

# Degradación y deforestación en la cuenca del río Conchos (México): modelado predictivo mediante regresión logística (1985-2016)

Degradation and deforestation in the Conchos river basin (Mexico): predictive modeling through logistic regression (1985-2016)

LUIS CARLOS BRAVO PEÑA<sup>1</sup>  0000-0002-9825-3940

MANUEL OCTAVIO GAUTRÍN CÓRDOVA<sup>2</sup>  0000-0002-4602-6340

LUIS CARLOS ALATORRE CEJUDO<sup>3</sup>  0000-0003-0837-3381

MARÍA ELENA TORRES OLAVE<sup>3</sup>  0000-0003-3492-3914

RAMÓN LEOPOLDO MORENO MURRIETA<sup>3</sup>  0000-0003-4155-7545

VÍCTOR MANUEL SALAS AGUILAR<sup>3</sup>  0000-0002-0258-7816

HUGO LUIS ROJAS VILLALOBOS<sup>3</sup>  0000-0002-2483-9228

VÍCTOR MANUEL REYES GÓMEZ<sup>1</sup>  0000-0003-0452-7996

MARIO IVAN UC CAMPOS<sup>3</sup>  0000-0002-0151-6872

MANUEL OCTAVIO GONZÁLEZ LEÓN  0000-0003-3484-3295

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. México.

<sup>2</sup>División de Ciencias Sociales, Universidad de Sonora. México.

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. México.

<sup>4</sup>Instituto de Ecología A.C. México.

## Resumen

En este trabajo se identificaron las áreas de bosques de pinos, encinos y mixtos, con mayor probabilidad de ser degradadas-deforestadas en la cuenca del río Conchos (Chihuahua-Durango, México). Mediante superposición de cartografías (inventario de suelo y vegetación series I y VI) se obtuvieron las áreas donde los bosques de pinos, encinos y mixtos, se ha degradado-deforestado durante el periodo 1985-2016 en dicha cuenca. Posteriormente se aplicó la técnica de regresión logística considerando ocho variables físicas y socioeconómicas, posiblemente asociadas con la pérdida/degradación del bosque. Se obtuvo un valor de Pseudo R<sup>2</sup> de McFadden 0.204, que indica un alto poder predictivo del modelo. Se identificó una superficie

### Fechas • Dates

Recibido: 2021.06.25  
Aceptado: 2021.02.08  
Publicado: 2022.03.14

### Autor/a para correspondencia Corresponding Author

Luis Carlos Bravo Peña  
[luis.bravo@uacj.mx](mailto:luis.bravo@uacj.mx)

de 733.43 km<sup>2</sup> en riesgo de ser deforestada y degradada en el futuro, la cual representa el 6.7 % de la superficie de bosque existente actualmente en la cuenca. Las variables con mayor peso específico en la deforestación y degradación del bosque fueron, en orden descendente, marginación, concesiones mineras y tenencia de la tierra. Los resultados son útiles para prevenir la pérdida y degradación de los bosques en la cuenca del Río Conchos, y facilitan el manejo ambiental de la misma.

---

Palabras clave: Deforestación, Predicción, Chihuahua, Bosque de pino, encino y mixtos.

---

## Abstract

In this work, the pine, oak and mixed forest areas, with the highest probability of being degraded-deforested, were identified in the Conchos river basin (Chihuahua-Durango, Mexico). Degraded-deforested of pine, oak and mixed forest areas were calculated from 1985-2016 through map algebra (Inventory of land uses and vegetation series I and VI). Subsequently, the logistic regression technique was applied considering eight physical and socioeconomic variables possibly associated with the loss / degradation of the forest. A pseudo R<sup>2</sup> value of 0.204 was obtained, which indicates high predictive power of the model. An area of 733.43 km<sup>2</sup> was identified at risk of being deforested / degraded in the future, representing 6.7% of the forest area currently existing in the basin. The variables with the greatest specific weight in deforestation / forest degradation were, in descending order: marginalization, mining concessions and land tenure. The results are helpful to prevent the loss / degradation of pine-oak forests in the basin, and facilitate its environmental management.

---

Key words: Deforestation, Prediction, Chihuahua, Pine, oak and mixed Forest.

---

## 1. Introducción

La degradación deforestación de los bosques templados es un problema mundial (Hu *et al.*, 2021). Implica directamente la pérdida de biodiversidad, pero también el deterioro de funciones ambientales estrechamente ligadas a la conservación de la cubierta vegetal, como la calidad del agua en los reservorios de agua dulce (Adiaffi *et al.*, 2009), la severidad de inundaciones (Horton *et al.*, 2021), el control de la erosión (Hu *et al.*, 2021); etc. Su prevención/mitigación mediante medidas orientadas a la conservación de coberturas, representa una acción necesaria para asegurar la sustentabilidad en amplias regiones del planeta. Según el informe de la FAO 2020 sobre los recursos forestales mundiales, la superficie forestal mundial ha perdido 178 millones de hectáreas de bosque durante el periodo 1990-2020, con pérdidas que se han venido reduciendo en el periodo 2010-2020, pero que siguen siendo importantes (FAO, 2020). Dicho documento también establece que la deforestación, los incendios, plagas, y fenómenos meteorológicos extremos; constituyen amenazas que siguen siendo vigentes para los bosques boreales, templados y tropicales del planeta; pero vale destacar que en América Latina, alrededor del 70% de la degradación forestal se debe a las actividades de tala, seguidas de la leña, la extracción de carbón vegetal y los incendios forestales (Eguiguren, *et al.*, 2019).

En el caso de México, desde hace años se reconoce que la pérdida de superficies forestales alcanza magnitudes preocupantes (Rosete-Verges *et al.*, 2014). Según el Programa Nacional Forestal 2020-2024, el país está perdiendo su cobertura forestal a tasas brutas de 250 a 260 mil ha por año. Como se ha demostrado en otras regiones de Latinoamérica, este fenómeno se origina en un complejo entramado de causas antropogénicas y naturales (Armenteras *et al.*, 2017), destacando

cambios ilegales de uso del suelo, tala clandestina de los bosques, comercio ilegal de materias primas y productos forestales, incendios, plagas y enfermedades diversas que afectan a los bosques (Diario Oficial de la Federación, 2020). Como el mismo Programa Nacional Forestal lo reconoce, se trata de un fenómeno multifactorial, que requiere políticas públicas que atiendan tanto las pérdidas de bosque en el territorio nacional, como las causas sociales, económicas e institucionales que las están provocando. Esta tarea se facilitará si se realizan diagnósticos regionales que ubiquen geográficamente las áreas de mayor riesgo a ser deforestadas, y que esclarezcan, en lo posible, la importancia de las causas que lo originan.

Una de las medidas que puede ser útil en el manejo ambiental de los bosques, es la modelización y mapeo de áreas que son susceptibles de ser deforestadas o degradadas. Existen distintos procedimientos sustentados en las geo-tecnologías y los sistemas de información geográfica (SIG), que permiten la discretización espacial de las áreas con mayor probabilidad de cambio, así como la identificación y ponderación de los factores y causas antropogénicas relacionadas con estos procesos (Bravo-Peña *et al.*, 2017). Dichas metodologías se han ensayado con éxito en distintos lugares del mundo, buscando prevenir el deterioro de cubiertas vegetales. En el caso específico de México, se han modelizado los cambios futuros de uso del suelo en zonas boscosas del centro sur del país (Torres-Rojo *et al.*, 2016; Osorio *et al.*, 2015), pero son casi inexistentes las modelizaciones realizadas para identificar la vulnerabilidad de los bosques en estados norteros. En los trabajos se demuestra que las transiciones de zona arbolada a zona no arbolada siguen dinámicas distintas en función de la región y del tipo de vegetación analizado (bosque templado-bosque tropical), y que los factores causales de los cambios también son distintos de un lugar a otro, sobre todo en lo que respecta a factores antropogénicos (Torres-Rojo *et al.*, 2016).

Entre los factores antropogénicos identificados a nivel nacional destacan procesos como la expansión de la actividad pecuaria en zonas forestales (Barbier & Burgess, 1996), la expansión de la frontera agrícola (Monjardín-Armenta *et al.*, 2017), la tala concesionada y la extracción ilegal de madera (Bravo-Peña *et al.*, 2017), por citar algunos; aunque también es notoria la amenaza que actualmente impone la actividad minera (Humpreys & Sauls, 2019), que históricamente se ha desarrollado en la zona, pero que adquirió una extraordinaria importancia desde fines de la década de los 90 del siglo pasado. Estas actividades, en conjunto con actividades tradicionales como la agricultura de temporal, y la apertura de potreros ganaderos, han provocado cambios importantes en la cobertura superficial de los bosques, y afectaciones notorias en su composición de especies, generando también conflicto socio-ambientales (Bastidas-Orrego *et al.*, 2018). En México, no se tiene claro cuál de estos factores contribuye más a la pérdida de bosques, por lo que es necesario el desarrollo de trabajos y modelizaciones orientadas a establecer la importancia de estos factores en la degradación o pérdida de cobertura forestal.

Hablando del norte del país, la cuenca del río Conchos es una de las regiones donde la modelización de estos procesos es urgente. Esta cuenca de 67955.9 km<sup>2</sup> tiene mucha importancia desde el punto de vista hídrico, pues contribuye con buena parte de las aguas superficiales aportadas por México en el Tratado Internacional de Límites y Aguas, que compromete una parte del agua producida en territorio mexicano desde el año de 1944, para ser entregada a los Estados Unidos. La cuenca del río Conchos experimenta desde hace décadas procesos muy intensos de cambios de uso del suelo, con disminuciones importantes de su superficie forestal e incrementos en las superficies de uso agrícola, asentamientos humanos y demás áreas antropizadas. Estos cambios han provocado impactos en funciones ecosistémicas como la retención del suelo (erosión), y la funcionalidad hídrica (Rodríguez-Pineda *et al.*, 2017), pero pueden hacerse más graves si se conside-

ran los efectos del cambio climático en el norte de México, que implican en la cuenca del Conchos una modificación drástica de los caudales y repercusiones adicionales en la funcionalidad de sus paisajes (González-Villela *et al.*, 2017). De no modificarse los patrones actuales de cambio de uso del suelo, las consecuencias de su degradación ambiental pueden ser muy relevantes en México y en el ámbito binacional.

