientes a la Unión Agrícola Regional de Fruticultores del Estado de Chihuahua (Unifrut, <http://>

www.unifrut.com.mx). Estas estaciones se encuentran en operación desde el año 2000 hasta la actualidad, recogiendo información diaria de diversas variables climatológicas. Para el presente trabajo, se utilizó la información de la estación ubicada en la colonia Álvaro Obregón del municipio de Cuauhtémoc (latitud: 28°45'56.6" N y longitud: 106°55'03.3" O), localizada a 20 km en línea recta al suroeste de la zona de estudio: la colonia Chupaderos.

La estación meteorológica genera información de las siguientes variables climatológicas: i) precipitación media anual (PMA; mm año⁻¹); ii) temperatura media anual (TMA; °C); iii) temperatura mínima media anual (TMINA; °C); y iv) temperatura máxima media anual (TMAXA; °C) (García, 2014).

Análisis estadístico NDVI vs. variables climáticas

Las series temporales de NDVI para las distintas coberturas presentes en el área de estudio fueron analizadas para determinar la presencia de tendencias temporales estadísticamente significativas; para ello, se utilizó la correlación de Spearman contra el tiempo (Alatorre, Beguería, & Vicente, 2010). Este tipo de análisis permite observar la dinámica vegetal en términos de incremento (correlación positiva) y de descenso de la actividad (correlación negativa).

Como un paso previo para analizar los efectos del clima sobre la actividad vegetal, se realizó un análisis de correlación para determinar cuál de las series se ajusta mejor a los datos observados del NDVI. Para ello, las precipitaciones totales y las temperaturas máximas/mínimas medias se calcularon a partir de la serie diaria original, sumando los valores diarios durante el periodo inmediatamente anterior a la fecha de cada imagen. Así, las series climáticas se calcularon para los siguientes periodos previos a la fecha de la imagen: 15 días, 30 días, tres meses (enero, febrero y marzo para las imágenes de marzo) y seis meses (de marzo a agosto).

La prueba de Spearman permite detectar la presencia de tendencias temporales en las series del NDVI, pero no identifica los factores implicados. Por ello, una vez que se determinó cuáles de las series mencionadas

tienen un mejor ajuste, se procedió a aplicar una regresión multivariante de los valores medios del NDVI contra las variables climáticas en cada una de las coberturas (Medina, & Miramontes, 2014), para así determinar el grado de control que el clima ejerce sobre la actividad vegetal.

ANÁLISIS ESPACIALMENTE DISTRIBUIDO DE LAS TENDENCIAS DEL NDVI

Para realizar un análisis espacialmente distribuido de las tendencias temporales del NDVI, la regresión multivariante se repitió pixel a pixel para toda la región, para obtener un mapa espacialmente distribuido de las tendencias del NDVI que no pueden ser explicadas por las variables climáticas, y así identificar las áreas que experimentan procesos de degradación o recuperación vegetal. Para ello, se aplicó el análisis Mann-Kendall, en el *software* IDRISI (versión Selva).

La estadística Mann-Kendall es la frecuencia relativa de aumentos menos la frecuencia relativa de disminuciones, donde todas las combinaciones de pares de valores a través del tiempo son evaluadas en cada pixel y se realiza tomando en cuenta los números que están aumentando o disminuyendo con el tiempo; en esta estadística, la serie de tiempo es la variable dependiente y el tiempo, la variable independiente (Santana *et al.*, 2013).

Modelación para la presencia y propagación del descortezador *Ips confusus* en las regiones de *Pinus cembroides* para el estado de Chihuahua

La presencia de los descortezadores en los bosques de pino puede ser modelada a través del *software* MaxEnt, método que permite determinar el nicho ecológico y las áreas de distribución (Conabio, 2014a). El funcionamiento de MaxEnt se basa en tomar una lista de ubicaciones de presencia de especies como datos de entrada, además de un conjunto de predicciones ambientales (por ejemplo, temperatura y precipitación), a través de un *grid* de la región de estudio, que es de donde MaxEnt extrae una muestra de ciertas estaciones que contrastan con los lugares donde

existe presencia de las especies analizadas (Merow, Smith, & Silander, 2013).

Para la modelación fueron utilizadas un conjunto de 24 variables biofísicas continuas (Tabla 4), conformadas por 5 variables topográficas derivadas de un modelo digital de elevaciones y 19 variables bioclimáticas derivadas de las bases de datos de WorldClim (0.008 de pixel y 30 arc- segundos ~ 1 km) (Hijmans *et al.*, 2005).

Las variables ambientales fueron utilizadas de igual manera para modelar el nicho ecológico del pino y del descortezador. Se emplearon los datos puntuales con el nombre de la especie y las coordenadas en grados decimales, tanto para latitud como longitud, además de las variables que se deben convertir de formato ráster y cambiar a formato ASCII. Se ejecutó el modelado a través del *software* MaxEnt, se generaron diez réplicas, con cincuenta pruebas al azar y un modelo de tipo *bootstrap*, que permite obtener estimaciones de medidas de precisión, así como la realización de contrastes de hipótesis en aquellas situaciones en las que no se dispone de información acerca de la distribución (Pérez, 2014).

Los modelos resultantes fueron analizados para saber cuál es el que presenta una mejor fiabilidad. Se seleccionaron los tres modelos con el área bajo la curva (AUC) más alta, los cuales fueron importados en Arc-Map y convertidos en tipo flotante para que conservaran los datos originales. Posteriormente, se sumaron los tres mejores modelos creando un mapa consenso, que se reclasificaron en dos categorías con base en el 10 percentil (que indica la probabilidad de que el 10 % de los puntos de presencia pueden caer fuera del área de predicción del área de distribución potencial), generando un mapa dicotómico de presencia-ausencia de especies. El procedimiento generado se realizó para las dos especies en cuestión.

Tabla 4. Variables climáticas consideradas en el proceso de modelado

Código	Variable ambiental
BIO 1	Temperatura media anual
BIO 2	Rango de temperatura media mensual
BIO 3	Isotermalidad (P2/P7)(*100)

Continúa...

Código	Variable ambiental
BIO 4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar *100)
BIO 5	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO 6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO 7	Rango anual de temperatura (P5-P6)
BIO 8	Temperatura media del trimestre más húmedo
BIO 9	Temperatura media del trimestre más cálido
BIO 10	Temperatura media del trimestre más seco
BIO 11	Temperatura media del trimestre más frío
BIO 12	Precipitación anual
BIO 13	Precipitación del mes más húmedo
BIO 14	Precipitación del mes más seco
BIO 15	Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de Variación)
BIO 16	Precipitación del trimestre más húmedo
BIO 17	Precipitación del trimestre más seco
BIO 18	Precipitación del trimestre más cálido
BIO 19	Precipitación del trimestre más frío
SLOPE	Pendiente en grados
ASPECT	Orientación de ladera
ALTITUD	Metros sobre el nivel del mar
HILLS	Sombreado
FACUM	Acumulación de flujo

Fuente: WorldClim (2014).

Identificación de zonas vulnerables (regiones donde existe coincidencia de la especie de pino y plaga) para el estado de Chihuahua

A partir de los dos modelos de especies generados en MaxEnt (Pino piñonero y plaga de descortezador), se realizó un cruce de información para identificar únicamente las zonas donde existen ambas especies. Para realizar un mejoramiento a este mapa resultante, se obtuvieron de la serie V de cobertura y uso de suelo aquellas categorías que correspondían a pino y su asociación con otro tipo de vegetación, como el encino, asignándoles un valor de presencia, mientras que todas aquellas coberturas que no correspondieran a pino serían de ausencia. Posteriormente, se cruzaron el mapa de coberturas y el mapa dicotómico de ambas especies, y se encontró un área más delimitada y específica para la presencia de

Ips confusus en el bosque de pino, en específico para la especie de *Pinus cembroides*.

