

Regional analysis of the change factors in the oak (*Quercus* sp.) forest cover in the Tehuacán-Cuicatlán region, Mexico

Análisis regional de los factores del cambio de cobertura del bosque de encino (*Quercus* sp.) en la región Tehuacán-Cuicatlán, México

Laura Paulina Osorio-Olvera*; Arturo García-Romero; Stéphane André Couturier; Francisco Guerra-Martínez

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía. Circuito de la Investigación Científica, Cd. Universitaria. C. P. 04510. Alcaldía de Coyoacán, Ciudad de México, México.

*Corresponding author: lauraosorio1302@gmail.com; tel.: +52 (55) 56230222 ext. 45461

Abstract

Introduction: Oak (*Quercus* sp.) forests are scarcely represented in Mexico's Protected Natural Areas, and are highly susceptible to deforestation.

Objective: To assess the regional dynamics of deforestation and recovery, as well as the factors of change in land cover and use (CLCU) in the oak forest of the Tehuacán-Cuicatlán Region (TCR) which includes the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve (TCBR) polygon and its zone of influence.

Materials and methods: The dynamics of the CLCU was analyzed in two periods; these were before (1979-2001) and after (2001-2011) the TCBR decree issuing. The analysis of the factors consisted of two stages: logistic regression analysis from the spatial interpolation of the factors, and analysis of the municipal socioeconomic trends based on change rates.

Results and discussion: The oak forest was deforested prior to the TCBR decree, with a -0.97 % annual change rate. Deforestation was associated with low-slope areas, close to localities with a larger male population. In contrast, in the post-decree period its recovery stood out (0.22 %), which was associated with high-slope and high-elevation areas and a decrease in the male population.

Conclusion: The TCBR decree must not be thought as the main cause of change in the CLCU processes; however, an indirect influence from it should be accepted.

Keywords: Land use/cover; Protected Natural Area; deforestation; recovery; geostatistics.

Resumen

Introducción: Los bosques de encino (*Quercus* sp.) están representados escasamente en las Áreas Naturales Protegidas de México y son sumamente vulnerables a la deforestación.

Objetivo: Evaluar la dinámica regional de la deforestación y la recuperación, así como los factores del cambio de cobertura y uso del suelo (CCUS) en el bosque de encino de la Región Tehuacán-Cuicatlán (RTC) que incluye el polígono de la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán (RBTC) y su zona de influencia.

Materiales y métodos: La dinámica de CCUS se analizó en dos periodos; uno previo a la declaración de la RBTC (1979-2001) y otro posterior (2001-2011). El análisis de los factores consistió en dos etapas: análisis de regresión logística a partir de la interpolación espacial de los factores, y análisis de las tendencias socioeconómicas municipales a partir de las tasas de cambio.

Resultados y discusión: El bosque de encino se deforestó previo al decreto de la RBTC, con una tasa anual de cambio de -0.97 %. La deforestación estuvo asociada a áreas de baja pendiente, cercanas a localidades y con presencia de mayor población masculina. En contraste, en el periodo posterior resaltó su recuperación (0.22 %), la cual estuvo asociada con áreas de pendiente y altitud elevadas, y disminución de la población masculina.

Conclusión: El decreto de la RBTC no debe considerarse la causa principal del cambio en los procesos de CCUS; sin embargo, debe aceptarse una injerencia indirecta.

Palabras clave: Cobertura y uso del suelo; Área Natural Protegida; deforestación; recuperación; geoestadística.

Introduction

Protected Natural Areas (PNA) have been considered as a tool for the conservation of ecosystems, their related ecological processes and their derived environmental services (Chape, Harrison, Spalding, & Lysenko, 2005; Pretty & Smith, 2004). Over the past century and to date, the area of protected land in the world has increased considerably; it shifted from 0.7 % in 1979 to 12.7 % in 2003, and 14.7 % in 2016 (Chape, Blyth, Fish, Fox, & Spalding, 2003; International Union for Conservation of Nature [IUCN], 2016). One of the main types of PNAs are the Biosphere Reserves (BR), which have distinguished themselves by promoting the well-being and development of communities in harmony with the conservation of biological diversity and ecosystem integrity (Ervin, 2003). In this sense, Mexico is among the leading countries as it has 44 BRs, which together cover an area of 777 615 km² (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [CONANP], 2019). However, due to social and environmental pressures affecting PNAs and, in particular those falling on BRs, these reserves face processes such as deforestation, invasion of exotic species, and forest fires (Figuroa, Sánchez-Cordero, Illoldi-Rangel, & Linaje, 2011; Pérez-Vega et al., 2016). In the deforestation scenario, the process of change in land cover and use (CLCU) is one of the main threats to biodiversity conservation (Figuroa, Sánchez-Cordero, Meave, & Trejo, 2009).

A case of particular interest is that of the oak (*Quercus* sp.) forests. These forests constitute one of the most important groups of woody plants in the northern hemisphere (Valencia, 2004), and are recognized for their ecological and economic importance worldwide (Martínez-Cruz, Téllez, & Ibarra-Manríquez, 2009; Olvera-Vargas & Figuroa-Rangel, 2012; Villaseñor, 2004). Mexico is among the nations with the highest diversity of *Quercus* species and it is estimated that 68 % of oaks in the Americas (161 species) are found only in this country (Arizaga, Cruz, Cabrales, & González, 2009). Moreover, in Mexico, these forests are distributed in a small area (2.9 to 5.5 % of the country's total area; Rzedowski, 2006), which corresponds to a low percentage of the land set aside for conservation in Mexico (3.77 % [457 067 ha]; Bezaury-Creel & Gutiérrez, 2009), so it can be said that these ecosystems are extremely vulnerable to deforestation.