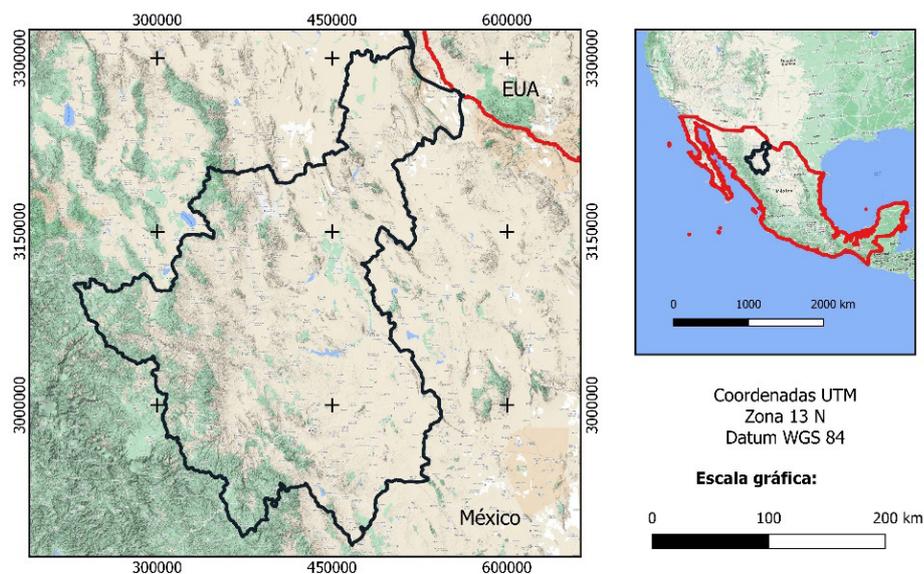
Por las razones anteriores, el objetivo de este trabajo fue desarrollar una modelización y mapeo de las zonas de bosque de pino, encino y mixto con riesgo de ser degradadas-deforestadas en la Cuenca del río Conchos, en los estados de Chihuahua y Durango, al norte de México. Se utilizó la técnica de regresión logística y se identificaron posibles variables explicativas de las pérdidas de masa forestal correspondientes al periodo 1985-2016.

## 2. Metodología

### 2.1. Área de estudio

La cuenca del río Conchos se localiza al norte del país. Se comparte por los estados de Chihuahua y Durango, y tiene una extensión territorial de 67955.9 km<sup>2</sup>, superior a la de países europeos como Lituania, Letonia, Dinamarca (Figura 1). El río Conchos nace en la vertiente oriental de la Sierra Madre Occidental a una altitud superior a los 3000 metros sobre el nivel del mar, y fluye cerca de 350 km hasta conectarse con el río Bravo, frontera natural entre los Estados Unidos de Norteamérica y México. En su trayectoria, el río Conchos desciende hasta los 800 metros sobre el nivel del mar, conectando con el río Bravo en las cercanías de la localidad fronteriza de Ojinaga, del lado mexicano.

Figura 1. Área de Estudio.



Fuente: elaboración propia con información de CNA (1988).

Esta cuenca es una de las más importantes del norte de México. Su superficie representa casi un 14 % de la cuenca del río Bravo, escurrimiento binacional que ha sido objeto de negociaciones

históricas por el uso del agua transfronteriza (Arreguín-Cortés *et al.*, 2013). Siendo uno de los grandes tributarios de este último, en la cuenca del río Conchos se produce anualmente una cantidad aproximada de 6205 millones de m<sup>3</sup> de agua (Rocha, 2005), parte de los cuales se utilizan localmente en actividades agropecuarias, industriales y de consumo humano, exportándose también para satisfacer las necesidades hídricas en Texas, y los estados mexicanos fronterizos de Coahuila, Tamaulipas y Nuevo León (Kelly, 2001).

Una parte sustancial del agua que transporta la cuenca del río Conchos se almacena en tres grandes presas: La Boquilla, Francisco I. Madero, y Luis L. León, localizadas en la cuenca alta, media y baja respectivamente. Juntas tienen una capacidad de almacenamiento de 3541 millones de m<sup>3</sup> al año, con los que se irrigan tres distritos de riego. Estas presas también son el receptáculo de sedimentos y otros materiales generados en la parte alta de la cuenca, por lo que sus volúmenes originales se han modificado con el tiempo. La degradación acelerada de las masas forestales aguas arriba de las presas (Rodríguez-Pineda *et al.*, 2017), genera un arrastre de sedimentos que no se ha cuantificado, provocado el azolvamiento de los tres reservorios. Además, los eventos recurrentes de sequía en la zona (Núñez-López *et al.*, 2007), generan periodos de disminución en los almacenamientos de las presas en la región acentuando las sequías hidrológicas, lo que provoca efectos negativos en la ecología, economía y estrategias de manejo del agua. Estas provocan pérdidas de vegetación natural y pérdidas económicas por reducción de superficies de cultivo en el estado de Chihuahua (Reyes-Gómez *et al.*, 2013).

Lo anterior cobra mayor relevancia si se considera que la degradación de los bosques en las cabeceras de la cuenca, se asocia con la pobreza en muchos municipios de la Sierra Tarahumara, donde se observa desde hace décadas métodos de explotación forestal no sustentables (Porrás-Carrillo, 1999). A ello se suman el cambio climático, que en esta región implica sequías más severas (UACJ, 2019), y la existencia del Tratado Internacional de Límites y Aguas, que compromete una parte del agua producida en territorio mexicano desde el año de 1944, para ser entregada a los Estados Unidos de Norteamérica (Arreguín-Cortés *et al.*, 2013). Estos factores dejan claro que la funcionalidad hídrica de la cuenca del río Conchos, se ve amenazada por factores naturales y humanos.

## 2.2. Procedimientos

El trabajo tuvo tres fases, que se describen a continuación:

### a. Identificación de áreas degradadas-deforestadas (1985-2016)

Para identificar las áreas deforestadas y degradadas se utilizaron las cartografías de uso del suelo y vegetación series I y VI del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2001 y 2016), cuyas categorías y clases se describen en INEGI (2015). Al respecto la serie I contiene en formato digital la información de usos del suelo que se fechó a 1985 en formato analógico (Mapas en papel), transferidas y presentadas en formato shape 16 años después, en 2001. La información de la serie VI por su parte, corresponde a los usos del suelo en formato digital fechados al año de 2016. En ambas cartografías las clases del mapa original se reagruparon en clases genéricas, para hacerlas comparables y facilitar la tabulación cruzada de un año a otro. Por ejemplo, la clase bosque de pino, encino y mixtos, es la reagrupación de las categorías originales bosque de pino, bosque de encino, bosque de pino-encino, bosque de encino-pino (*Pinus chihuahuana*, *Pinus durangensis*, *Pinus engelmannii*, *Quercus rugosa*, *Quercus*

*chihuahuensis*, *Quercus sideroxyla*; Lebgue, Quintana y Soto, 2015), clasificadas de esa manera por INEGI con base en la composición y dominancia de especies de los bosques. Igual sucedió con los matorrales, reagrupándose en todos los casos bajo la categoría de matorrales xerófilos. Con esta reagrupación se obtuvieron los mapas para cada año, que fueron superpuestos mediante álgebra de mapas en el programa Terrset de Idrisi. Con esto se identificó el cambio total de cada clase (positivo y negativo en km<sup>2</sup>), los porcentajes de cambio, y la ubicación espacial de los mismos, aunque sólo fue de nuestro interés visualizar la ubicación espacial de los cambios asociados a la pérdida y degradación del bosque. El procedimiento se basa en lo descrito por Pontius, Shusas & McEachern (2004).

#### b. Identificación y selección de variables explicativas

En este trabajo se consideraron ocho variables biofísicas y socioeconómicas explicativas del proceso de deforestación y degradación de los bosques. Para la selección de estas variables se tomaron en cuenta las variables propuestas por otros estudios que también emplearon la regresión logística en la modelación de patrones de deforestación (Serra, Pons, & Saurí, 2008; Pineda-Jaimes *et al.*, 2009; Morales-Barquero *et al.*, 2015; Bravo-Peña *et al.*, 2017); pero también se incluyeron variables propias de la región, considerando la experiencia de los autores del manuscrito. Estas ocho variables, el tratamiento que recibieron y sus fuentes se indican en la tabla 1. Posteriormente, se hizo un análisis de correlación espacial con las mismas, a fin de evitar sobre-representación de ellas en caso de estar correlacionadas, fijándose un criterio de 0.7 de correlación como límite máximo.