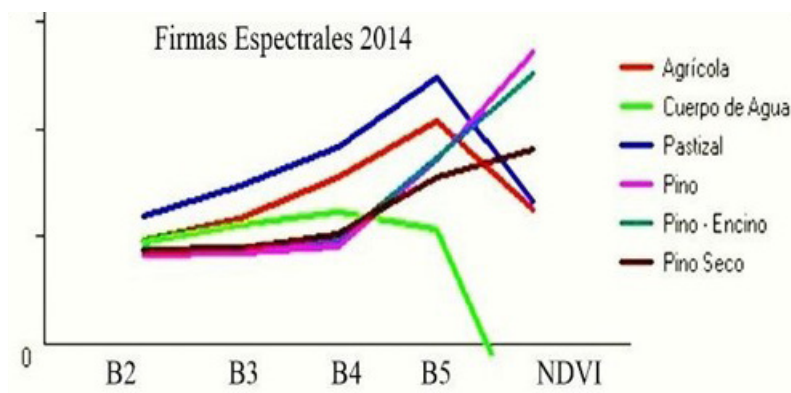
Resultados

ELABORACIÓN DEL MAPA DE COBERTURA Y USO DE SUELO

Mediante las categorías establecidas para la cobertura y uso de suelo determinadas previamente, se procedió a la digitalización de las áreas de entrenamiento y, posteriormente, a la elaboración de la clasificación supervisada a través del módulo MAXLIKE. Se obtuvieron las firmas espectrales de dichas coberturas, se compararon con las bandas del espectro visible, además de la del infrarrojo, y se añadió una banda del NDVI para obtener una mejor separabilidad en las firmas (Alatorre *et al.*, 2015).

En la Figura 4 se observa que la banda del infrarrojo en Landsat 8 presenta una mejor discriminación, apoyada por la información espectral que nos brinda la banda del NDVI, la cual ayuda a que esta separabilidad sea mayor. Identificando que la clase de interés, en este caso la cubierta de pino seco, sea la que logre discriminarse de las demás cubiertas del bosque. Debido a la época del año (término del invierno), las cubiertas de pastizal y agricultura no presentan elevada actividad fotosintética, seguidas de la zona de bosque con pino seco, que se encuentra en condiciones muy similares; en cambio, aquellas zonas que no se encuentran con afectación tienen un elevado valor de vegetación, como el caso del bosque de pino y en su asociación con el encino. En el caso de los cuerpos de agua en las bandas 5 y NDVI, sus valores se encuentran en declive, debido a que la energía es absorbida en esos rangos del espectro. Una vez que se observó la separabilidad espectral, se aplicó el método de clasificación MAXLIKE, tomando en cuenta que las áreas de entrenamiento estaban bien definidas (Alatorre *et al.*, 2015).

Figura 4. Firmas espectrales para las distintas cubiertas y uso de suelo para el año 2014



Fuente: elaboración propia.

Se realizó la validación a través de la matriz de confusión (Tabla 5), para un total de 253 puntos de control, a través de un muestreo estratificado y en comparación con una imagen de alta resolución obtenida de Google Earth. La intersección en la misma categoría son los aciertos obtenidos, mientras que los que caen en otra categoría se consideran errores. En total, se obtuvo una confiabilidad global de 90 %.

De acuerdo con el mapa de coberturas y uso de suelo elaborado para el año 2014 (Figura 5), se obtuvo la superficie en hectáreas que ocupaba cada categoría en el área de estudio (Tabla 6). Para el sector forestal de la colonia Chupaderos existe un total de 95 ha de pino piñonero que se han perdido, debido al ataque del descortezador *Ips confusus*.

Tabla 5. Matriz de confusión de la clasificación aplicada a la muestra de entrenamiento (puntos por categoría)

	AG	CP	PZ	P	PE	PS	Total
AG	49	0	1	0	0	0	50
CP	0	3	0	0	0	0	3
PZ	3	0	39	0	8	0	50
P	0	0	1	47	2	0	50
PE	0	0	1	0	47	2	50
PS	0	0	0	1	6	43	50
Total	52	3	42	48	63	45	253
EP	0.94	1	0.92	0.97	0.74	0.95	
EU	0.98	1	0.78	0.94	0.94	0.86	
Fiabilidad global: 0.90							

Fuente: elaboración propia.

* AG: agrícola; CA: cuerpo de agua; PZ: pastizal; P: pino; PE: pino-encino; PS: pino seco; EP: exactitud del productor; EU: exactitud del usuario.

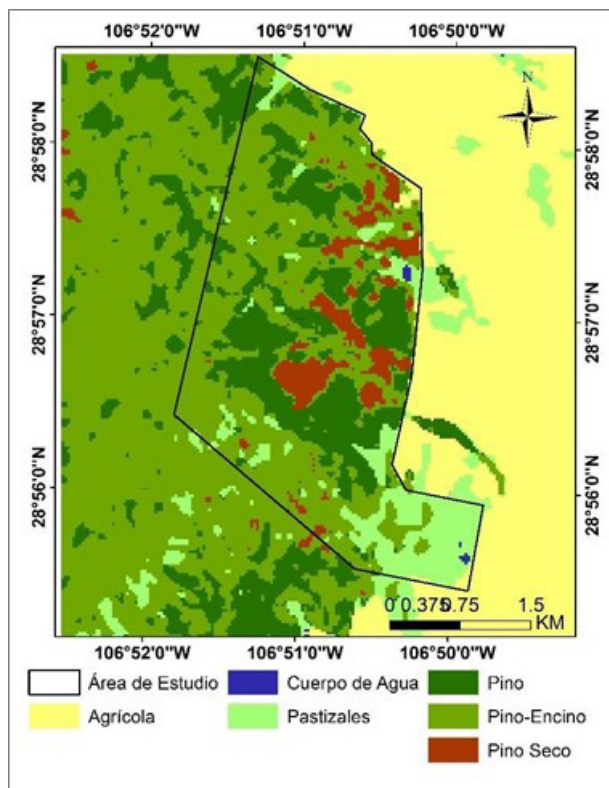
Tabla 6. Cobertura en hectáreas del área de estudio para cada categoría

Cobertura y uso de suelo	Hectáreas	Porcentaje de ocupación (%)
Agrícola	12	1.16
Cuerpo de agua	2	0.19
Pastizal	141	13.68
Pino	286	27.76
Pino-encino	494	47.96
Pino seco	95	9.22
Total	1030	100 %

Fuente: elaboración propia.

En la cartografía de cobertura y uso de suelo (Figura 5), se puede observar la región afectada en una zona muy específica. El ecosistema se encuentra fragmentado y la posibilidad de expansión de la plaga hacia las regiones de pino, puede ser muy favorable.

Figura 5. Cartografía de cobertura y uso de suelo (2014), zona forestal de la colonia Chupaderos



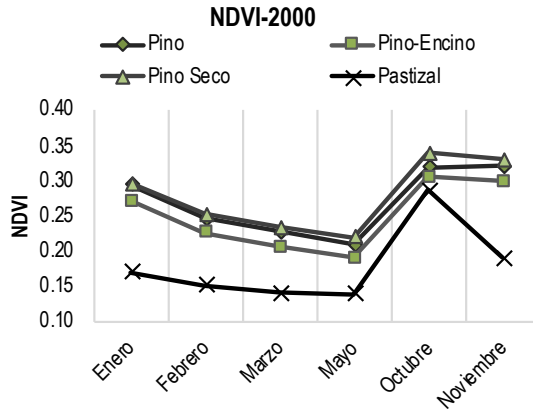
Fuente: elaboración propia.

SERIE TEMPORAL DEL NDVI Y VARIABLES CLIMÁTICAS (ESTACIONAL): 2000 Y 2014

Se llevó a cabo una evaluación preliminar de las tendencias temporales del NDVI para las áreas analizadas, con especial interés en las regiones de pino. Cabe hacer mención que la categoría de pino seco clasificada para 2014, fue utilizada de igual manera en el año 2000, con la diferencia de que esta se encontraba en condiciones estables. En las figuras 6 y 7, se puede observar la comparación entre las dos series del NDVI distintas de forma estacional. La categoría de pino seco para el año 2000 cuenta con

valores del $NDVI$ iguales a las demás regiones de pino, época en la que no existía ninguna afectación por el descortezador.