To address this situation, it is recommended to identify the threats and factors affecting ecosystems (Ervin, 2003), based on the differentiation between biophysical and socioeconomic factors involved in the processes of deforestation and vegetation recovery (Crk, Uriarte, Corsi, & Flynn, 2009; Galicia, Zarcón-Arista, Mendoza-Robles, Palacio-Prieto, & García-Romero, 2008; Geist & Lambin, 2002; Guerra-Martínez,

Introducción

Las Áreas Naturales Protegidas (ANP) han sido consideradas como un instrumento para la conservación de los ecosistemas, de los procesos ecológicos asociados y de los servicios ambientales derivados (Chape, Harrison, Spalding, & Lysenko, 2005; Pretty & Smith, 2004). Durante el siglo pasado y lo que va del presente, la superficie protegida en el mundo aumentó considerablemente al pasar de 0.7 % en 1979, a 12.7 % en 2003 y 14.7 % en 2016 (Chape, Blyth, Fish, Fox, & Spalding, 2003; Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza [IUCN], 2016). Uno de los principales tipos de ANP son las Reservas de la Biosfera (RB), las cuales se han distinguido por impulsar el bienestar y el desarrollo de las comunidades en armonía con la conservación de la diversidad biológica y la integridad de los ecosistemas (Ervin, 2003). En este sentido, México se encuentra entre los países más avanzados al contar con 44 RB que cubren una extensión de 777 615 km² (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [CONANP], 2019). No obstante, debido a las presiones sociales y ambientales que afectan a las ANP y, en particular, a las que recaen sobre las RB, las reservas enfrentan procesos como la deforestación, la invasión de especies exóticas y los incendios forestales (Figuroa, Sánchez-Cordero, Illoldi-Rangel, & Linaje, 2011; Pérez-Vega et al., 2016). En el escenario de la deforestación, el proceso de cambio de cobertura y uso del suelo (CCUS) es una de las principales amenazas para la conservación de la biodiversidad (Figuroa, Sánchez-Cordero, Meave, & Trejo, 2009).

Un caso que reviste especial interés es el de los bosques de encino (*Quercus* sp.). Estos bosques constituyen uno de los grupos de plantas leñosas más importantes del hemisferio norte (Valencia, 2004), siendo reconocidos por su importancia ecológica y económica a nivel mundial (Martínez-Cruz, Téllez, & Ibarra-Manríquez, 2009; Olvera-Vargas & Figuroa-Rangel, 2012; Villaseñor, 2004). México se ubica entre las naciones que sostienen la mayor diversidad de especies de *Quercus* y se calcula que 68 % de los encinos del continente americano (161 especies) únicamente se encuentran en el país (Arizaga, Cruz, Cabrales, & González, 2009). Además, en México, estos bosques se distribuyen en una superficie pequeña (2.9 al 5.5 %; Rzedowski, 2006), la cual corresponde a un porcentaje mínimo destinado a la conservación (3.77 % [457 067 ha]; Bezaury-Creel & Gutiérrez, 2009), por lo que se puede afirmar que dichos ecosistemas son sumamente vulnerables a la deforestación.

Para atender tal situación, se recomienda el reconocimiento de las amenazas y factores que inciden sobre los ecosistemas (Ervin, 2003), a partir de la diferenciación entre los factores biofísicos y socioeconómicos que intervienen en los procesos de deforestación y recuperación de la vegetación (Crk,

García-Romero, Cruz-Mendoza, & Osorio-Olvera, 2019; Mas, Osorio, Guerra, & Maass, 2015). Deforestation is the removal of forest cover to less than 10 % of the original cover (Food and Agriculture Organization [FAO], 2002), and recovery is the re-growth of forests after a disturbance (Chazdon, 2014).

The aim of this study was to evaluate the regional dynamics of deforestation and recovery, as well as the factors of the CLCU in the oak forest in the Tehuacán-Cuicatlán region, both in the reserve's polygon and in its zone of influence. The dynamics of the CLCU was analyzed in two periods: one prior to the official declaration of the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve (1979-2001) and one after it (2001-2011).

Materials and methods

Study area

This study was conducted in an area herein called the "Tehuacán-Cuicatlán Region" (TCR), located between the states of Puebla and Oaxaca, in south-central Mexico (Figure 1). This region includes an internal zone corresponding to the polygon of the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve (TCBR) that covers an area of 4910 km², and its zone of influence which covers 6274 km²; together they cover 20 municipalities of the state of Puebla and 31 of the state of Oaxaca. The geological, cultural, historical and landscape richness in the region is noteworthy; also, it has a high biological diversity that includes 10 to 15 % of Mexico's flora species, out of which 365 (13.5 %) are endemic (Dávila et al., 2002). The oak forests are distributed in 21 % of the TCR area (National Institute of Statistics and Geography [INEGI], 2015), mainly in the Oaxaca portion of the *Sierra Madre del Sur*. This area corresponds to a minority portion of the original distribution area, with agriculture, livestock grazing, the opening of roads, and firewood extraction being the main causes of deforestation (Dávila et al., 2002; Ortíz-García et al., 2012).

Preparation of land cover/use maps

The cartographic information on land cover and use was obtained from INEGI's land use and vegetation map series I (1979), series III (2002) and series V (2011), scale 1:250 000 (INEGI, 2001, 2008, 2015). INEGI's land use and vegetation classification system has 24 categories that were regrouped into six classes: oak forest, induced grassland, irrigated agriculture, rainfed agriculture, human settlements and other types of vegetation (Figure 1). The original maps were corrected by visual classification of 1995 aerial photographs at 1:80 000 scale, a 2003 QuickBird satellite image with 0.5 m spatial resolution from Google Earth platform, and a 2011 SPOT satellite image with 10 m spatial

Uriarte, Corsi, & Flynn, 2009; Galicia, Zarco-Arista, Mendoza-Robles, Palacio-Prieto, & García-Romero, 2008; Geist & Lambin, 2002; Guerra-Martínez, García-Romero, Cruz-Mendoza, & Osorio-Olvera, 2019; Mas, Osorio, Guerra, & Maass, 2015). La deforestación es la eliminación de la cobertura forestal hasta alcanzar un nivel menor del 10 % de la cobertura original (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2002), mientras que la recuperación se refiere al recrecimiento del bosque después de una perturbación (Chazdon, 2014).

El objetivo de este estudio fue evaluar la dinámica regional de la deforestación y la recuperación, así como los factores del CCUS en el bosque de encino de la región Tehuacán-Cuicatlán, tanto en el polígono de la reserva como en su zona de influencia. La dinámica del CCUS se analizó en dos periodos: uno previo a la declaración oficial de la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán (1979-2001) y otro posterior (2001-2011).