Tabla 1. Variables explicativas utilizadas en el modelo, fuentes y procesos a las que se sometieron.

| Variable                            | Fuente  | Proceso   |
|-------------------------------------|---|---|
| Tenencia de la tierra               | Registro Agrario Nacional (RAN, 2021)   | Corte con límites de cuenca y reagrupación en tres clases: Propiedad Privada, Propiedad Social (ejidos) y Propiedad de la Nación (Terrenos Nacionales y Cuerpos de Agua). |
| Concesiones mineras 2017.           | Mapa en formato Shape proporcionado por Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2017) | Corte con límites de cuenca y reagrupación en dos clases: Área Concesionada para Minería, Área no Concesionada.   |
| Grado de marginación por localidad. | Consejo Nacional de Población (2010). CONAPO (2010)                             | Interpolación por el método Inverso de la Distancia Ponderada (IDW).  |
| Distancia a polígonos agrícolas     | Inventario de Uso del Suelo y Vegetación Serie I (1985). INEGI (2001)           | Se extrajo del inventario, posteriormente se generó un mapa de distancias euclidianas al borde de los polígonos.  |
| Distancia a carreteras caminos      | Inventario de Uso del Suelo y Vegetación Serie I (1985). INEGI (2001)           | Se extrajo del inventario, posteriormente se generó un mapa de distancias euclidianas al borde de los polígonos.  |
| Distancia a localidades             | Inventario de Uso del Suelo y Vegetación Serie I (1985). INEGI (2001)           | Se extrajo del inventario, posteriormente se generó un mapa de distancias euclidianas al borde de los polígonos.  |
| Distancia a pastizales              | Inventario de Uso del Suelo y Vegetación Serie I (1985). INEGI (2001)           | Se extrajo del inventario, posteriormente se generó un mapa de distancias euclidianas al borde de los polígonos.  |
| Pendiente                           | Continuo de Elevaciones Mexicano (INEGI, 2013)                                  | La pendiente fue reclasificada en nueve clases, con intervalos de diez grados al borde de los polígonos.  |

Fuente: elaboración propia.

#### c. Regresión logística

Con las zonas degradadas y deforestadas identificadas en el apartado “a” y las variables explicativas seleccionadas en “b” se construyó el modelo de regresión logística (RLO). En este modelo se

asume que la variable de respuesta tiene un comportamiento dicotómico, pues solo puede asumir dos valores, siendo 1 la ocurrencia del fenómeno de interés (área degradada deforestada), y 0 su inexistencia o no ocurrencia. La distribución de esta variable está representada por un parámetro "P", que indica su probabilidad. Por su parte, las variables explicativas pueden ser numéricas, continuas o categóricas. En este caso, a diferencia de la regresión lineal donde se modela una recta, en la regresión logística el modelo corresponde a una función exponencial, de tipo Logit, donde se calcula la probabilidad de que la variable de respuesta adopte el valor del evento modelado, en función del valor que presentan las variables independientes. El supuesto básico del método es que la probabilidad de la variable dependiente toma el valor de 1 (respuesta positiva) y sigue la curva logística, por lo que su valor se puede estimar con la siguiente fórmula:

Donde P es la probabilidad de que la variable dependiente sea 1, X es la variable independiente y B es el parámetro estimado  $B = (b_0, b_1, b_2, b_k)$ . Esta ecuación de tipo exponencial, es transformada en una respuesta lineal mediante una transformación Logit, donde:

$$P = \text{Ln} (P/(1-P))$$

Que toma la forma de la ecuación de regresión lineal ( $Y=b_0+bx$ ), aunque en este caso:

$$\text{Ln} (P/(1-P)) = b_0+b_1*x_1+b_2*x_2+b_3*x_3+b_n*x_n + \text{error}$$

En dicha ecuación  $b_0$  corresponde al intercepto de la línea en el eje Y.  $b_1, b_2, b_3, b_n$ , corresponden al coeficiente asociado a cada variable, que, al estar estandarizado, aporta una idea del peso de la misma en el proceso que se está modelando, en este caso, la probabilidad de ser degradado-deforestado. Dicha probabilidad toma valores entre 0 y 1, lo que permite identificar áreas ya degradadas-deforestadas (Probabilidad de uno), las áreas más amenazadas (probabilidad menor que uno, pero mayor que cero), así como aquellas donde la amenaza es inexistente (cero), aunque suelen priorizarse aquellas zonas donde el valor de P es superior a 0.5.

En este caso el modelo se construyó utilizando el programa Terrset de Idrisi, que toma en consideración los fundamentos conceptuales explicados previamente. El procedimiento también contempló una validación para evaluar la confiabilidad de las predicciones. Esta incluyó la estimación de Pseudo- $R^2$  de McFadden, que indica la bondad de ajuste del modelo. De acuerdo al método, Pseudo- $R^2$  de McFadden tiene un comportamiento distinto al que tendría un coeficiente de  $R^2$  en la regresión lineal convencional. En esta última se esperan valores cercanos a 1 para indicar que hubo buen ajuste, mientras que en Pseudo- $R^2$  se esperan valores bajos porque la variable de respuesta es dicotómica. La literatura reporta como buenos valores de RLO cuando esta es superior a 0.2 (Clark y Hosking, 1986; Wilson, Newton, Echeverría, Weston, & Burgman, 2005).

En el caso de este trabajo, el valor obtenido de Pseudo- $R^2$  de McFadden fue el primer criterio de validación, pero adicionalmente se compararon las predicciones espaciales de áreas deforestadas, con los valores reales de ocurrencia. La comparación se realizó mediante la curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*), que compara los valores de las celdas deforestadas respecto a valores predichos, y observa los intervalos de acierto como criterio de calidad del modelo generado. Para realizar este procedimiento el modelo de regresión logística se construye con una muestra de las áreas deforestadas, de manera que el resultado final, producto del modelo, se contrasta con una muestra de las celdas no incluidas en la construcción del mismo. ROC es un excelente método para probar la validez de un modelo que predice la probabilidad de ocurrencia de un hecho mediante la comparación con los valores reales de ocurrencia. Si su valor se ubica entre 0.97 y 1, el modelo ajusta de forma excelente; tiene muy buen ajuste si se encuentra entre 0.97 y 0.90, presen-

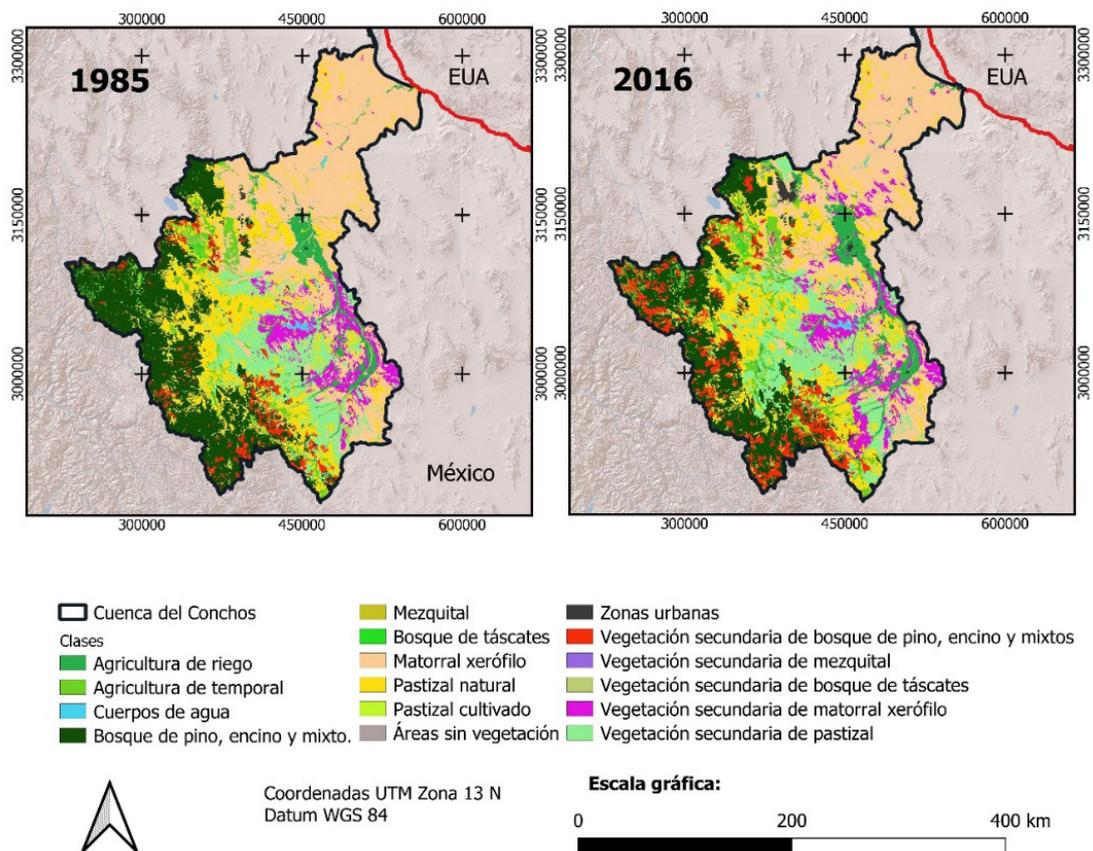
ta buen ajuste si se encuentra entre 0.90 y 0.75, y un ajuste regular si sus valores se ubican entre 0.75 y 0.60 (Hall & Hyndam, 2003; Hall, Hydam & Fan, 2004; Bravo *et al.*, 2017). Para mayores referencias del método se sugiere consultar Eastman (2016).

### 3. Resultados

#### 3.1. Identificación de áreas degradadas-deforestadas entre 1985-2016

La comparación de las cartografías correspondientes a 1985 y 2016 (Figura 2) mediante álgebra de mapas permitió identificar las clases con mayor cambio absoluto (Km<sup>2</sup>) y mayor porcentaje de cambio. Destacan la degradación y deforestación de superficies cubiertas por bosque de pino, encino y mixtos (-27.7 %), los matorrales xerófilos (-12.5 %) y los mezquitales (-8.2 %); mientras que son notables los incrementos de la superficie agrícola (Casi 42 % para la agricultura de temporal y de riego) (Tabla 2).

Figura 2. Usos del suelo y vegetación en la cuenca del río Conchos (1985-2016).