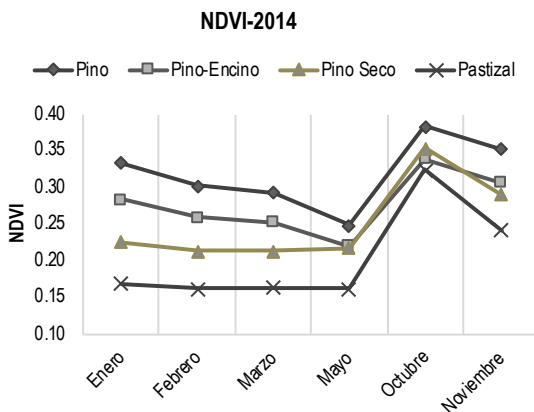
Figura 6. Evolución temporal de los valores medios del $NDVI$ para el año 2000



Fuente: elaboración propia.

Se tomaron los valores medios del $NDVI$ para el año 2014, observando que las áreas afectadas (pino seco) presentaron una disminución considerable en los valores de la vegetación (Figura 7). Cabe mencionar que la cobertura de pino seco cuenta con actividad vegetal (valores altos del $NDVI$), debido a la vegetación secundaria como el pastizal que se encuentra debajo de los pinos secos, o bien, por especies arbóreas aisladas como la asociación con el encino (sotobosque). En ambas temporadas, se observa un aumento considerable de actividad vegetal a partir del verano, dejando únicamente los meses de inicio del año para poder identificar de manera clara las diferencias entre las temporadas analizadas.

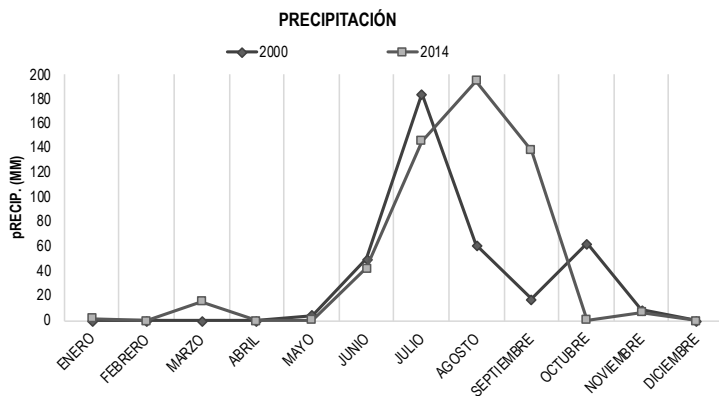
Figura 7. Evolución temporal de los valores medios del NDVI para el año 2014



Fuente: elaboración propia.

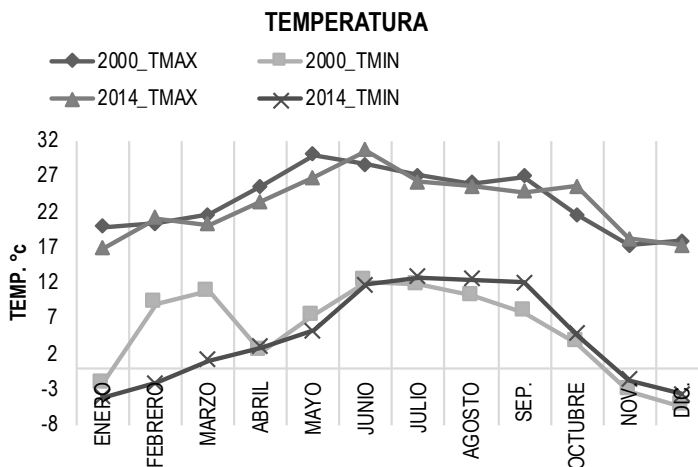
El análisis preliminar de las series climáticas para las dos temporadas anuales analizadas (2000 y 2014) muestra valores similares durante todo el año entre las dos series (Figura 8). En cuanto a la precipitación durante el año 2000 se acumularon 390 mm, mientras que 2014 se presentó como un año con mayor precipitación, llegando a 548 mm. La serie temporal de temperaturas máxima/mínima (Figura 9) presenta una tendencia regular y muy similar durante el año.

Figura 8. Evolución temporal de la precipitación en los años 2000 y 2014



Fuente: elaboración propia con datos de UNIFRUT: <http://www.unifrut.com.mx>.

Figura 9. Evolución temporal de la temperatura en los años 2000 y 2014



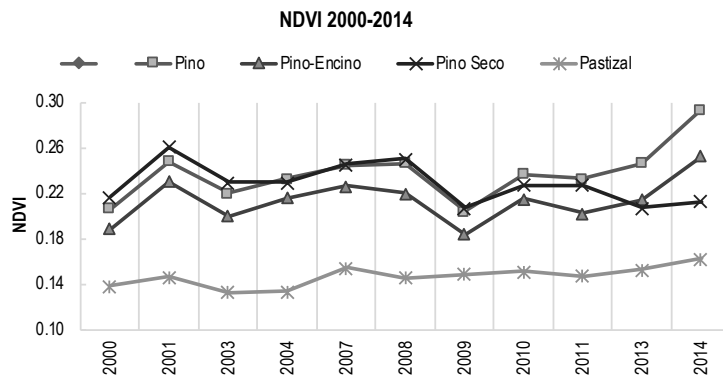
Fuente: elaboración propia con datos de UNIFRUT: <http://www.unifrut.com.mx>.

De manera visual, las series climáticas de forma estacional no demuestran un gran evento que pudiera verse relacionado con el NDVI; sin embargo, en el apartado siguiente se demuestra de manera anual la tendencia, tanto de las series climáticas como del NDVI.

SERIE TEMPORAL DEL NDVI Y VARIABLES CLIMÁTICAS (ANUAL): 2000-2014

De la misma manera, se realizó el análisis, ahora incluyendo todos los años entre estas dos temporadas, se observó una tendencia más significativa en las variables. Visualmente es evidente la tendencia del NDVI en la cobertura de pino seco (Figura 10), debido a que en principio de temporada (año 2000) presentaba valores incluso más elevados que las regiones de pino y pino-encino, ya que se trataba de una región con abundante actividad vegetal. A partir de la presencia de la plaga en el ciclo 2011-2013, esta tendencia disminuyó de manera considerable; las demás categorías en el año 2014 se encontraban, incluso, con tendencia positiva. De igual manera, aún cuenta con valores del NDVI debido a la vegetación secundaria presente, como el pastizal.

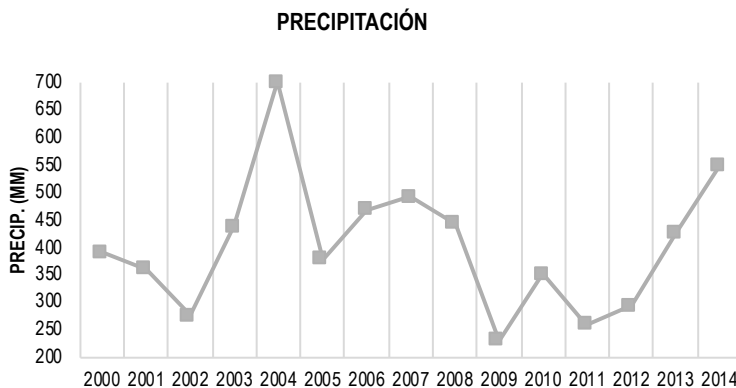
Figura 10. Evolución temporal de los valores medios del NDVI para el periodo 2000-2014



Fuente: elaboración propia.

Siguiendo con un análisis visual, en las series climáticas se encontraron valores relevantes en la precipitación, ya que se ha presentado una temporada muy variada con alzas y bajas muy considerables (Figura 11). La precipitación promedio en los últimos 15 años fue de 403 mm anuales, con registros extremos en 2004, donde se acumularon hasta 700 mm. Para 2009 solo se registraron 230 mm, siendo el año más seco; a partir de ese ciclo fue la temporada en la que estuvo presente la plaga de descortezadores (2010-2013), donde las precipitaciones alcanzaron alrededor de 300 mm anuales.