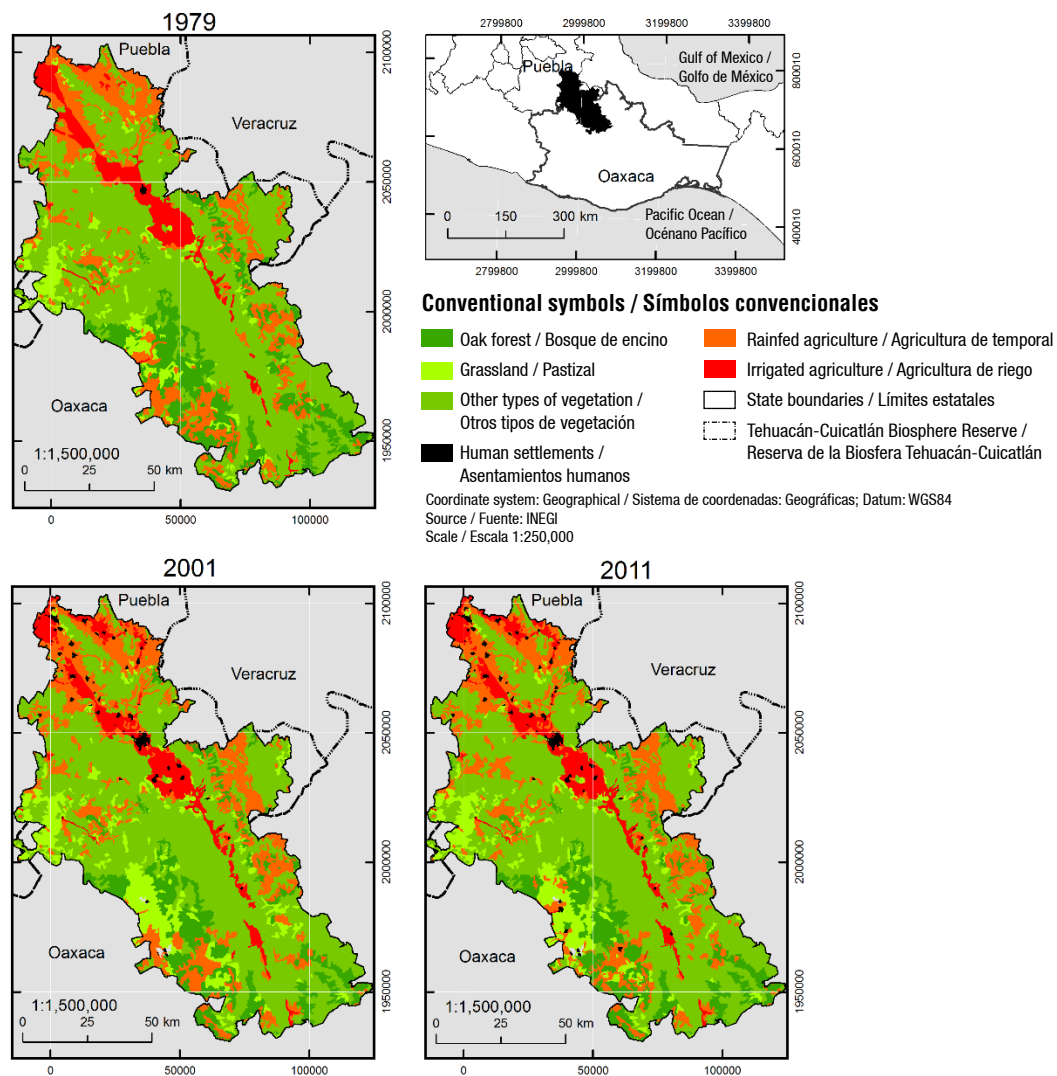
Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se desarrolló en un área denominada en este trabajo como "Región Tehuacán-Cuicatlán" (RTC), ubicada entre los estados de Puebla y Oaxaca en el centro-sur de México (Figura 1). La región incluye una zona interna correspondiente al polígono de la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán (RBTC) que cubre una superficie de 4910 km² y su zona de influencia con una extensión de 6274 km²; en conjunto abarcan 20 municipios del estado de Puebla y 31 del estado de Oaxaca. La riqueza geológica, cultural, histórica y paisajística en la región es notable y posee una alta diversidad biológica que comprende 10 a 15 % de las especies de la flora mexicana, de las cuales 365 especies (13.5 %) son endémicas (Dávila et al., 2002). Los bosques de encino se distribuyen en 21 % de la superficie de la RTC (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2015), principalmente en la porción de la Sierra Madre del Sur de Oaxaca. Esta superficie corresponde a una porción minoritaria del área de distribución original, siendo la agricultura, el pastoreo de ganado, la apertura de caminos y la extracción de leña, las principales causas de la deforestación (Dávila et al., 2002; Ortíz-García et al., 2012).

Elaboración de mapas de cobertura y uso del suelo

La información cartográfica sobre la cobertura y uso del suelo se obtuvo de los mapas de uso del suelo y vegetación del INEGI serie I (1979), serie III (2002) y serie V (2011), escala 1: 250 000 (INEGI, 2001, 2008, 2015). El sistema de clasificación de uso del suelo y vegetación del INEGI cuenta con 24 categorías que fueron reagrupadas en seis



**Figure 1. Study area location, and cover/use maps adjusted based on INEGI's series I, III, and V (1979, 2001 and 2011).
 Figura 1. Ubicación del área de estudio y mapas de coberturas y usos del suelo corregidos a partir de las series I, III, y V de INEGI (1979, 2001 y 2011).**

resolution. The correction was made to resolve errors due to the low resolution of the mapping and classification inconsistencies between the study dates. The interpretations were supported by a digital elevation model to identify the altitudinal distribution of the oak forest.