Fuente: elaboración propia con información de INEGI 2001 y 2016

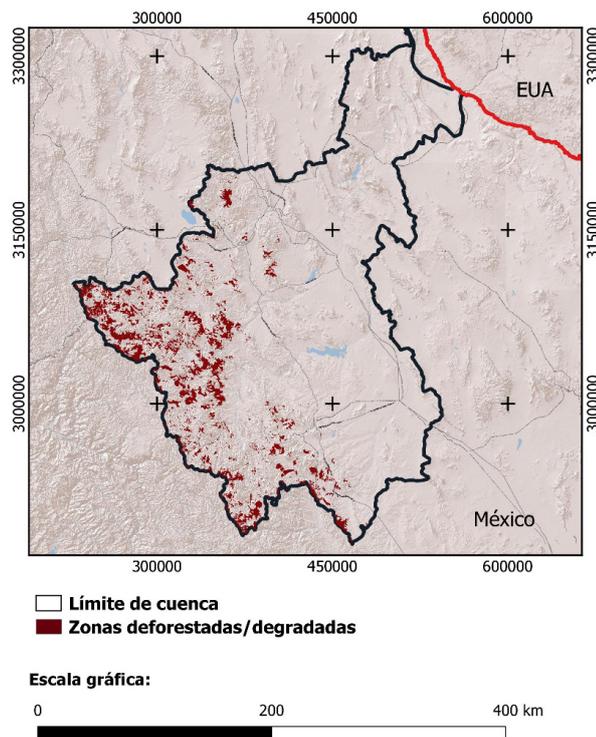
Tabla 2. Cambio total y porcentaje por clase de uso del suelo y vegetación en la cuenca del río Conchos, 1985-2016.

| CLASE                                       | Superficie 1985 km <sup>2</sup> | Superficie 2016 km <sup>2</sup> | Cambio km <sup>2</sup> | Porcentaje de Cambio % |
|---|---------------------------------|---------------------------------|------------------------|------------------------|
| Agricultura de riego                        | 2383.6                          | 3381.1                          | 997.5                  | 41.9                   |
| Agricultura de temporal                     | 2893.1                          | 4103.6                          | 1210.5                 | 41.8                   |
| Cuerpos de agua                             | 294.8                           | 278.4                           | -16.3                  | -5.5                   |
| Bosques de pino, encino y mixtos.           | 15 171.6                        | 10 970.4                        | -4201.2                | -27.7                  |
| Mezquitales                                 | 278.1                           | 255.3                           | -22.8                  | -8.2                   |
| Bosque de táscates                          | 43.5                            | 47.5                            | 4.1                    | 9.4                    |
| Matorrales xerófilos                        | 21 236.1                        | 18 577.8                        | -2658.3                | -12.5                  |
| Pastizal natural                            | 12 390.4                        | 11 973.3                        | -417.1                 | -3.4                   |
| Pastizal cultivado                          | 2.3                             | 34.0                            | 31.7                   | 1370.4                 |
| Áreas sin vegetación                        | 46.1                            | 44.7                            | -1.4                   | -3.1                   |
| Áreas urbanas                               | 54.2                            | 488.1                           | 433.8                  | 800.2                  |
| Veg. Sec. bosques de pino, encino y mixtos. | 2254.1                          | 4757.6                          | 2503.5                 | 111.1                  |
| Veg. Sec. de mezquitales                    | 3.3                             | 75.6                            | 72.3                   | 2189.0                 |
| Veg. Sec. de bosque de táscates             | 37.3                            | 112.2                           | 74.9                   | 200.5                  |
| Veg. Sec. de matorrales xerófilos           | 3771.6                          | 4696.9                          | 925.3                  | 24.5                   |
| Veg. Sec. de pastizales                     | 7095.1                          | 8150.0                          | 1054.8                 | 14.9                   |

Fuente: elaboración propia.

La comparación también permitió identificar aquellas zonas con mayor cambio absoluto, aunque para fines de este trabajo sólo se muestran las zonas con pérdida y degradación de la superficie de bosques (Figura 3). Estas se ubican al sur-suroeste de la cuenca del río Conchos, en regiones montañosas que integran la cabecera de la misma.

Figura 3. Superficie deforestada y degradada de bosque de pinos, encinos y mixtos



Fuente: elaboración propia.

Aquí es importante destacar que no todas las áreas identificadas en figura 3 están completamente deforestadas. En los polígonos se incluyen también áreas de bosque degradado, porque una parte importante de la superficie original de bosque en 1985, aparece como superficie de bosque con vegetación secundaria en 2016. Esto obedece a las características de los patrones de deforestación en la región, que frecuentemente no implican una transición abrupta entre clases, sino una degradación lenta de los parches de bosque derivada de la extracción de madera a tasas que rebasan la capacidad natural de los parches (Bravo *et al.*, 2017). En el caso de las zonas forestales en la cuenca del río Conchos, los autores hemos observado que el bosque original se va transformando gradualmente en áreas cubiertas por bosque con vegetación secundaria (áreas intermitentes de bosque, con parches dispersos de matorrales y pastizales, suelo desnudo, etc.). Se ignora la extensión espacial y frecuencia de esta práctica, pero se relaciona con el tránsito de áreas de bosque en buen estado hacia áreas de bosque degradado o completamente deforestado.

### 3.2. Variables explicativas seleccionadas y construcción de cartografías

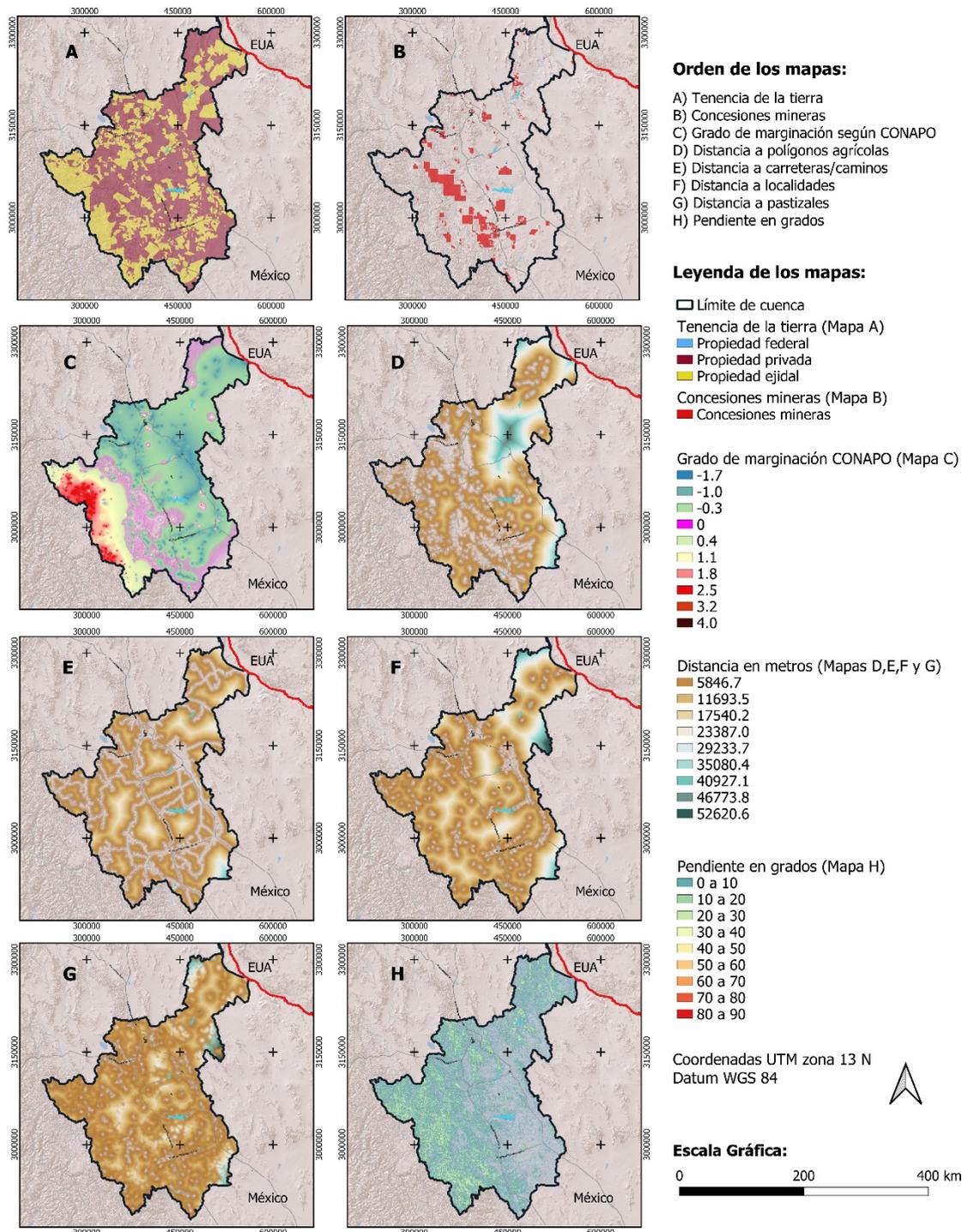
Todas las variables explicativas mencionadas en la sección de métodos se incluyeron en la construcción del modelo, pues en ningún caso se obtuvo un valor de correlación superior a 0.7 (Tabla 3). Esto asegura que no hubo colinealidad entre las variables predictoras, lo cual otorga potencia al método y lo hace más confiable en análisis inferencial (Godínez-Jaimes *et al.*, 2012). La representación espacial de estas variables se indica en la figura 4.

Tabla 3. Valores de correlación entre variables explicativas.

|                                  | Concesiones mineras | Tenencia de la tierra | Marginación | Distancia a polígonos agrícolas | Distancia a carreteras y caminos | Distancia a localidades | Distancia a pastizales | Pendiente |
|----------------------------------|---------------------|-----------------------|-------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------|-----------|
| Concesiones mineras              | 1                   | -0.030                | 0.009       | -0.099                          | 0.056                            | -0.008                  | -0.114                 | 0.023     |
| Tenencia de la Tierra            | -0.030              | 1                     | 0.164       | -0.165                          | -0.179                           | -0.277                  | 0.088                  | 0.025     |
| Marginación                      | 0.009               | 0.164                 | 1           | -0.247                          | 0.072                            | 0.027                   | -0.079                 | 0.317     |
| Distancia a polígonos agrícolas  | -0.099              | -0.165                | -0.247      | 1                               | 0.361                            | 0.401                   | 0.146                  | -0.112    |
| Distancia a carreteras y caminos | 0.056               | -0.179                | 0.072       | 0.361                           | 1                                | 0.625                   | 0.066                  | 0.063     |
| Distancia a localidades          | -0.008              | -0.277                | 0.027       | 0.401                           | 0.625                            | 1                       | 0.071                  | 0.023     |
| Distancia a pastizales           | -0.114              | 0.088                 | -0.079      | 0.146                           | 0.066                            | 0.071                   | 1                      | -0.004    |
| Pendiente                        | 0.023               | 0.025                 | 0.317       | -0.112                          | 0.063                            | 0.023                   | -0.004                 | 1         |

Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Variables explicativas empleadas en el modelo.