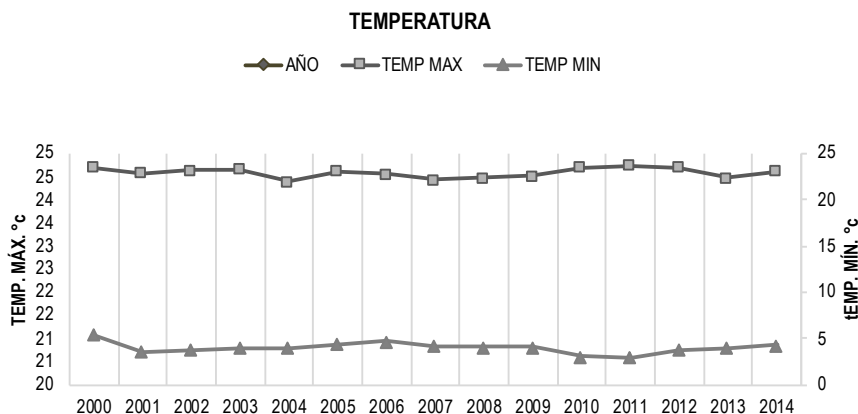
Figura 11. Evolución temporal de la precipitación para el periodo 2000-2014



Fuente: Fuente: elaboración propia con datos de UNIFRUT: <http://www.unifrut.com.mx>.

Respecto a la serie climática en la temperatura (Figura 12), la máxima promedio anual se encuentra en 23 °C, mientras que la mínima en 4 °C. La temporada es regular, pero analizando el ciclo donde se ha presentado el problema (2010-2013), se encuentra que los valores máximos y mínimos fueron muy diferentes a los demás años. Las temperaturas máximas aumentaron por encima del promedio y, de igual manera, las temperaturas promedio mínimas disminuyeron, siendo el año 2011 más extremo en relación con la temperatura, ya que se registraron las máximas (23.72 °C) y mínimas (2.91 °C) en promedio anual más extremas.

Figura 12. Evolución temporal de la temperatura para el periodo 2000-2014



Fuente: Fuente: elaboración propia con datos de UNIFRUT: <http://www.unifrut.com.mx>.

ANÁLISIS DE LA REGRESIÓN DEL $NDVI$ CONTRA LAS VARIABLES CLIMÁTICAS

El análisis estadístico de regresión multivariante, que se observa en la Tabla 7, permite explicar los patrones temporales del $NDVI$ observados en cada cobertura en relación con variables de precipitación, temperaturas, día juliano y el tiempo transcurrido. El mejor ajuste se obtuvo en la categoría de pino seco, que es el área de interés, mientras que las otras categorías de pino y pino-encino no presentaron ajuste al modelo de regresión multivariante, descartando cualquier tendencia significativa del $NDVI$.

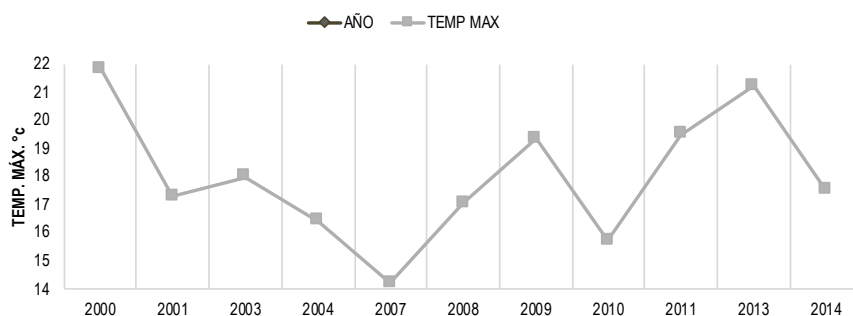
Tabla 7. Análisis de la regresión multivariante para los valores observados del NDVI en cada cobertura y uso de suelo

	Pino	Pino-encino	Pino seco	Pasto
R ²	0.55	0.47	0.91	0.86
<i>p-Valor</i>	-	-	< 0.028*	< 0.016*
Error residual estándar	0.019	0.024	0.016	0.028
Coeficientes Beta				
Precip. 2 meses	-	-	-	-
T máx. 3 meses	-	-	-0.601	-
T mín. 3 meses	-	-	-	-
Día juliano	-	-	-	-
Tiempo (año)	-	-	-0.467	0.756
Tendencia temporal (cambio en el NDVI)				
Por año	+0.0027	+0.0014	-0.0020	+0.0015
Periodo 2000-2014	+3.78 %	+2.06 %	-2.74 %	+2.01 %

Fuente: elaboración propia.

Solo se encontraron dos variables que explican las tendencias temporales de la vegetación para el pino seco: se trata de la temperatura máxima en los tres meses previos y el tiempo transcurrido. En ambas variables se encontró una correlación negativa, lo que significa que al transcurrir el tiempo, en un periodo de catorce años, la vegetación disminuyó su actividad, mientras que la temperatura máxima, de acuerdo con la distribución (un clima más cálido a finales de invierno e inicios de la primavera), ha favorecido la proliferación de la plaga de descortezadores, debido a que los pinos entran en una etapa de debilidad.

Figura 13. Evolución temporal de la temperatura previa a tres meses para el periodo 2000-2014



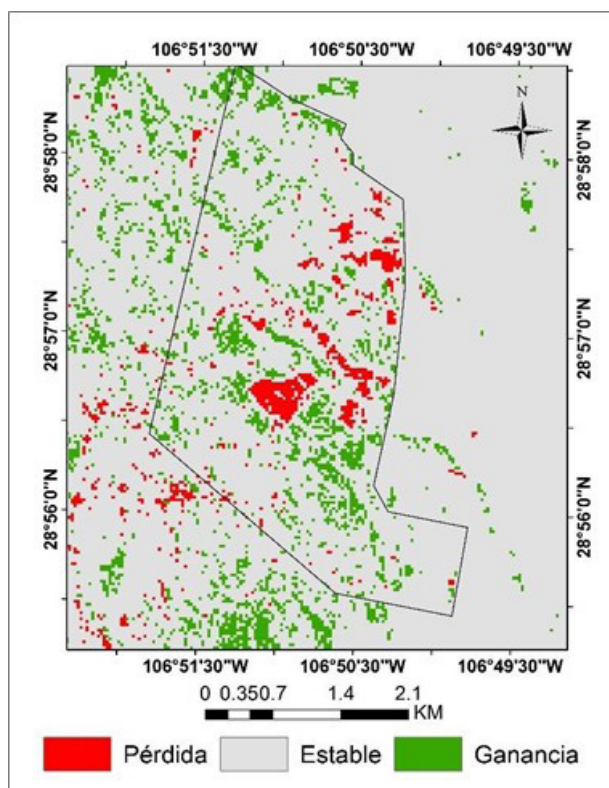
Fuente: elaboración propia con datos de UNIFRUT: <http://www.unifrut.com.mx>.

La variable de precipitación no ha demostrado ninguna correlación con la actividad vegetal en esa región, pero el que la precipitación acumulada no tenga ningún efecto significativo puede explicarse por la resistencia de la especie del pino a condiciones extremas. Sin embargo, Camacho (2012) menciona que el ataque de estos insectos se presenta después de eventos atmosféricos, como sequías, heladas, incendios y tormentas. La mayoría de las cubiertas presentaron una tendencia temporal positiva, con excepción de la región afectada, lo cual muestra una tendencia negativa.

El análisis Mann-Kendall, realizado a partir de la serie temporal del NDVI (2000-2014) con un estadístico significativo ($p = 0.10$), permitió observar de mejor manera la tendencia de la vegetación en el área de estudio.