Dynamics of land cover and use change

The mapping overlap of land cover/use maps was made for 1979, 2001 and 2011, and the change rates among classes were calculated. The results interpretation centered on analyzing the processes of deforestation and recovery of the oak forest cover (Pontius, Shusas, & McEachern, 2004) in the period before the TCBR decree was issued (1979-2001) and the post-decree period (2001-2011). Annual change rates were obtained using the following formula (FAO, 1995):

clases: bosque de encino, pastizal inducido, agricultura de riego, agricultura de temporal, asentamientos humanos y otros tipos de vegetación (Figura 1). Los mapas originales se corrigieron mediante clasificación visual de fotografías aéreas a escala 1:80 000 de 1995, una imagen de satélite QuickBird con resolución espacial de 0.5 m del 2003 de la plataforma Google Earth y una imagen satelital SPOT con resolución espacial de 10 m del 2011. La corrección se hizo para resolver los fallos debidos a la baja resolución de la cartografía y a las inconsistencias de clasificación entre las fechas de estudio. Las interpretaciones se apoyaron en un modelo digital de elevación para identificar la distribución altitudinal del bosque de encino.

Dinámica de cambio de cobertura y uso del suelo

Se hizo la sobreposición cartográfica de los mapas de cobertura y uso del suelo de 1979, 2001 y 2011, y

$$\delta = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^{\frac{1}{n}} - 1$$

where,

δ = annual change rate

S_1 = area on date 1

S_2 = area on date 2

n = difference, in years, between the two dates.

Analysis of regional factors promoting deforestation and recovery of the oak forest

The study of the CLCU biophysical and socio-economic factors consisted of two stages. In the first stage of analysis, two biophysical variables obtained from the digital elevation model were considered, and various locality-level socioeconomic variables that were obtained from the 2000 and 2010 Population and Housing Censuses (INEGI, 2000, 2011) and from the 2000 and 2010 National Council for the Evaluation of Social Development Policy (Consejo Nacional de Población [CONAPO], 2000, 2010) (Table 1).

The transformation of socioeconomic variables from point format to aerial format was made with the IDW (Inverse Distance Weighting) method, which interpolates, through weighting, the data points that occur within a neighborhood; the points sampled closest to the unsampled point are more similar than those furthest away (Farfán, Mas, & Osorio, 2012).

se calcularon las tasas de cambio entre las clases. La interpretación de resultados se enfocó en el análisis de los procesos de deforestación y recuperación de la cobertura de bosque de encino (Pontius, Shusas, & McEachern, 2004) en el periodo anterior (1979-2001) y posterior (2001-2011) a la fecha del decreto de la RBTC. Las tasas anuales de cambio se obtuvieron con la fórmula siguiente (FAO, 1995):

$$\delta = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^{\frac{1}{n}} - 1$$

donde,

δ = tasa anual de cambio

S_1 = superficie en la fecha 1

S_2 = superficie en la fecha 2

n = diferencia de años entre ambas fechas.

Análisis de factores regionales que promueven la deforestación y recuperación del bosque de encino

El estudio de los factores biofísicos y socioeconómicos del CCUS consistió en dos etapas. En la primera etapa de análisis se consideraron dos variables biofísicas obtenidas del modelo digital de elevación, además de diversas variables socioeconómicas a nivel de localidad que se obtuvieron de los Censos de Población y Vivienda 2000 y 2010 (INEGI, 2000, 2011) y del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social 2000 y 2010 (Consejo Nacional de Población [CONAPO], 2000, 2010) (Cuadro 1).

Table 1. Biophysical and socioeconomic variables considered in the first stage of analysis to explain the deforestation and recovery of the oak (*Quercus sp.*) forest in the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, in the 1979-2001 and 2001-2011 periods.

Cuadro 1. Variables biofísicas y socioeconómicas consideradas en la primera etapa de análisis para explicar la deforestación y la recuperación del bosque de encino (*Quercus sp.*) en los periodos 1979-2001 y 2001-2011 en la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán.

	Variable	Indicator/Indicador
Biophysical/ Biofísicas	Elevation/Altitud Slope/Pendiente	Terrain suitability/Aptitud del terreno
Socioeconomic/ Socioeconómicas	Euclidean distance to localities/ Distancia euclidiana a localidades	Accessibility to vegetation/ Accesibilidad a la vegetación
	Total population density/ Densidad de la población total	Demographic pressure/Presión demográfica
	Male population percentage/ Porcentaje de la población masculina	Migration/ Migración
	Percentage of population over 5 years that speaks an indigenous language/ Porcentaje de la población mayor de 5 años que habla lengua indígena	Level of rootedness/ Nivel de arraigo
	Marginalization index/ Índice de marginación	Marginalization/ Marginación

To focus the analysis on the regional factors affecting the deforestation and recovery processes, a 5 km buffer was generated from the range of the oak forest, and a grid with 6300 equidistant points at 1000 m was established inside the buffer. Data were collected by cartographic overlapping of the spatial variables and obtaining information from each point. In this way, binary information (change/no change) was obtained for the analyzed periods. The relationship between biophysical and socio-economic factors with respect to oak forest deforestation and recovery was evaluated using generalized linear models (GLM) with a logit function. The resulting models were evaluated using the Akaike Information Criterion (AIC), and those with the lowest value were selected. This criterion incorporates the balance between bias and variance in the factors added to the model and provides a direct comparison between them (Burnham, Anderson, & Huyvaert, 2011).

In the second stage, historical trends of socioeconomic variables at the municipal level were analyzed (Table 2). The variables were obtained from the Population and Housing Censuses of 1970, 1980, 1990, 2000 and 2010 (INEGI, 1970, 1980, 1990, 2000, 2011), the open-access data of the Ministry of the Interior for the municipal level (Secretaría de Gobernación [SEGOB], 2018), the municipal agriculture census of 1991, and the agricultural-livestock and forestry census of 2007 (INEGI, 1991, 2007). Trends were validated with a linear regression for each analysis period (1979-2001 and 2001-2011), where dependent variables were the change rates (deforestation/recovery) of the 39 municipalities with oak forest distribution in the TCR, whereas independent variables were selected from municipal-level data.

La transformación de las variables socioeconómicas de formato puntual a formato areal se hizo con el método IDW (Inverse Distance Weighting), el cual interpola, mediante ponderación, los puntos de datos que ocurren dentro de un vecindario; los puntos muestreados más próximos al punto no muestreado son más similares que los más alejados (Farfán, Mas, & Osorio, 2012).