Fuente: elaboración propia.

### 3.3. Regresión logística

El modelo de regresión logística se construyó considerando una muestra equivalente a 9.5 % del área total de la cuenca del río Conchos. Dentro de esta muestra, se incluyó una proporción re-

presentativa del total deforestado y no deforestado en toda el área de estudio (Tabla 4). Con estos datos se obtuvo un valor de Pseudo  $R^2$  de 0.2049, que se considera de buen nivel predictivo.

Tabla 4. Datos de la muestra utilizada en la regresión.

| Conceptos de la regresión                              | Cantidad  | Porcentaje |
|--|-----------|------------|
| Número total de observaciones en la Cuenca del Conchos | 8 389 649 | 100        |
| Número de casos negativos (sin deforestación = 0)      | 7 754 249 | 92.43      |
| Número de casos positivos (Con deforestación = 1)      | 635 400   | 7.57       |
| Tamaño de la muestra                                   | 802 190   | 9.56       |
| Número de casos negativos en la muestra (0)            | 741 489   | 92.43      |
| Número de casos positivos en la muestra (1)            | 60 701    | 7.57       |
| Pseudo $R^2$   | 0.2049    |            |
| ROC  | 0.8504    |            |

Fuente: elaboración propia.

En el modelo se identificaron tres variables que se relacionan fuertemente con el proceso de degradación/deforestación de los bosques. En orden de importancia por el valor del coeficiente son: marginación (0.9616), concesiones mineras (0.5683), tenencia de la tierra (ejidos, 0.2078). Otras variables incluidas en el modelo tuvieron un coeficiente menor, pero su valor de significancia inferior a 0.05, indica que también son relevantes para el proceso (Tabla 5).

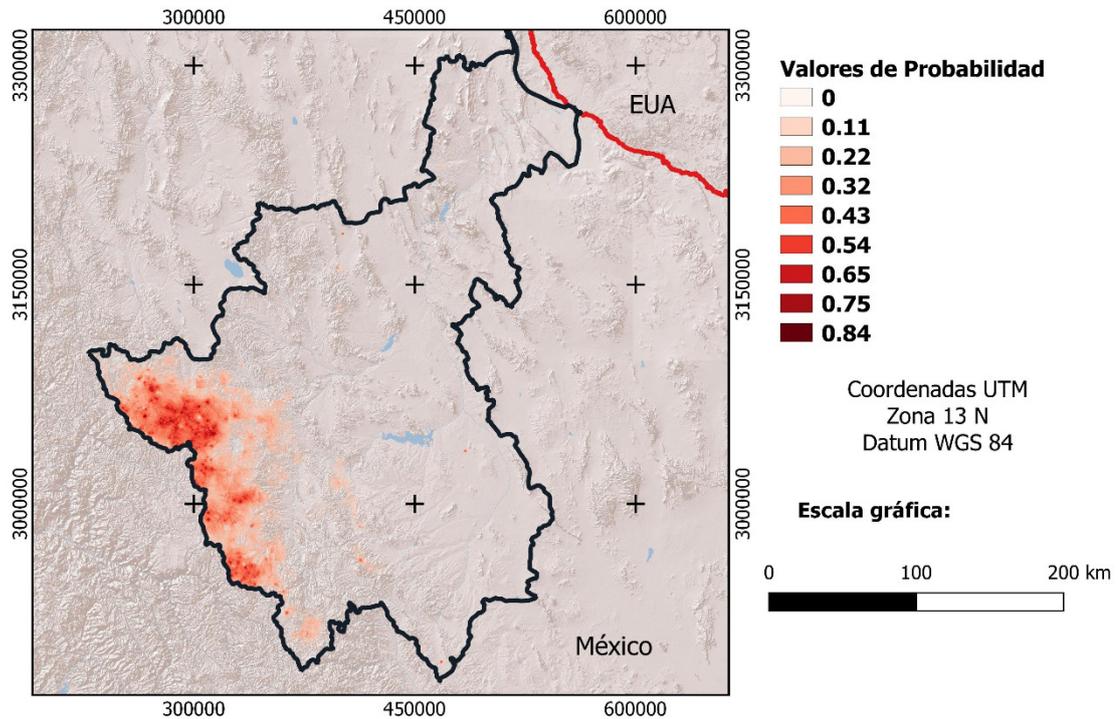
Tabla 5. Coeficientes obtenidos por las variables explicativas.

| Intercepto/Variables            | Coeficiente | Significancia |
|---------------------------------|-------------|---------------|
| Intercepto                      | -3.40       |               |
| Concesiones mineras             | 0.56        | < 0.05        |
| Tenencia de la tierra           | 0.20        | < 0.05        |
| Marginación                     | 0.96        | < 0.05        |
| Distancia a polígonos agrícolas | -6.26E-05   | < 0.05        |
| Distancia a carreteras/caminos  | 6.66E-05    | < 0.05        |
| Distancia a localidades         | -5.40E-05   | < 0.05        |
| Distancia a pastizales          | -3.59E-05   | < 0.05        |
| Pendiente                       | 0.02        | < 0.05        |

Fuente: elaboración propia.

El modelo alcanzó un valor de ROC de 0.85, e identificó 733.43 km<sup>2</sup> de cobertura boscosa en riesgo de ser deforestada y degradada en el futuro. Esta superficie representa el 6.7 % del total de bosque existente actualmente en la cuenca, y se localiza en sitios muy cercanos a la divisoria de aguas, hacia el oeste de la zona de estudio (Figura 5).

Figura 5. Áreas de bosque con probabilidad de ser degradadas-deforestadas.



Fuente: elaboración propia.

#### 4. Discusión de resultados

En este trabajo se identificaron las áreas de bosque de pino, encino y mixto, con mayor probabilidad de ser degradadas-deforestadas en la cuenca del río Conchos (Chihuahua-Durango, México). Los valores de Pseudo  $R^2$  de McFadden y ROC obtenidos (0.204 y 0.85 respectivamente) indican buena capacidad predictiva del modelo y un buen ajuste entre los valores observados y la realidad. Los tres factores que alcanzan mayor peso en la degradación y pérdida de bosque fueron, en orden de importancia, la marginación, las concesiones mineras, la tenencia de la tierra y específicamente la presencia de ejidos. El modelo identifica como más vulnerables aquellas áreas donde coinciden los tres factores, pero no aclara cómo interactúan con el proceso de degradación y pérdida de bosques. Sin embargo, indica que, a mayor coincidencia espacial entre los bosques, la marginación, las concesiones mineras y la propiedad ejidal, habrá una degradación o pérdida más extendida de la masa forestal.

Con base en lo anterior, las áreas más vulnerables a la degradación y deforestación de la cobertura boscosa, se ubican hacia el oeste, básicamente en regiones caracterizadas por su alta marginación, prevalencia de la propiedad ejidal de la tierra, y cercanía de grandes concesiones mineras. Los polígonos de bosque con mayor probabilidad de ser degradados o deforestados se localizan en zonas muy importantes desde el punto eco-hidrológico, pues al ubicarse en la cabecera de la cuenca, determinan procesos regionales de producción hídrica, calidad del agua, escurrimiento hacia las partes bajas, cambios atmosféricos de humedad relativa y consecuente modificación en la regulación del clima local y regional.

Nuestros resultados complementan trabajos previos que han tratado de determinar los cambios de uso del suelo en la cuenca del río Conchos (Rodríguez-Pineda *et al.*, 2017; Bravo-Peña *et al.*, 2020), pero amplían el conocimiento al abordar las relaciones entre estos cambios y los posibles factores causales que les dan origen. Por otro lado, también son resultados parcialmente coincidentes con lo reportado por otros autores que han abordado el estudio de la deforestación en otras regiones de Chihuahua y México. Empezando por la marginación, Bravo-Peña *et al.*, (2017) en su análisis de los mismos procesos en tres municipios del estado que se localizan fuera de la cuenca del río Conchos, encontraron también una fuerte asociación entre este factor y la pérdida o degradación del bosque de pino. También se encontró una relación parecida al estudiar la pérdida del bosque tropical seco en el estado de Guerrero (Osorio *et al.*, 2015). En este último caso, los autores reportan pérdidas mayores de bosque en aquellas zonas que coinciden espacialmente con altos valores de marginación.

No está claro cuál es el papel de la pobreza en la pérdida y degradación de los bosques. Estudios comparativos muestran que la relación entre pobreza y degradación o deforestación de la cobertura boscosa puede seguir comportamientos diferenciados dependiendo de la región geográfica (Cheng *et al.*, 2017), lo que sugiere que factores adicionales condicionan el vínculo existente entre pobreza y pérdida de bosque. Por otro lado, en zonas caracterizadas por la pobreza de la población rural se han reportado cambios de uso del suelo orientados a elevar los ingresos que se obtienen de la tierra, como la conversión de bosques en áreas agrícolas o ganaderas (Miyamoto, 2020), o la extracción de leña para la fabricación de carbón o el consumo doméstico (Nagothu, 2001; Zulu & Richardson, 2013); lo que revela que la pobreza puede incentivar la elección de alternativas de sobrevivencia que resuelven problemas en lo inmediato, pero que conducen con el tiempo a mayor deterioro ambiental, y probablemente a mayor pobreza. Variables exógenas como el precio de cultivos, o mercados no regulados para productos forestales, condicionan este tipo de decisiones.