En la Figura 14, se puede observar que el área en su mayoría es estable, mientras que en un porcentaje menor se encuentran las zonas con tendencia positiva, clasificadas como una región de ganancia, o bien, de recuperación en la vegetación. La clase de interés es aquella que presenta alguna tendencia negativa, por lo que se trata de las regiones donde se ha perdido o degradado la vegetación. Para el área de estudio, se observa una zona muy considerable, que coincide en su gran medida con la clasificación supervisada generada con anterioridad (Figura 5), para la categoría de pino seco.

Figura 14. Distribución espacial de las tendencias del NDVI (2000-2014), a través del análisis Mann-Kendall



Fuente: elaboración propia.

Analizando las tendencias de vegetación con la cartografía de cobertura y uso de suelo, se puede observar el porcentaje de área correspondiente a cada clase (Tabla 8). La clase de pino seco generada en la clasificación supervisada coincide con un total de 43.7 ha, que se han perdido en su totalidad, mientras que las otras 52 ha, clasificadas como pino seco, en el análisis de distribución espacial se clasifican como estables, lo que significa que no se han recuperado, o bien, puede encontrarse en una zona de transición entre una región afectada y una sin daños.

Tabla 8. Análisis de la frecuencia de las tendencias temporales del NDVI en cada una de las categorías

Clase	Pérdida	Estable	Ganancia
Pino	0.9 %	72 %	27.1 %
	2.7 ha	206.2 ha	776 ha
Pino-encino	2.7 %	87.7 %	9.6 %
	13.4 ha	433 ha	473 ha
Pino seco	46.1 %	53.9 %	0 %
	43.7 ha	52 ha	0 ha
Pastizal	1 %	94.5 %	4.5 %
	1.4 ha	131.4 ha	6.3 ha

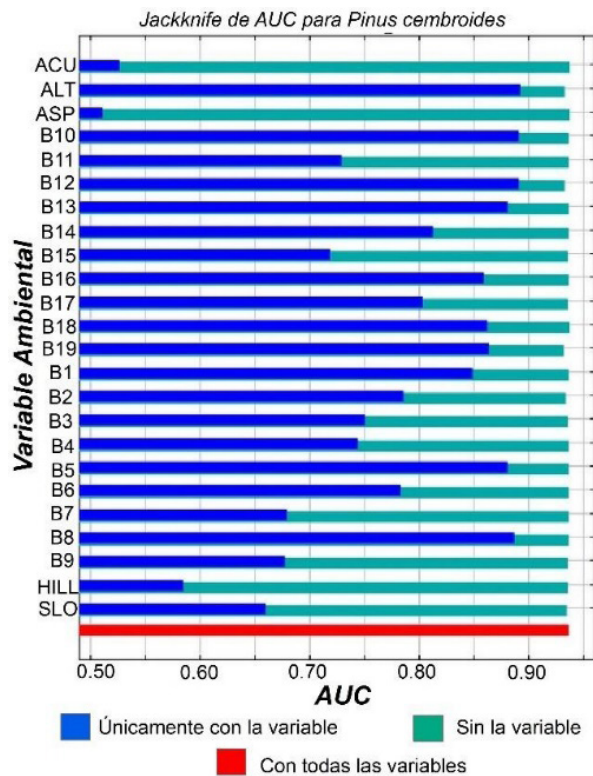
Fuente: elaboración propia.

MODELACIÓN DEL NICHU ECOLÓGICO PARA LA ESPECIE *PINUS CEMBROIDES* Y EL DESCORTEZADOR *IPS CONFUSUS*, A TRAVÉS DE MAXENT

La primera especie modelada es el pino piñonero, con 28 registros de presencia, cuyo nicho ecológico de distribución se aprecia en la Figura 16, la cual se extiende a lo largo de la sierra Madre Occidental, en los límites con la altiplanicie mexicana para el estado de Chihuahua. El modelo para el pino presenta una fiabilidad elevada de 0.967. Las variables que mejor contribuyeron para el modelado del pino fueron la temperatura media del trimestre más seco (BIO 10) con 34.3 %, seguida de la precipitación anual (BIO 12) con 16.5 % y, por último, la altitud con 10.5 % de contribución al modelado.

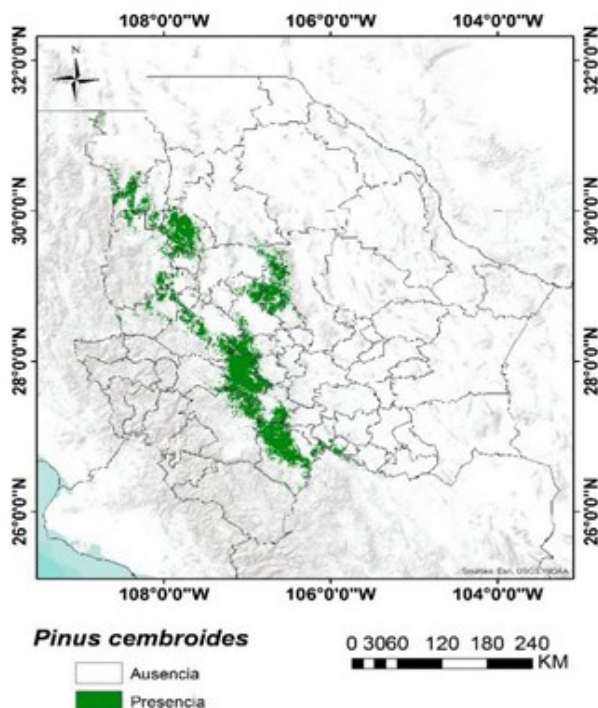
La Figura 15 demuestra la contribución de las diecinueve variables bioclimáticas y las cinco topográficas, a través del AUC generada por el método Jackknife en el *software* MaxEnt. El pino piñonero requiere de ciertas condiciones para desarrollarse, como la altura que es fundamental, además de la precipitación anual y la temperatura del mes más seco. Sin embargo, variables derivadas del modelo digital de elevaciones no son fundamentales para la distribución de la especie, como en el caso de la acumulación de flujo, la orientación de laderas y el sombreado.

Figura 15. Jackknife del AUC para la especie *Pinus cembroides*



Fuente: elaboración propia generada a través de MaxEnt.

Figura 16. Mapa de distribución de la especie *Pinus cembroides* en el estado de Chihuahua



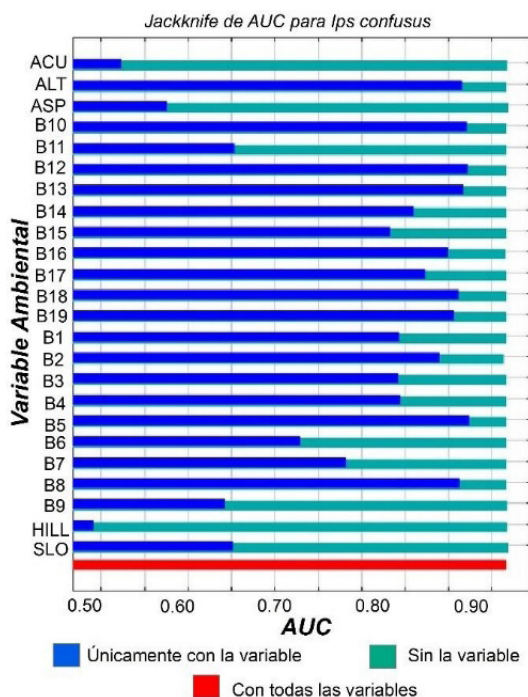
Fuente: elaboración propia.

El método Jackknife muestra la ganancia que genera cada variable en tres diferentes escenarios: en color azul se observa el modelo con una sola variable; en color verde, con todas las variables excepto una; y en color rojo, todas las variables. Es utilizado para reflejar cuánta información útil contiene cada variable. Dentro del eje X es la ganancia, mientras que en el eje Y es la variable (barras verdes: sin la variable; barras azules: solo con la variable; barras rojas: todas las variables; figuras 15 y 17). Posteriormente, se realizó la modelación del nicho ecológico para el descortezador *Ips confusus*, con dieciocho registros de presencia. La distribución espacial se muestra en la Figura 18, y comparada con los puntos de ocurrencia proporcionados por la Conafor, coincide con las áreas donde se

ha presentado esta plaga a partir del año 2012, principalmente en los municipios de Balleza, Carichí y Cusihuiriachi.