Para enfocar el análisis de los factores regionales que inciden en los procesos de deforestación y recuperación, se generó un *buffer* de 5 km a partir del área de distribución del bosque de encino, y al interior del *buffer* se estableció una cuadrícula con 6300 puntos equidistantes en 1000 m. Los datos se colectaron mediante la sobreposición cartográfica de las variables espaciales y la extracción de información de cada punto. De esta manera, se obtuvo información binaria (cambio/no cambio) para los periodos analizados. La relación de los factores biofísicos y socioeconómicos con respecto a la deforestación y la recuperación del bosque de encino se evaluó mediante modelos lineales generalizados (MLG) con una función *logit*. Los modelos resultantes se evaluaron mediante el criterio de información Akaike (AIC, Akaike Information Criterion), y se seleccionaron los de menor valor. Este criterio incorpora el equilibrio entre el sesgo y la varianza en los factores añadidos en el modelo y provee una comparación directa entre ellos (Burnham, Anderson, & Huyvaert, 2011)

En la segunda etapa se analizaron las tendencias históricas de variables socioeconómicas a nivel municipal (Cuadro 2). Las variables se obtuvieron de los Censos de Población y Vivienda de los años 1970, 1980, 1990, 2000 y 2010 (INEGI, 1970, 1980, 1990, 2000, 2011) de los datos abiertos de la Secretaría de Gobernación a nivel municipal (Secretaría de Gobernación [SEGOB],

Table 2. Municipal socioeconomic variables included in the second stage of analysis to explain the deforestation and recovery of the oak (*Quercus* sp.) forest in the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, in the 1979-2001 and 2001-2011 periods.

Cuadro 2. Variables socioeconómicas a nivel municipal consideradas en la segunda etapa de análisis para explicar la deforestación y la recuperación del bosque de encino (*Quercus* sp.) en los periodos 1979-2001 y 2001-2011 en la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán.

Variable	Indicator / Indicador
Total population / Población total	Human capital / Capital humano
Male population / Población masculina	Human capital / Capital humano
Migration index / Índice de migración	Migration / Migración
Primary, secondary and tertiary sectors / Sectores económicos primario, secundario y terciario	Economics / Economía
Planted area / Superficie sembrada	Farming-livestock activities / Actividades agropecuarias
Number of livestock head / Cantidad de cabezas de ganado	Farming-livestock activities / Actividades agropecuarias

Results and discussion

Forest cover regional dynamics in the Tehuacán-Cuicatlán Region

The regional dynamics of oak forest cover in the TCR showed differences between the periods before and after the TCBR decree. Thus, while in the pre-decree period (1979-2001) the forest cover decreased from 25 % to 19 % of the total TCR area, in the post-decree period (2001-2011) the forest cover increased slightly to 19.7 % (Figure 2). These results reflect that forest biomes and, in particular, oak forests, within or outside conservation schemes, are subject to deterioration processes that cause the transformation of ecosystems (Figuroa et al., 2011). In the particular case of the TCR, the results reveal the importance of evaluating the factors associated with deforestation and recovery, since the success of conservation objectives depends on maintaining native vegetation cover. Therefore, this study comprised a comprehensive analysis of TCR regional dynamics, and an analysis of biophysical and socio-economic factors associated with deforestation and recovery, based on two main sources of information.

2018) y del censo agrícola municipal del año 1991 y del censo agrícola-ganadero y forestal del año 2007 (INEGI, 1991, 2007). Las tendencias se validaron con una regresión lineal para cada periodo de análisis (1979-2001 y 2001-2011), donde las variables dependientes fueron las tasas de cambio (deforestación/recuperación) de los 39 municipios de distribución del bosque de encino en la RTC; mientras que las variables independientes se seleccionaron a partir de los datos a nivel municipal.

Resultados y discusión

Dinámica regional de cambio de cobertura en la Región Tehuacán-Cuicatlán

La dinámica regional de la cobertura del bosque de encino en la RTC mostró diferencias entre los periodos previo y posterior al decreto de la RBTC. Así, mientras que en el periodo previo (1979-2001) la cobertura se redujo de 25 % a 19 % de la superficie total de la RTC, en el periodo posterior (2001-2011) la cobertura incrementó ligeramente a 19.7 % (Figura 2). Estos resultados reflejan que los biomas boscosos y, en particular, los bosques de encino, dentro o fuera de