Por lo que se refiere al papel de la minería en el proceso de pérdida de bosques, otros autores han demostrado como el desarrollo de esta actividad contribuye inequívocamente a la deforestación. Es el caso de la pérdida de bosques en la India, donde la superficie deforestada fue sustancialmente mayor en distritos mineros respecto a zonas donde la minería estuvo ausente, con tasas de deforestación mayores cuando la explotación se concentra en ciertos minerales (Ranjan, 2019). Dicho hallazgo es consistente con lo que ocurre en otras regiones del mundo, como la cuenca del Amazonas, donde la extracción de oro ha contribuido sustancialmente a la pérdida de bosques (Galbraith & Kalamandeen, 2020), observándose relaciones positivas entre las tasas de deforestación y el precio que alcanza este mineral en el mercado (Flores & Einer, 2017).

En México, la minería ha jugado un papel importante en los procesos de degradación ambiental desde los tiempos del virreinato español (Studnicki-Gizbert & Schecter, 2010), pero se carece de un seguimiento sistemático de sus impactos sobre la cobertura vegetal y los usos del suelo. Al año 2021 se han concesionado 964,000 hectáreas para extracción de minerales en México<sup>1</sup>, pero no hay evaluaciones que permitan sustentar el rol que juega esta actividad en la pérdida de bosques en todo el país. La minería a tajo abierto involucra remover la vegetación de la zona donde se ubica el proyecto minero, y este proceso se acompaña de una manifestación de impacto ambiental (MIA) que menciona los impactos de dicha actividad sobre el medio biótico. Las MIA's son de consulta pública, pero su información no se ha integrado en una estadística nacional que lleve

1. Gobierno Federal Mexicano (2021). Estadística de Títulos Concesionados para la Actividad Minera. [http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi\\_apps/WFServlet?IBIF\\_ex=D2\\_ENERGIA05\\_02&IBIC\\_user=dgeia\\_mce&IBIC\\_pass=dgeia\\_mce&NOMBREANIO=\\*](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D2_ENERGIA05_02&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREANIO=*)

el registro de las hectáreas deforestadas. Frente a este vacío, nuestros resultados contribuyen a documentar un proceso que parece muy importante en la cuenca del río Conchos, y que quizás también es muy importante en todo el país.

Los resultados del modelo también indican que la tenencia de la tierra, y específicamente la propiedad ejidal parece vincularse con la degradación y pérdida del bosque; aunque por su naturaleza cuantitativa, no clarifican la naturaleza de ese vínculo. Con este hallazgo, nuestro trabajo da continuidad a otros trabajos en México que también han abordado las relaciones entre tenencia de la tierra y deforestación. Por lo menos desde hace unos 25 años, estudios previos en el país han tratado de identificar el papel de esta variable en la pérdida de la cubierta vegetal, y al igual que en el caso de la relación entre pobreza y deforestación, los resultados no son concluyentes (Bonilla-Moheno *et al.*, 2013). Algunos autores han documentado como la dotación de tierras ejidales favoreció la pérdida de superficie forestal (Cortina-Villar *et al.*, 1999), mientras que otros señalaron a factores institucionales, económicos o de política pública, como los verdaderos causantes del problema (Reyes-Hernández *et al.*, 2006). No hay claridad al respecto, pero en nuestra zona de estudio los datos sugieren una relación estadísticamente significativa entre propiedad ejidal y deforestación.

Cabe destacar que nuestros datos no demuestran un vínculo causal inalterable entre el régimen de propiedad ejidal y la degradación o pérdida del bosque, pero si permiten suponer posibles factores subyacentes que afectan a los ejidos y que propician un proceso más marcado de pérdida de la cubierta vegetal que en el resto de las formas de propiedad. Son hallazgos que contrastan con los casos de éxito documentados en otras regiones de México, donde algunos ejidos hacen un manejo forestal más sustentable de la cubierta forestal (Ceballos, 2020).

La propiedad ejidal en el área de estudio generalmente recae en población de origen Tarahumara, un grupo indígena que se caracteriza por formas de relación con la naturaleza que tienden a preservar los bosques (Quintana-Silveyra, 2020). Sería de esperarse que en sus ejidos y tierras de uso común la deforestación tuviera menor gravedad que en los terrenos bajo otra forma de propiedad, pero se trata de territorios que enfrentan múltiples formas de despojo por la población mestiza, para apropiarse de sus tierras, bosques y aguas (Martínez, 2019). También existen reportes periodísticos de la incursión del narcotráfico en la tala ilegal de madera (El Universal, 2017)<sup>2</sup>, pero se ignora la localización y el alcance espacial de esta práctica. Se desconoce si los propietarios ejidales son más vulnerables a estas incursiones que los propietarios privados, por lo que deben aplicarse técnicas de investigación social en el campo para clarificar el rol verdadero de grupos externos y de la tenencia de la tierra en este proceso de degradación y deforestación del bosque. Sin embargo, es una línea de trabajo que escapa a los alcances de este manuscrito, y debe desarrollarse en trabajos posteriores por científicos sociales vinculados con el tema.

Además de los factores anteriores, existen otros factores involucrados en la pérdida del bosque que no fueron incluidos en esta evaluación. Prácticas como la extracción de leña para utilizarse como combustible en las comunidades (Nagothu, 2001), incendios forestales que ocurren por causas naturales o humanas (Dos Reis *et al.*, 2021), sobrepastoreo ganadero (Hao *et al.*, 2018), o incluso cambios en el clima regional (Van Rompaey, 1995; Elhag & Walker, 2009); son factores que favorecen procesos de degradación o pérdida de cubierta vegetal cuya importancia se ha comprobado en otras áreas del mundo y en México también. Son factores que impactan en la pérdida de masas forestales, pero también en la pérdida de otras formas de biodiversidad im-

2. <https://interactivo.eluniversal.com.mx/2017/bosque-del-narco/>.

portantes para el funcionamiento del ecosistema, por lo que también merecen incluirse en una modelación. Sin embargo, a pesar de su importancia, actualmente resultan difíciles de cartografiar en la cuenca del río Conchos. Hay gran incertidumbre en los datos, o sus registros carecen de calidad y consistencia espacial como para incluirlos en una modelación a escala de toda la cuenca. Si se incluyen, la cuenca tendría que dividirse en sub-regiones o sub-cuencas, con el riesgo de dificultar la comparabilidad de los hallazgos en unidades distintas.

Aunque este ejercicio de modelación se puede y debe mejorar, provee resultados valiosos que ayudan a identificar zonas vulnerables a la deforestación y degradación de la masa forestal. Se han generado datos que permiten identificar las relaciones existentes entre un conjunto de factores socioeconómicos y naturales y los procesos locales de degradación- pérdida de los bosques en la cuenca del río Conchos. La técnica de regresión logística permitió cumplir con el objetivo general del trabajo, pero existen otras metodologías de predicción de áreas vulnerables a deforestación que también pudieran ensayarse. Técnicas como la evaluación multicriterio, de autómatas celulares con cadenas de Markov, incluyendo el uso de módulos y programas geomáticos como Terrset Modeler (Idrisi) o Dinámica Ego han mostrado su utilidad en la modelación predictiva de cambios de uso del suelo, de coberturas naturales a áreas antropizadas, de urbanizaciones, etc. (Ávalos-Jiménez *et al.*, 2019; Mas *et al.*, 2011).

Cada uno de los procedimientos y modelos a elegir tiene sus propios supuestos y condiciones de incertidumbre, pero en este trabajo se eligió la técnica de regresión logística por su simplicidad conceptual y su probada utilidad para predecir cambios de uso del suelo en zonas sujetas a procesos de deforestación (Nahib & Suryanta, 2017; Gayen & Saha, 2018; Buya *et al.*, 2020). Ensayos posteriores deben realizarse para evaluar y mejorar los resultados de este primer acercamiento, orientados a precisar cada vez con más claridad qué importancia tienen las posibles variables explicativas de la pérdida y degradación de las masas forestales en esta región del país.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se identificaron mediante la técnica de regresión logística las áreas de bosque de pino-encino y mixto, con mayor probabilidad de ser degradadas-deforestadas en la cuenca del río Conchos (Chihuahua-Durango, México). El modelo obtenido tuvo buena capacidad predictiva y sus valores obtuvieron un alto ajuste con los valores observados de degradación-deforestación de la cubierta forestal.

Las variables explicativas con mayor peso específico en este proceso de degradación y deforestación del bosque fueron, en orden descendente: marginación, concesiones mineras y tenencia de la tierra; identificando como más vulnerables aquellas áreas donde coinciden los tres factores. Estas superficies acumulan 733.43 km<sup>2</sup> en riesgo de ser degradadas y deforestadas en el futuro, y se localizan hacia el oeste de la cuenca, en zonas muy cercanas al parteaguas.

Los resultados son útiles para prevenir la pérdida y degradación de los bosques de pino-encino y mixtos en la cuenca del río Conchos, y facilitan el manejo ambiental de la misma. Aunque las zonas en riesgo se encuentran cercanas al parteaguas, los impactos de su degradación seguramente podrán percibirse aguas abajo, particularmente en actividades desarrolladas en los distritos de riego que dependen de las presas La Boquilla, Francisco I. Madero, y Luis L. León, donde se almacena el agua generada en las montañas para su posterior uso agrícola, industrial o de consumo

humano. Por esta razón, aunque los cambios de uso del suelo y de la masa forestal ocurran en las partes altas, la sustentabilidad de la cuenca se ve comprometida.

Además de su utilidad, nuestro ejercicio constituye un ensayo inédito en esta región del país. Son escasos los trabajos nacionales que han abordado el tema de la deforestación, y en la literatura académica casi no se reportan estudios para el norte de México. En ese sentido, aunque los resultados pueden enriquecerse con otras variables predictoras, o el ejercicio puede intentarse con otros procedimientos, nuestros hallazgos constituyen una primera aproximación para entender el proceso de degradación y deforestación de la cubierta de bosques en la cuenca del río Conchos y sus factores causales.