El modelo para la plaga presenta una fiabilidad promedio de 0.991. Las variables que mejor contribuyeron para el modelado de la plaga del descortezador fueron la temperatura media del trimestre más seco (BIO 10) con 22.8 %, seguida de la precipitación del trimestre más cálido (BIO 18) con 13.4 % y, por último, la precipitación anual (BIO 12) con 10.8 % de contribución al modelado.

Figura 17. Jackknife del AUC para la especie *Ips confusus*



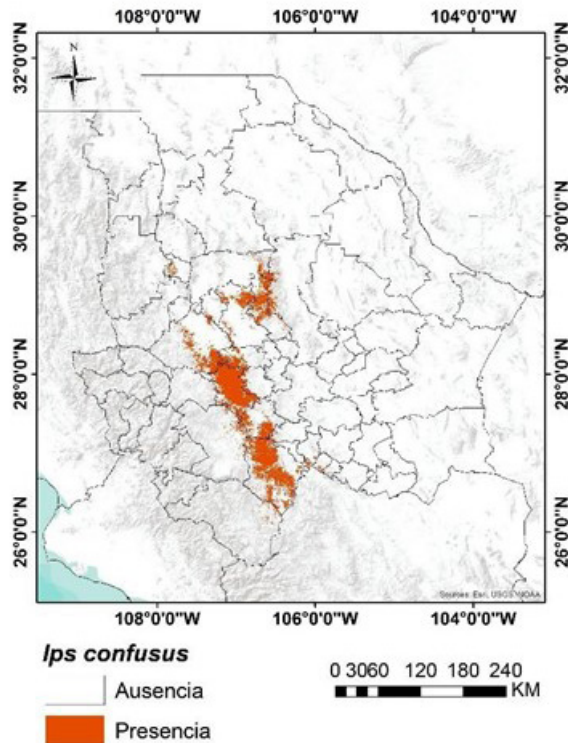
Fuente: elaboración propia generada a través de MaxEnt.

Podemos encontrar diferencias entre el modelado de las especies; por ejemplo, para el pino la altura en la que se encuentre es más considerable, además de la precipitación media anual y la temperatura media del trimestre más seco; en cambio, para la plaga son más significativas

variables como la temperatura y la precipitación. Se encontraron datos similares a los establecidos en la correlación de variables climáticas con la actividad vegetal, es decir, el pino puede verse afectado por temperaturas extremas o por déficit hídrico entrando en una etapa de vulnerabilidad; en cambio, la plaga necesita que dichas temperaturas sean un poco más cálidas para poder establecerse.

Los modelos generados se ven influenciados de manera considerable por los puntos de presencia empleados, lo cual es una de las limitantes que se presentan, aunque MaxEnt puede generar resultados de manera confiable con pocos puntos de registro.

Figura 18. Mapa de distribución de la especie del descortezador *Ips confusus* en el estado de Chihuahua



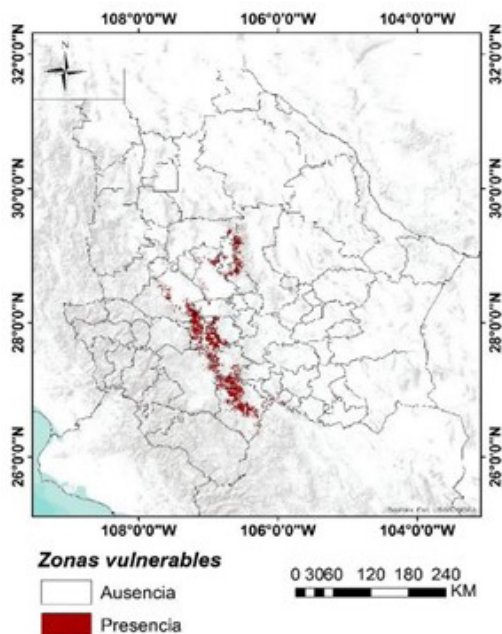
Fuente: elaboración propia.

IDENTIFICACIÓN DE ZONAS VULNERABLES (REGIONES DONDE EXISTE COINCIDENCIA DE LA ESPECIE DE PINO Y PLAGA) PARA EL ESTADO DE CHIHUAHUA

Con las modelaciones generadas para obtener el nicho ecológico de cada especie de interés (*Ips confusus* y *Pinus cembroides*), se pudieron establecer las zonas donde la presencia y ocurrencia de ambas coinciden. Además, para encontrar las áreas más vulnerables se hizo un cruce del mapa anterior con la serie V del Inegi, mapa de coberturas y uso del suelo, de donde previamente fueron seleccionadas las coberturas de pino para eliminar las regiones de presencia de plaga que se encontraban en zonas que no corresponden a su distribución, por ejemplo, en agricultura o pastizales.

La Figura 19 muestra las zonas vulnerables con las condiciones más idóneas para el esparcimiento de la plaga, con probabilidad de presencia en doce municipios: Balleza, Carichí, Chihuahua, Cuauhtémoc, Cusiuhiriachi, Guachochi, Guerrero, Namiquipa, Nonoava, Riva Palacio, San Francisco de Borja y San Francisco del Oro. En comparación con los modelos de nicho ecológico generados anteriormente, este mapa final presenta con un elevado nivel de certidumbre las áreas consideradas donde la especie de *Ips confusus* puede afectar al pino piñonero, es decir, un total de 4195 km² presentan las condiciones ideales para el desarrollo de la plaga, y en cierta medida algunas de esas áreas ya fueron afectadas, como en los municipios de Balleza y Carichí en mayor extensión.

Figura 19. Mapa de distribución potencial del descortezador *Ips confusus* en el bosque de pino piñonero en el estado de Chihuahua



Fuente: elaboración propia.

Discusión

De acuerdo con los resultados del análisis de las series temporal del NDVI y variables climáticas (anuales), de 2000 a 2014, se pudo comprobar que dicho ciclo estuvo afectado por condiciones irregulares del clima, tanto en precipitación como en temperaturas. A partir de ello, las regiones de pino pueden presentar afectaciones en su fenología y encontrarse en etapa de estrés y debilidad, y es en este momento cuando la plaga del descortezador aprovecha para atacar, alojándose en la corteza para posteriormente secar el pino. Se confirmó lo ya antes visto en otras regiones del país, donde la población de insectos se incrementa tras temporadas de sequías prolongadas, factores que debilitan a los árboles en las zonas boscosas (Cuéllar *et al.*, 2013).

Ahora bien, de acuerdo con el análisis de la regresión del NDVI contra las variables climáticas, se encontró una correlación negativa entre la variabilidad del NDVI, del pino seco, con las covariables de temperatura máxima en los tres meses previos y el tiempo transcurrido. Estos resultados son contrarios a lo observado en otros estudios (Alatorre *et al.*, 2015), en donde un clima más cálido en la primavera ha favorecido en la región central de Chihuahua un incremento en los valores medios del NDVI en algunas categorías vegetales, como producto de un adelantamiento del periodo fenológico de la vegetación. En este caso, si tomamos en cuenta lo observado en el apartado anterior, donde la región ha venido padeciendo una sequía prolongada en los últimos años, un incremento en la temperatura podría estar afectando las tasas de evapotranspiración y las funciones de la fotosíntesis (FAO, 2002), lo cual indudablemente vulneró el vigor de la vegetación (estrés hídrico) exponiéndola al ataque del descortezador, ya que el ataque en masa de esta plaga provoca la muerte del hospedero, además de que pueden atacar árboles vivos que deben encontrarse muy debilitados y con diferentes insuficiencias para detener el ataque (Camacho, 2012).

El análisis espacialmente distribuido de las tendencias temporales del NDVI, realizado pixel a pixel para evaluar los procesos de recuperación y degradación en la cubierta vegetal, demuestra que la mayoría de la superficie ha permanecido sin tendencia en condiciones estables. La cubierta analizada y de mayor interés es la región de pino seco, la cual no presenta ninguna recuperación; en cambio, sí se encontró que otras coberturas en el área también presentan pérdida en su actividad vegetal: se trata del pino, pino-encino y pastizal, con un total de 17.5 ha, esta pérdida puede atribuirse a otros posibles factores de influencia en la región, como pueden ser el sobrepastoreo y la extracción de leña, principalmente.