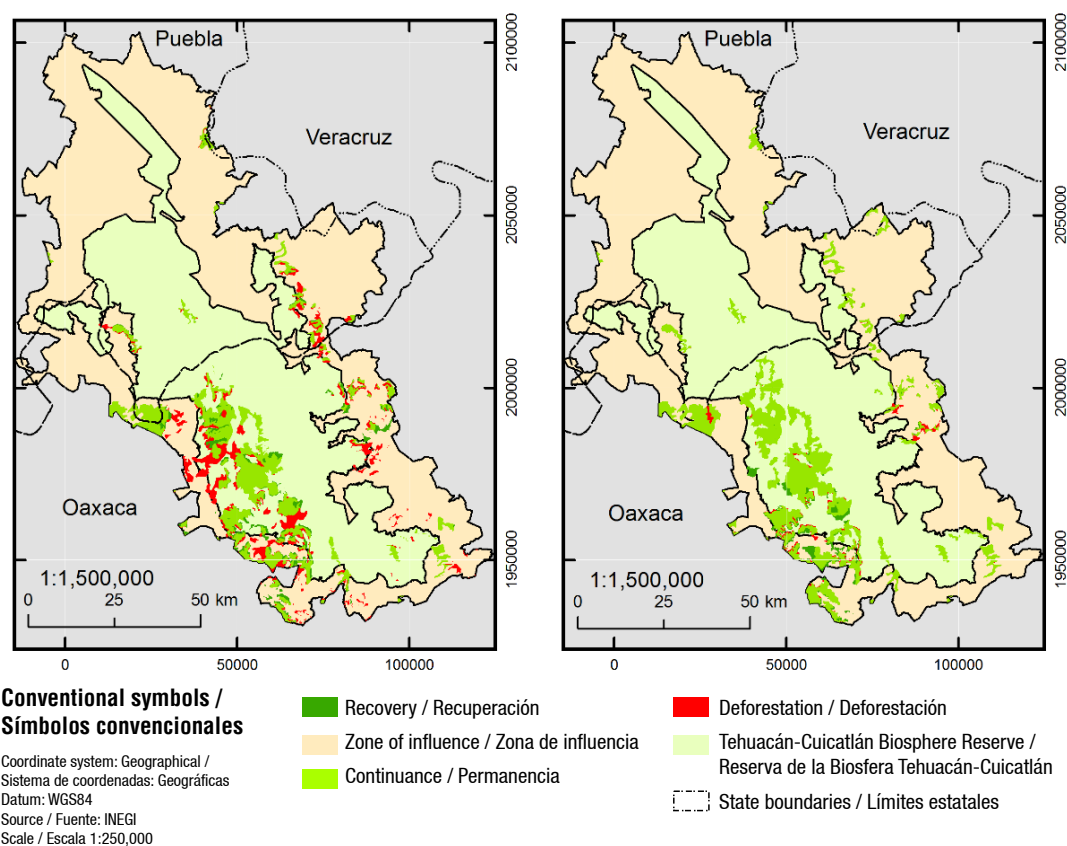


Figure 2. Distribution of the deforestation and recovery processes in the oak (*Quercus* sp.) forest in the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve (TCBR) and its zone of influence, in the 1976-2001 and 2001-2011 periods.

Figura 2. Distribución de los procesos de deforestación y recuperación del bosque de encino (*Quercus* sp.) en la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán (RBTC) y su zona de influencia en los periodos 1976-2001 y 2001-2011.

In the period prior to the TCBR decree (1979-2001), the annual change rates of the oak forest were -0.94 % in the TCR and -0.97 % in the TCBR reflecting intense deforestation and cover loss, even greater than those in the zone of influence, where the change rate was -0.86 %. These rates show a higher loss than those reported in official data (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), & Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, 2003), which indicate a rate of -0.37 % for the 1986-1996 period and of 0.007 % for the 1992-2001 period, considering all types of vegetation in the TCBR; likewise, the values are higher than those reported by Figueroa et al. (2011), who indicate a deforestation rate of -0.13 % for the 1993-2001 period. Although it is true that the use of different methodologies, information sources (satellite images and aerial photographs), analysis periods and vegetation types can explain the variation among those study results, there is a consensus in recognizing that changes in the TCR cover had a negative balance in the last decades of the last century.

A different situation arose in the period after the decree, when the transformation rate of the oak forest recovered in the TCBR (0.22) and was even equal to zero in the zone of influence. Although the deforestation and recovery processes respond to multiple biophysical and socioeconomic factors, such a decrease in the change rates is related over time to the reduction of productive activities, mainly from rainfed agriculture and grazing in induced grasslands (Table 3). This could be interpreted as a positive impact on the TCBR in terms of containing deforestation, while alerting us about the need to address the issue from its relationship with processes at the local level (land and resource rights of populations) to reconcile conservation and the use of degraded ecosystems.

esquemas de conservación, se encuentran sujetos a procesos de deterioro que provocan la transformación de los ecosistemas (Figueroa et al., 2011). En el caso particular de la RTC, los resultados revelan la importancia de evaluar los factores asociados a la deforestación y la recuperación, ya que el éxito de los objetivos de conservación depende del mantenimiento de la cobertura de la vegetación nativa. Por lo tanto, el presente estudio comprendió un análisis integral de la dinámica regional de la RTC y el análisis de los factores biofísicos y socioeconómicos asociados a la deforestación y la recuperación, a partir de dos fuentes principales de información.

En el periodo previo al decreto de la RBTC (1979-2001), las tasas anuales de cambio del bosque de encino fueron de -0.94 % en la RTC y -0.97 % en la RBTC, reflejando intensa deforestación y pérdida de cobertura, incluso mayor que en la zona de influencia, donde la tasa de cambio fue de -0.86 %. Estas tasas muestran mayor pérdida que la reportada en datos oficiales (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [CONANP] & Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza, 2003), los cuales señalan una tasa de -0.37 % para el periodo 1986-1996 y de 0.007 % para el periodo 1992-2001, considerando todos los tipos de vegetación en la RBTC; asimismo, los valores son mayores que los reportados en el estudio de Figueroa et al. (2011), quienes señalan una tasa de deforestación de -0.13 % para el periodo 1993-2001. Si bien es cierto que el uso de metodologías, fuentes de información (imágenes satelitales y fotografías aéreas), periodos de análisis y tipos de vegetación distintos pueden explicar la variación de los resultados en los estudios, existe consenso al admitir que los cambios de cobertura en la RTC tuvieron balance negativo en las últimas décadas del siglo pasado.

Table 3. Annual change rates (%) in land cover and use in the Tehuacán-Cuicatlán Region (TCR), the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve (TCBR) and the zone of influence in the reserve's pre-decree (period 1: 1979-2011) and post-decree periods (period 2: 2001-2011).

Cuadro 3. Tasas anuales (%) de cambio de cobertura y uso del suelo en la Región Tehuacán-Cuicatlán (RTC), la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán (RBTC) y la zona de influencia en el periodo anterior (periodo 1: 1979-2011) y posterior (periodo 2: 2001-2011) al decreto de la reserva.

TCBR Sub-zone/ Subzona RBTC	Oak forest/ Bosque de encino		Irrigated agriculture/ Agricultura de riego		Rainfed agriculture/ Agricultura de temporal		Induced grasslands/ Pastizal inducido		Human settlements/ Asentamientos humanos	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Period/Periodo	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
TCR/RTC	-0.94	0.15	0.27	0.08	0.13	0.14	2.00	-0.86	12.9	1.3
TCBR/RBTC	-0.97	0.22	0.30	0.03	0.13	0.28	2.16	-0.87	13.0	1.4
Influence zone/ Zona de influencia	-0.86	0	0.20	0.14	0.12	0.04	1.70	-0.80	12.9	1.2

Regional CLCU factors affecting oak forest deforestation and recovery in the TCR

First stage: analysis of biophysical and socio-economic factors

The evaluation of PNAs and their relationship with associated factors is a complex research problem that depends on environmental and socioeconomic factors (Mas, 2005).