La cuenca del río Conchos tiene gran importancia geoestratégica, pues el agua que produce contribuye en buena medida a tratados binacionales entre México y los Estados Unidos de Norteamérica, y la conservación de su cubierta vegetal debe ser prioritaria para ambos países, sobre todo considerando los pronósticos del cambio climático para esta región del continente (mayores y más severas sequías). Por otro lado, aunque se trata de un modelo esencialmente cuantitativo, se aportan elementos para el diseño de hipótesis que deben probarse mediante trabajo de carácter etnográfico y cualitativo. Entrevistas en profundidad, observación participante, y otras técnicas de investigación social, pueden complementar nuestros resultados, y ayudar a identificar las relaciones subyacentes entre estos factores y la pérdida o degradación de la masa forestal en esta cuenca del norte de México.

## Contribución de autorías

Los autores han contribuido por igual en la redacción de este artículo.

## Bibliografía

- Adiaffi, B., Marlin, C., Oga, Y. M. S., Massault, M., Noret, A., & Biemi, J. (2009). Palaeoclimatic and deforestation effect on the coastal fresh groundwater resources of SE Ivory Coast from isotopic and chemical evidence. *Journal of Hydrology*, 369(1), 130-141. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.046>
- Armenteras, D., Espelta, J. M., Rodríguez, N., & Retana, J. (2017). Deforestation dynamics and drivers in different forest types in Latin America: Three decades of studies (1980–2010). *Global Environmental Change*, 46, 139-147. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.09.002>
- Arreguín-Cortés, F., López-Pérez, M., Velázquez-Mireles, C., & López-Corzo, R. (2013). Análisis de sequías en el marco del Tratado sobre Aguas Internacionales de 1944. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(1), 117-148. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222013000100006&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000100006&lng=es&tlng=es)
- Ávalos-Jiménez, A. A., Gómez-Delgado, M., Aguilera-Benavente, F., & Flores-Vilchez, F. (2019). Simulación del crecimiento urbano de la zona metropolitana Tepic-Xalisco, México. *Estudios Geográficos*, 80(287), e021-e021. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201938.018>
- Barbier, E. B., & Burgess, J. C. (1996). Economic analysis of deforestation in Mexico [MPRA Paper]. <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/12089/>
- Bastidas-Orrego, L. M., Ramírez-Valverde, B., Cesín-Vargas, A., Juárez-Sánchez, J. P., Martínez-Carrera, D., Vaquera-Huerta, H., Bastidas-Orrego, L. M., Ramírez-Valverde, B., Cesín-Vargas, A., Juárez-Sánchez, J. P., Martínez-Carrera, D., & Vaquera-Huerta, H. (2018). Conflictos socioambientales y minería a cielo abierto en la Sierra Norte de Puebla, México. *Textual: análisis del medio rural latinoamericano*, 72, 35-65. <https://doi.org/10.5154/r.textual.2017.72.003>
- Bravo-Peña, L. C., Torres-Olave, M. E., Alatorre-Cejudo, L. C., Castellanos-Villegas, A. E., Moreno-Murrieta, R. L. M., Granados-Olivas, A., Uc-Campos, M., Gónzales-León, M. O., & Wiebe-Quintana, L. C. (2017). Áreas probables de degradación-deforestación de la cubierta vegetal en Chihuahua, México. Una exploración mediante

- regresión logística para el período 1985-2013. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 0(20), 109-137. <https://doi.org/10.21138/GF.545>
- Bravo-Peña, L. C., Gómez-Reyes, V. M., Moreno-Murrieta, R. L., Alatorre-Cejudo, L. C., Torres-Olave, M. E., Granados-Olivas, A., & Hernández-Fuentes, H. A. (2020). Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuviscar-Sacramento (Chihuahua, México). *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 0(26), 69-91. <https://doi.org/10.21138/GF.669>
  - Bonilla-Moheno, D. J. R. M., T. Mitchell Aide, Matthew L. Clark, & H. Ricardo Grau. (2013). Vegetation change and land tenure in Mexico: A country-wide analysis. *Land Use Policy*, 30, 355-364.
  - Buya, S., Tongkumchum, P., & Owusu, B. E. (2020). Modelling of land-use change in Thailand using binary logistic regression and multinomial logistic regression. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(12), 437. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05451-2>
  - Ceballos, P. S. (2020). Impacto territorial del manejo forestal comunitario en la Sierra Norte de Puebla, 2003-2017. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 17. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr17.itmf>
  - Cheng, S. H., Ahlroth, S., Onder, S., Shyamsundar, P., Garside, R., Kristjanson, P., McKinnon, M. C., & Miller, D. C. (2017). What is the evidence for the contribution of forests to poverty alleviation? A systematic map protocol. *Environmental Evidence*, 6(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s13750-017-0088-9>
  - Clark, W.A., and P.L. Hosking, (1986). *Statistical Methods for Geographers*. New York, John Wiley & Sons.
  - CNA (1988). *Cuencas Hidrológicas a escala 1:250,000*. Comisión Nacional del Agua. Recuperado de/Retrieved from <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
  - CONAPO (2010). *Grado de Marginación por Localidad*. Consejo Nacional de Población.
  - Recuperado de/Retrieved from <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
  - Cortina-Villar, S., Macario-Mendoza, P., & Ogneva-Himmelberger, Y. (1999). Cambios en el uso del suelo y deforestación en el sur de los estados de Campeche y Quintana Roo, México. *Investigaciones geográficas*, 38, 41-56.
  - Diario Oficial de la Federación. (2020, diciembre 31). Programa Nacional Forestal 2020-2024. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado de/Retrieved from [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5609275&fecha=31/12/2020](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609275&fecha=31/12/2020)
  - Dos Reis, M., Graça, P. M. L. de A., Yanai, A. M., Ramos, C. J. P., & Fearnside, P. M. (2021). Forest fires and deforestation in the central Amazon: Effects of landscape and climate on spatial and temporal dynamics. *Journal of Environmental Management*, 288, 112310. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112310>
  - Eastman, J. R. (2016). *Terrset Geospatial Monitoring and Modeling System (Clark Labs Manual)* (2016.a ed., Vol. 1). Clark University.
  - Eguiguren, P., Fischer, R., & Günter, S. (2019). Degradation of Ecosystem Services and Deforestation in Landscapes With and Without Incentive-Based Forest Conservation in the Ecuadorian Amazon. *Forests*, 10(5), 442. <https://doi.org/10.3390/f10050442>
  - Elhag, M., & Walker, S. (2009). Impact of climate variability on vegetative cover in the Butana area of Sudan. *African Journal of Ecology*, 47, 11-16. <https://doi.org/Article>
  - El Universal (2017). El Bosque del Narco. *Diario El Universal*. Recuperado 8 de diciembre de 2021, de <http://interactivo.eluniversal.com.mx/2017/bosque-del-narco/>
  - FAO. (2020). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020: Principales resultados*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado de/Retrieved from <http://www.fao.org/3/CA8753ES/CA8753ES.pdf>
  - Flores, R., & Einer, J. (2017). *Estimación de la variabilidad espacial y temporal de la deforestación por minería aurífera aluvial en la Quebrada Guacamayo, utilizando el método de segmentación por umbrales a partir de imágenes de satélite*. Repositorio de Tesis - UNMSM. Recuperado de/Retrieved from <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/7367>
  - Galbraith, D., & Kalamandeen, M. (2020). Gold mining leaves deforested Amazon land barren for years, find scientists. *The Conversation*. Recuperado de/Retrieved from <http://theconversation.com/gold-mining-leaves-deforested-amazon-land-barren-for-years-find-scientists-141639>
  - Gayen, A., & Saha, S. (2018). Deforestation probable area predicted by logistic regression in Pathro river basin: A tributary of Ajay river. *Spatial Information Research*, 26(1), 1-9. <https://doi.org/10.1007/s41324-017-0151-1>