Por otra parte, los resultados de la modelación del nicho ecológico para la especie de *Pinus cembroides* y el descortezador *Ips confusus*, a través del software MaxEnt, permitió demostrar que a diferencia del pino piñonero, el descortezador *Ips confusus* necesita de condiciones que se relacionan más con la temperatura y la precipitación, mientras que la altitud no es uno de los principales factores para su dispersión, pero sí es fundamental. En el caso de la plaga deben ser analizados más a deta-

lle las características de dispersión, ya que es posible agregar variables como la población y vías de comunicación, que pueden ser factores para propagar la expansión de la plaga.

Finalmente, la identificación de zonas vulnerables (regiones donde existen coincidencia de la especie de pino y plaga) para el estado de Chihuahua permitió encontrar varios municipios con áreas donde las condiciones pueden favorecer la presencia del descortezador *Ips confusus*. Aunque estas cartografías se generaron a una escala mayor, equivalente a un kilómetro por pixel, se demuestra que toda el área forestal de la colonia Chupaderos, en el municipio de Cuauhtémoc, cuenta con las condiciones ideales para el desarrollo de la plaga.

Conclusiones

La utilización de imágenes del satélite Landsat para obtener información espectral para la elaboración del mapa de coberturas y uso de suelo, más la inclusión del NDVI dentro de las firmas espectrales de cada una de las categorías, ayudó a mejorar considerablemente la separabilidad espectral de las cubiertas presentes en el área de estudio; además, también permitió identificar las áreas donde la especie de pino piñonero se encuentra afectado por la plaga de descortezadores, con un área aproximada de 95 ha afectadas.

Posteriormente, el análisis y la comparación temporal del comportamiento de variables climáticas, como la temperatura y la precipitación, además del NDVI, tanto de forma estacional como anual durante 14 años, logró destacar las diferencias entre las series comparadas. Existieron eventos climáticos que afectaron la actividad vegetal, ya que los inviernos han sido más cálidos, lo que puede explicar la aparición de los descortezadores; asimismo, la precipitación anual disminuyó en los últimos cinco años, lo que permite que los pinos entren en un estrés hídrico y se encuentren vulnerables.

La serie temporal del NDVI demostró que la actividad fotosintética del pino piñonero comenzó a disminuir a partir del año 2011 en el área analizada, mientras que otras coberturas presentaban valores normales de vegetación.

En el análisis estadístico de regresión multivariante, se encontró que la temperatura de los tres meses previos y el tiempo son las variables que determinan la pérdida de la vegetación. El análisis Mann-Kendall ratificó lo generado en la cartografía de cobertura y uso de suelo, al comparar pixel a pixel en la serie temporal del NDVI las áreas que presentan ganancia, pérdida y estabilidad de la vegetación.

En relación con las modelaciones de nicho ecológico con MaxEnt, es un acercamiento para mostrar las áreas potenciales de distribución de las especies del pino piñonero y el descortezador *Ips confusus*. Las variables ambientales y topográficas son determinantes para la presencia de una especie. En los casos analizados, la temperatura, la precipitación y la altura son las variables que más influyen, calculando un total de 4195 km² que presentan las condiciones ideales para el desarrollo de la plaga.

Los SIG y sistemas de percepción remota son de gran utilidad para el manejo de datos, además de su interpretación. Este tipo de metodologías de reciente creación permite tomar medidas de prevención y generar planes para controlar y monitorear los problemas forestales en la actualidad; además, la información generada muestra las evidencias necesarias para que instituciones gubernamentales como la Conafor aporten recursos para la reforestación de los bosques.

Los objetivos fueron cumplidos satisfactoriamente. Con la información generada y los análisis efectuados, se confirmó la hipótesis, ya que una serie temporal del NDVI sí permite observar las variaciones de la actividad vegetal, en el caso específico del bosque piñonero para la región central del estado de Chihuahua.

Llevar a cabo análisis a escala detallada en un área pequeña y específica, como en el caso de la colonia Chupaderos en el municipio de Cuauhtémoc, Chihuahua, permitió mostrar variaciones con más efectividad, en comparación con trabajos realizados a escala municipal o regional.

Conclusiones generales

En la presente compilación, se han expuesto trabajos en donde se han obtenido resultados que permiten analizar el territorio desde el punto de vista geográfico y espacial. Mediante el uso y la aplicación de herra-

mientas geotecnológicas de los SIG y sistemas de percepción remota, así como de algoritmos de predicción, como MaxEnt, además de variables edafoclimáticas, topográficas, etcétera, es posible determinar zonas de interés para la protección de la flora y la fauna; aunado al análisis de la distribución potencial de las especies sobre corredores biológicos en el territorio, esto ofrece a los tomadores de decisiones una percepción geoespacial de su comportamiento, permitiéndoles tomar las mejores alternativas para el cuidado, monitoreo y conservación de las especies en riesgo o en peligro de extinción.

Por otro lado, la combinación de estas técnicas, algoritmos y herramientas de geoprocésamiento de imágenes de satélite permiten obtener análisis multitemporales del territorio, así como generar el comportamiento espectral y fenológico de la vegetación. La aplicación de estos métodos y geoprocésos mediante herramientas de SIG son de gran utilidad cuando se es necesario analizar el daño provocado por plagas sobre una cobertura forestal durante un periodo; se obtienen así resultados del dosel verdor de la vegetación y su respuesta espectral modificada por los daños de los insectos. Asimismo, es posible determinar las zonas de la distribución potencial y de traslape de ciertas especies forestales que podrán ser atacadas por estos organismos, ayudando a analizar las regiones en el territorio que podrían ser reforestadas y que, a la vez, estarían en riesgo por alguna plaga.

Dentro del análisis del territorio es relevante saber identificar zonas potenciales de reforestación; técnicas como la agroforestería son empleadas para la conservación de las especies de la flora y la fauna, ayudando a la conservación del territorio. El uso de SIG, procesamiento de imágenes satelitales y algoritmos de distribución potencial, como MaxEnt, son de vital importancia cuando se requiere aplicar técnicas de reforestación. El apoyo que ofrecen estas nuevas tecnologías es generar resultados en donde es posible identificar las áreas con las condiciones óptimas y adecuadas para el desarrollo biológico de las especies endémicas para la reforestación.

La aplicación de métodos, herramientas geotecnológicas y técnicas de geoprocésamiento han sido importantes en los últimos años en el sector salud, por lo que comprender y predecir cómo se distribuyen vec-

tores de transmisión de enfermedades en el territorio y espacio geográfico es de gran ayuda, debido a que es posible determinar las regiones que cumplen con las condiciones ambientales óptimas para que se desarrollen estos organismos, así como obtener y predecir la población que se encuentra en riesgo de la transmisión de enfermedades por dichos vectores.

Finalmente, en las últimas décadas, la aplicación del GPS, sensores remotos y SIG en el estudio de los ecosistemas ha hecho posible que la geoinformática se convierta en una herramienta clave en estudios relacionados con la biogeografía. Por ejemplo, las aportaciones de la geoinformática en estudios de biodiversidad han facilitado la implementación de las acciones dirigidas a la conservación o recuperación de las especies. Las relaciones espaciales en los estudios relacionados con la biogeografía se han convertido en algo indispensable; prueba de ello, es que programas como ArcGIS, QGIS y la suite estadística R han desarrollado he implementado módulos específicos para el estudio de patrones y geoestadística para el estudio de esta rama de las ciencias naturales.