The logistic regression models showed that oak forest deforestation in the pre-decree period (1979-2001) was associated with low-elevation, low-slope areas close to localities (Figure 3); i.e., easy-to-access areas vulnerable to resource use (Mas, 2005; Pressey, Whish, Barrett, & Watts, 2002). Likewise, deforestation was associated with high percentages in the male population, who are responsible for agricultural work (Pérez-Vega et al., 2016). The population that speaks an indigenous language has been considered a factor related to ecosystem conservation and reduced deforestation (Brandon, Gorenflo, Rodrigues, & Waller, 2005); however, in this study it was not a relevant factor in containing deforestation or favoring recovery in the two periods analyzed.

On the other hand, the recovery of the oak forest cover in the post-decree period (2001-2011) was associated with low percentages in the male population (Figure 4) and high elevations, suggesting

Una situación diferente se presentó en el periodo posterior al decreto, cuando la tasa de transformación del bosque de encino se recuperó en la RBTC (0.22) e incluso fue de cero en la zona de influencia. Aunque los procesos de deforestación y recuperación responden a múltiples factores biofísicos y socioeconómicos, la citada disminución de las tasas de cambio se relaciona en el tiempo con la reducción de la actividad productiva, principalmente de la agricultura de temporal y del pastoreo en pastizales inducidos (Cuadro 3). Esto podría interpretarse como un impacto positivo en la RBTC para contener la deforestación, al tiempo que nos alerta sobre la necesidad de abordar el tema desde su relación con procesos a nivel local (derechos sobre la tierra y recursos de las poblaciones) para conciliar la conservación y para el aprovechamiento de ecosistemas degradados.

Factores regionales del CCUS que afectan la deforestación y la recuperación del bosque de encino en la RTC

Primera etapa: análisis de factores biofísicos y socioeconómicos

La evaluación de las ANP y su relación con los factores asociados constituye un problema de investigación complejo que depende de factores ambientales y socioeconómicos (Mas, 2005).

Los modelos de regresión logística demostraron que la deforestación del bosque de encino en el periodo

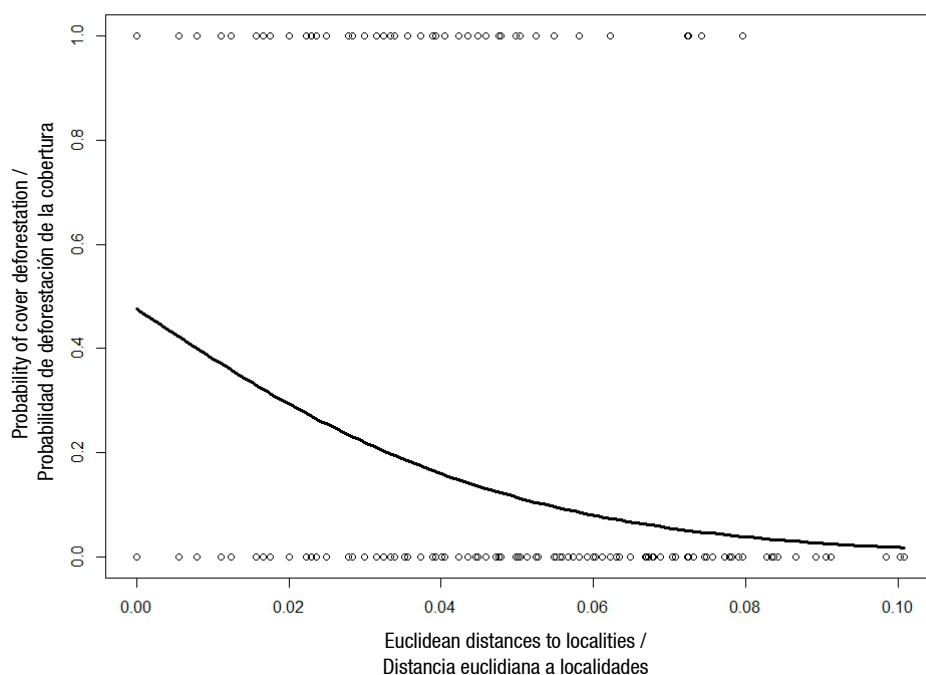


Figure 3. Euclidean distance to localities as a socioeconomic factor promoting oak (*Quercus* sp.) forest deforestation in the zone of influence within the Tehuacán-Cuicatlán Region.

Figura 3. La distancia euclidiana a localidades como factor socioeconómico que promueve la deforestación del bosque de encino (*Quercus* sp.) en la zona de influencia dentro de la Región Tehuacán-Cuicatlán.

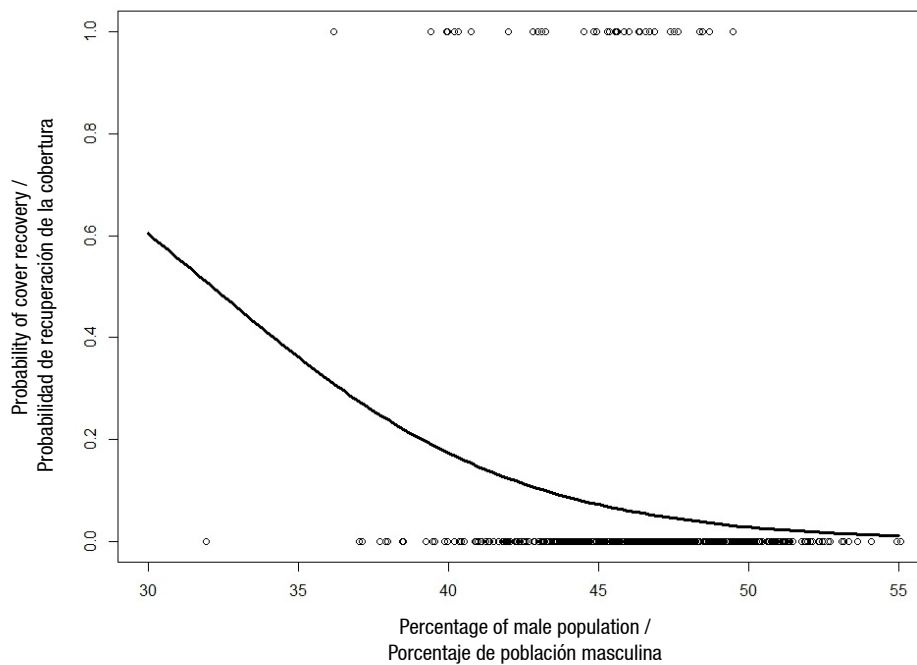


Figure 4. Male population as a factor promoting oak (*Quercus* sp.) forest recovery in the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve.