- Gobierno Federal Mexicano (2021). *Estadística de Títulos Concesionados para la Actividad Minera*. Recuperado de [http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi\\_apps/WFServlet?IBIF\\_ex=D2\\_ENERGIA05\\_02&IBIC\\_user=dgeia\\_mce&IBIC\\_pass=dgeia\\_mce&NOMBREANIO=\\*](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D2_ENERGIA05_02&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREANIO=*)
- Godínez-Jaimes, F., Ramírez-Valverde, G., Reyes-Carreto, R., Ariza-Hernandez, F. J., & Barrera-Rodriguez, E. (2012). La colinealidad y la separación en los datos en el modelo de regresión logística. *Agrociencia*, 46(4), 411-425.
- González-Villela, R., Montero-Martínez, M. J., & Santana-Sepúlveda, J. S. (2017). *Repercusiones del Cambio Climático en el Caudal Ecológico del río Conchos*. En *En La cuenca del río conchos: Una mirada desde las ciencias ante el cambio climático*. (pp. 109-156). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Recuperado de/Retrieved from [https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros\\_html/rio-conchos/files/assets/common/downloads/publication.pdf](https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/rio-conchos/files/assets/common/downloads/publication.pdf)
- Hall, P. G. & Hyndman, R. J. (2003). An Improved Method for Bandwidth Selection When Estimating ROC Curves. *Statistics and Probability Letters* 64(2), 181-189.
- Hall, P. G., Hyndman, R. J. & Fan, Y. (2004). Nonparametric Confidence Interval for Receiver Operating Characteristic Curve. *Biometrika*, 91(3), 743-750.
- Hao, L., Pan, C., Fang, D., Zhang, X., Zhou, D., Liu, P., Liu, Y., & Sun, G. (2018). Quantifying the effects of overgrazing on mountainous watershed vegetation dynamics under a changing climate. *Science of The Total Environment*, 639, 1408-1420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.224>
- Horton, A. J., Nygren, A., Diaz-Perera, M. A., & Kumm, M. (2021). Flood severity along the Usumacinta River, Mexico: Identifying the anthropogenic signature of tropical forest conversion. *Journal of Hydrology X*, 10, 100072. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2020.100072>
- Hu, X., Naess, J. S., Jordan, C. M., Huang, B., Zhao, W., & Cherubini, F. (2021). Recent global land cover dynamics and implications for soil erosion and carbon losses from deforestation. *Anthropocene*, 34, 100291. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2021.100291>
- Humphreys, D., & Sauls, L. (2019). Evaluación y alcance de la relación de las industrias extractivas y la infraestructura con la deforestación: México. *Climate and land use alliance*. Recuperado de/Retrieved from <http://www.climateandlandusealliance.org/wp-content/uploads/2020/03/EII-Mexico-Report-ES-FINAL.pdf>
- INEGI. (2001). *Carta de uso de suelo y vegetación escala 1:250 000, serie I. Datos en formato vectorial generados por CETENAL para las ortofotos e imágenes de 1985*. Aguascalientes, Aguascalientes. Recuperado de/Retrieved from <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- INEGI. (2016). *Carta de uso de suelo y vegetación escala 1:250 000, serie VI. Datos en formato vectorial generados por INEGI para las imágenes de 2016*. Aguascalientes, Aguascalientes. Recuperado de/Retrieved from <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- INEGI. (2013). *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0*. Aguas Calientes, México. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Recuperado de/Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI. (2015). *Guía para la interpretación de cartografía de Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250000, Serie V*. Aguas Calientes, México. INEGI.
- Kelly, M. (2001). *El río Conchos: Un informe Preliminar*. Texas Policy Center. Recuperado de/Retrieved from <http://www.texascenter.org/publications/spaconchos.pdf>
- Lebgue, K. T., Quintana, M.G., y R. Soto, C. (2015): *Pinos y Encinos de Chihuahua*. Chihuahua, México. Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Martínez, E. (2019). Tala clandestina, azote de Sierra Tarahumara. *El Heraldo de Chihuahua* | Noticias Locales, Políticas, de México, Chihuahua y El Mundo. Recuperado de/Retrieved from <https://www.elheraldodechihuahua.com.mx/local/noroeste/tala-clandestina-azote-de-sierra-tarahumara-4021368.html>
- Mas, J.-F., Kolb, M., Houet, T., Paegelow, M., & Camacho Olmedo, M. T. (2011). Una comparación de programas de modelación de cambios de cobertura/ uso del suelo. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.5801 . <https://digibug.ugr.es/handle/10481/29653>
- Mertens, B., & E. Lambin. (1997). Spatial modelling of deforestation in southern Cameroon. Spatial disaggregation of diverse deforestation processes. *Applied Geography*, 17, 143-162.
- Miyamoto, M. (2020). Poverty reduction saves forests sustainably: Lessons for deforestation policies. *World Development*, 127, 104746. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104746>

- Monjardín-Armenta, S. A., Pacheco-Angulo, C. E., Plata-Rocha, W., & Corrales-Barraza, G. (2017). La deforestación y sus factores causales en el estado de Sinaloa, México. *Madera y bosques*, 23(1), 7-22. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2311482>
- Morales-Barquero, L., Borrego, A., Skutsch, M., Kleinn, C., & Healey, J. R. (2015). Identification and quantification of drivers of forest degradation in tropical dry forests: A case study in Western Mexico. *Land Use Policy*, 49, 296-309. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.07.006>
- Nagothu, U. S. (2001). Fuelwood and fodder extraction and deforestation: Mainstream views in India discussed on the basis of data from the semi-arid region of Rajasthan. *Geoforum*, 32(3), 319-332. [https://doi.org/10.1016/S0016-7185\(00\)00034-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7185(00)00034-8)
- Nahib, I., & Suryanta, J. (2017). Forest cover dynamics analysis and prediction modelling using logistic regression model (case study: Forest cover at Indragiri Hulu Regency, Riau Province). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 54, 012044. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/54/1/012044>
- Núñez-López, D., Muñoz-Robles, C. A., Reyes-Gómez, V. M., Velasco-Velasco, I., & Gadsden-Esparza, H. (2007). Characterization of drought at different time scales in Chihuahua, México. *Agrociencia*, 41(3), 253-262.
- Osorio, L. P., Mas, J.-F., Guerra, F., Maass, M., Osorio, L. P., Mas, J.-F., Guerra, F., & Maass, M. (2015). Análisis y modelación de los procesos de deforestación: Un caso de estudio en la cuenca del río Coyuquilla, Guerrero, México. *Investigaciones geográficas*, 88, 60-74. <https://doi.org/10.14350/rig.43853>
- Pineda-Jaimés, N. B., Bosque-Sendra, J., Gómez-Delgado, M., & Plata-Rocha, 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.
- Pontius, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101, 251-268.
- Porrás-Carrillo, E. (1999). La Sierra Tarahumara de Chihuahua (México): Una región multiétnica y pluricultural. *Scripta Nova Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 51(45). Recuperado de/Retrieved from <http://www.ub.edu/geocrit/sn-45-51.htm>
- Quintana-Silveyra, V. (2020). El despojo sin fin a los pueblos de la sierra tarahumara. *Diario La Jornada*. Recuperado de/Retrieved from <https://www.jornada.com.mx/2020/11/21/delcampo/articulos/despojo-tarahumara.html>
- RAN (2021). *Sistema de Información Geoespacial del Catastro Rural*. Recuperado de/Retrieved from <https://sig.ran.gob.mx/sigKML.php>
- Ranjan, R. (2019). Assessing the impact of mining on deforestation in India. *Resources Policy*, 60, 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.11.022>
- Reyes-Gómez V.M., Díaz S., Brito-Castillo L. & Nuñez-López D. 2013. ENSO/drought effects and their impact in the ecology and economy of the state of Chihuahua, Mexico. pp.101-117, In Yañez A., Dávalos-Sotelo R., Day J.W. & Reyes E. (Edits.), *Ecological dimensions for sustainable socio economic development*. WIT Press, Ashurst Lodge, Ashurst, Southampton, SO40 7AA, UK.
- Reyes-Hernández, H., Aguilar, R. M., Aguirre, R. J. R. y Trejo, V. I. (2006). Cambios en la cubierta vegetal y uso de suelo en el área del proyecto Pujal-Coy, San Luis Potosí, México, 1973-2000. *Investigaciones Geográficas*. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. (59): 26-42
- Rocha, F. (2005). *Programa de Manejo Integral de la Cuenca del río Conchos*. Grupo Interinstitucional de Trabajo-Gobierno del Estado de Chihuahua. Recuperado de/Retrieved from [https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2009/05/07\\_fernando\\_rocha.pdf](https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2009/05/07_fernando_rocha.pdf)
- Rodríguez-Pineda, J. A., Carreón, E., Lafon, A., Santos, J., & Ruiz, R. (2017). *Cambio de uso de suelo en la cuenca del río Conchos, Chihuahua, México*. En *La cuenca del río conchos: Una mirada desde las ciencias ante el cambio climático*. (pp. 157-204). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Recuperado de/Retrieved from [https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros\\_html/rio-conchos/files/assets/common/downloads/publication.pdf](https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/rio-conchos/files/assets/common/downloads/publication.pdf)
- Rosete-Vergés, F. A., Pérez-Damián, J. L., Villalobos-Delgado, M., Navarro-Salas, E. N., Salinas-Chávez, E., & Remond-Noa, R. (2014). El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y bosques*, 20(1), 21-35.
- Serra, P., Pons, X., & Saurí, D. (2008). Land-cover and land-use change in a Mediterranean landscape: A spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors. *Applied Geography*, 28(3), 189-209. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.02.001>
- SGM (2017). *Cartografía de Concesiones Mineras en el Territorio Nacional*. Servicio Geológico Mexicano. Recuperado de/Retrieved from [http://www.datos.economia.gob.mx/RegulacionMinera/Cartografia\\_Minera.7z](http://www.datos.economia.gob.mx/RegulacionMinera/Cartografia_Minera.7z)

- Studnicki-Gizbert, D., & Schecter, D. (2010). The Environmental Dynamics of a Colonial Fuel-Rush: Silver Mining and Deforestation in New Spain, 1522 to 1810. *Environmental History*, 15(1), 94-119. <https://doi.org/10.1093/envhis/emq007>
- Torres-Rojo, J. M., Magaña-Torres, O. S., Moreno-Sánchez, F., Torres-Rojo, J. M., Magaña-Torres, O. S., & Moreno-Sánchez, F. (2016). Predicción del cambio de uso/cobertura arbolada en México a través de probabilidades de transición. *Agrociencia*, 50(6), 769-785.
- UACJ. (2019). *Programa Estatal de Cambio Climático: Chihuahua 2019*. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez-Gobierno del Estado de Chihuahua. Recuperado de/Retrieved from <http://lanti.uacj.mx/PECC/web/multimedia/PECC%204%20jun.pdf>
- Van Rompaey, R. S. A. R. (1995). *Climate change and deforestation in West Africa: A space-time trend analysis of rainfall series from Côte d'Ivoire and Liberia*. En S. Zwerver, R. S. A. R. van Rompaey, M. T. J. Kok, & M. M. Berk (Eds.), *Studies in Environmental Science* (Vol. 65, pp. 417-420). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-1116\(06\)80231-1](https://doi.org/10.1016/S0166-1116(06)80231-1)
- Wilson, K., Newton, A., Echeverría, C., Weston, C., & Burgman, M. (2005). A vulnerability analysis of the temperate forests of south central Chile. *Biological Conservation*. 122(1), 9–21.
- Zulu, L. C., & Richardson, R. B. (2013). Charcoal, livelihoods, and poverty reduction: Evidence from sub-Saharan Africa. *Energy for Sustainable Development*, 17(2), 127-137. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2012.07.007>