Literatura citada

- Alatorre, L. C., Beguería, S., & Vicente, S. M. (2010). Análisis de la evolución espacio-temporal del NDVI sobre áreas vegetadas y zonas de riesgo de erosión en el Pirineo Central. *Pirineos*, 165, 7-27.
- Alatorre, L. C., Miramontes, S., García, A. K., Díaz, R., & Bravo, L. C. (2014). Evolución de la dinámica vegetal mediante una serie de imágenes Landsat TM (1986-2011): región central de Chihuahua, México. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 40(2), 449-476.
- Alatorre, L. C., Sánchez, E., Amado, J. P., Wiebe, L. C., Torres, M. E., Rojas, H. L., Bravo, L. C., & López, E. (2015). Analysis of the temporal and spatial evolution of recovery and degradation processes in vegetated areas using a time series of Landsat TM images (1986-2011): Central region of Chihuahua, México. *Open Journal of Forestry*, 5(2), 162-180.
- Brizuela, A., Aguirre, C. A., & Velasco, I. (2007). Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal. En Martín (ed.), *Teledetección. Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional* (pp. 201-214). Recuperado de <https://>

- docplayer.es/44560678-Aplicacion-de-metodos-de-correccion-atmosferica-de-datos-landsat-5-para-analisis-multitemporal.html
- Camacho, A. (2012). *El género Ips (coleóptera: Curculionidae: Scolytinae) en México* (Tesis de doctorado). Colegio de Postgraduados-Laboratorio de Entomología Forestal. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10521/1682>
- Ceroni, M., Achkar, M., & Gazzano, I. (2013). Evolución temporal del NDVI en Uruguay mediante imágenes SPOT en el periodo 1998-2012. En el XVI Simposio Brasileiro de Sensoramiento Remoto, Brasil, (pp. 1314-1321).
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid: Rialp.
- (1998). El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de Teledetección*, 10, 1-9.
- Cibrián, D., Méndez, J. T., Campos, R. Yates, H. O., & Flores, J. E. (1995). Tres especies del género *Dendroctonus* encontradas en México. En *Insectos forestales de México* (pp. 269-285). México: Universidad Autónoma de Chapingo/Comisión Forestal de América del Norte.
- Comisión Nacional de Biodiversidad (Conabio) (2014a). Nichos y áreas de distribución. Recuperado de <http://nicho.conabio.gob.mx/calibracion-del-modelo/maxent>
- (2014b). *Pinus cembroides* Zucc. Recuperado de http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/54-pinac11m.pdf
- Comisión Nacional Forestal (Conafor) (2011). *Pinus cembroides* Zucc. Recuperado de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/955Pinus%20cembroides.pdf>
- (2014). Base de datos: predios afectados por *Ips confusus*, Chihuahua, México. Departamento de Sanidad Forestal, Gerencia Estatal de la Comisión Nacional Forestal. Chihuahua, Chih. (4 de octubre de 2014)
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35-46.
- Cuéllar, G., Equihua, A., Villa, J., Estrada, E. G., Méndez, T., & Romero, J. (2013). Análisis espacio-temporal de los bosques de *Pinus cembroides*

- des Zucc. atacados por *Dendroctonus mexicanus* Hopkins. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(17), 42-49.
- Fierro, C. D., Torres, M. E., Alatorre, L. C., & Rojas, H. L. (2013). Modelado de nicho ecológico para la predicción del área de distribución actual y potencial del venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*) en el estado de Chihuahua. En L. Alatorre, M. Torres, H. Rojas, L. Bravo, L. Wiebe, F. Sandoval, & E. López (coords), *Geoinformática aplicada a procesos geoambientales en el contexto local y regional: teledetección y sistemas de información geográfica* (pp. 369-387). Ciudad Juárez: UACJ.
- Flores, J. D., Nájera, J. A., & Morales, L. (2003). Principales plagas de los pinos piñoneros en el sur de Coahuila. Recuperado de <http://www.uaaan.mx/DirInv/Rdos2003/recforestales/plagapino.pdf>
- García, A. K. (2014). Cartografías de variables climáticas de la región central de Chihuahua: una serie temporal 2000-2011 de las estaciones climatológicas de Unifrut. En L. Bravo, & L. Alatorre (coords.), *Geoinformática aplicada a la generación de cartografías temáticas. Clima, recursos hídricos, vulnerabilidad social y deforestación* (pp. 9-31). Ciudad Juárez: UACJ.
- García, S. E., & Cibrián, D. (2011). Pudrición de raíz causada por *Fusarium oxysporum* Schltdl. en coníferas. *Memorias del XV Simposio Nacional de Parasitología Forestal*, 204-207. Colegio de Postgraduados, Oaxaca, México.
- Gómez, M. K. (2005). Índice de vegetación en áreas del bosque seco del noroeste del Perú a partir de imágenes satelitales. Universidad de Piura. Recuperado de <http://infobosques.com/portal/biblioteca/indice-de-vegetacion-en-areas-del-bosque-seco-del-noroeste-del-peru-a-partir-de-imagenes-satelitales/>
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978.
- IDRISI (2014). MAXLIKE: IDRISI Selva Help System.
- Iglesias, M. R., Barchuk, A., & Grilli, M. P. (2010). Dinámica estacional e interanual del NDVI en bosques nativos de zonas áridas argentinas. *Revista de Teledetección*, 34, 44-54.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) (2014). Imágenes del territorio: Landsat. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/ImgSatelite/Landsat.aspx>
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (Inafed) (2014). Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México, estado de Chihuahua. Recuperado de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM08chihuahua/municipios/08017a.html>
- Loya, J. O., Aguilar, S., Fierro, C. D., Legarreta, C. K., Bencomo, J. A., & Alatorre, L. C. (2012). Análisis de la separabilidad espectral de cultivos agrícolas en imágenes del sensor Landsat TM para la región de Cuauhtémoc, Chihuahua, México. En J. Mas, & G. Cuevas, *Memorias del Congreso XIX Simposio Nacional Selper-México* (pp. 43-48). México: UNAM.
- Maldonado, J. D., Moreno, L. J., & Alatorre, L. C. (2013). Evaluación de la pérdida de *Pinus cembroides* aplicando teledetección y SIG: caso de estudio en la zona noroeste del municipio de Cuauhtémoc, Chihuahua. *Memorias de la XX Reunión Nacional de Selper-México*.
- Medina, R. J., & Miramontes, S. (2014). *Análisis de la evolución temporal de la actividad vegetal en áreas de manglar (1990-2010): deltas de los ríos Yaqui y Mayo en Sonora, y río Fuerte en Sinaloa, México* (Tesis de licenciatura). UACJ. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.11961/2064>
- Mendoza, A., Cibrián, D. & García, S. E. (2011). *Phytophthora cinnamomi* Rands. y *Fusarium oxysporum* Schltdl. como agentes causales de pudrición de raíz en *Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* (Mayr) Franco. *Memorias del XV Simposio Nacional de Parasitología Forestal*, 191-195.
- Meneses, C. L. (2012). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasylva, Revista Internacional de Silvicultura e Industrias Forestales*, 238, 39-46.
- Merow, C., Smith, M. J., & Silander, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distribution: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058-1069.
- Ojeda, A. (2010). Ficha del *Ips confusus*. Recuperado de <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/15/1443Ips%20confusus.pdf>

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2002). El cultivo protegido en clima mediterráneo. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/005/s8630s/s8630s06.html>
- Pérez, G. (2014). *Análisis de fragmentación de hábitat con base en la distribución potencial del águila real (Aquila chrysaetos) en Chihuahua, México* (Tesis de licenciatura). UACJ. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.11961/1746>
- Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., & Harlan, J. C. (1974). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green Wave effect) of natural vegetation*. NASA/GSFC. Recuperado de <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740004927.pdf>
- Santana, M. V., Rosales, E. M., Manzano, L. R., Santana, G., & Pineda, N. B. (2013). Las geotecnologías en la construcción de ciudades saludables: zona metropolitana de Toluca, México. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (Geosig)*, 5, 64-95.
- Secretaría de Marina (Semar) (2012). Recuperado de <http://www.semar.gob.mx/s/informacion-sector/ciencia/ermexs/percepcion-remota.html>
- WorldClim (2014). Bioclim. Recuperado de <http://worldclim.org/bioclim>

UACJ