Figura 4. La población masculina como factor que promueve la recuperación del bosque de encino (*Quercus* sp.) en la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán.

processes of abandonment of agricultural activity with favorable consequences in terms of recovery; this occurred mainly in the higher elevation areas, associated with mountain environments with steep slopes that impose restrictions on accessibility and resource management (Crk et al., 2009). The statistically relevant variables are shown in Table 4.

Second stage: analysis of municipal socioeconomic trends

The growth in demographic factors, such as in population, contribute to an increased demand for natural resources and to deforestation (Figuroa et al., 2009; Geist & Lambin, 2001). This situation is observed in the TCR, although with differences in the TCBR's population behavior with respect to its zone of influence. While in the TCBR there was an increase in population in the 1970-1990 period, with a downward trend in the 1990-2010 period, in the zone of influence there was a downward population trend that remained constant in the 1970-2010 period (Figure 5) (INEGI, 1970, 1980, 1990, 2000, 2011). This is confirmed by the high emigration index that affected the TCR in 2000 (emigration of -6.15) and 2010 (emigration of -12.92) (SEGOB, 2010), indicating a process of intense emigration that has been interpreted as one of the household survival strategies that has had the greatest impact on the abandonment of land and the recovery of vegetation (Aide, Zimmerman, Pascarella, Rivera, & Marcano-Vega, 2000; Galicia et al.,

previo al decreto (1979-2001) estuvo asociada a las áreas de baja altitud y pendiente y cercanas a localidades (Figura 3); es decir, áreas de fácil acceso y vulnerables al aprovechamiento de sus recursos (Mas, 2005; Pressey, Whish, Barrett, & Watts, 2002). Asimismo, la deforestación estuvo asociada a porcentajes elevados de población masculina, quien es la encargada de las labores agropecuarias (Pérez-Vega et al., 2016). La población que habla lengua indígena se ha considerado como un factor relacionado con la conservación de los ecosistemas y la reducción de la deforestación (Brandon, Gorenflo, Rodrigues, & Waller, 2005); no obstante, en este estudio no fue un factor relevante para contener la deforestación o favorecer la recuperación en los dos periodos analizados.

Por otro lado, la recuperación de la cobertura del bosque de encino en el periodo posterior al decreto (2001-2011) estuvo asociada a porcentajes bajos de población masculina (Figura 4) y altitudes elevadas, sugiriendo procesos de abandono de la actividad agrícola con consecuencias favorables en términos de la recuperación; esta ocurrió principalmente en las áreas de mayor altitud, asociadas a entornos de montaña con pendientes elevadas que imponen restricciones de accesibilidad y manejo de recursos (Crk et al., 2009). Las variables estadísticamente relevantes se muestran en el Cuadro 4.

Table 4. Biophysical and socioeconomic variables explaining deforestation and recovery of the oak (*Quercus* sp.) forest in the Tehuacán-Cuicatlán region (Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve [TCBR] and zone of influence).

Cuadro 4. Variables biofísicas y socioeconómicas explicativas de la deforestación y la recuperación del bosque de encino (*Quercus* sp.) en la región Tehuacán-Cuicatlán (Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán [RBTC] y zona de influencia).

Area/Área	Variabes	Estimator/ Estimador	Z-value/ Valor Z	P-value/ Valor P
First period: Deforestation/Primer periodo: Deforestación				
TCBR/RBTC	Intercept/Intercepto	7.183 ± 2.091	3.436	< 0.001
	Slope/Pendiente	-0.024 ± 0.009	-2.535	0.011
	Elevation/Altitud	-0.0009 ± 0.0003	-2.352	0.018
	Euclidean distance to localities/ Distancia euclidiana a localidades	-47.55 ± 6.891	-6.900	< 0.001
	Population density/ Densidad de población	7.628 ± 5.446	1.401	0.161
	Percentage of male population/ Porcentaje de población masculina	-0.099 ± 0.037	-2.640	0.008
	Population over 5 years that speaks an indigenous language/ Población mayor de 5 años que habla lengua indígena	0.0035 ± 0.0036	0.980	0.327
	Marginalization index/ Índice de marginación	-0.583 ± 0.269	-2.162	0.030
	Influence	Intercept/Intercepto	3.785 ± 1.419	2.667
Slope/Pendiente		-0.027 ± 0.009	-2.891	0.003
Elevation/Altitud		-0.0004 ± 0.0002	-1.522	0.128
Euclidean distance to localities/ Distancia euclidiana a localidades		-0.698 ± 0.109	-6.385	< 0.001
Population density/ Densidad de población		1.904 ± 6.207	0.307	0.759
Percentage of male population/ Porcentaje de población masculina		-0.041 ± 0.023	-1.767	0.077
Population over 5 years that speaks an indigenous language/ Población mayor de 5 años que habla lengua indígena		-0.00003 ± 0.002	-0.013	0.989
Marginalization index/ Índice de marginación		-0.769 ± 0.220	-3.483	< 0.001
Second period: Recovery/Segundo periodo: Recuperación				
TCBR/RBTC	Intercept/Intercepto	-5.714 ± 3.475	-1.644	0.10010
	Slope/Pendiente	0.039 ± 0.017	2.234	0.02550
	Elevation/Altitud	0.004 ± 0.001	4.353	< 0.001
	Euclidean distance to localities/ Distancia euclidiana a localidades	-31.783 ± 16.677	-1.906	0.05668
	Population density/ Densidad de población	1.367 ± 0.978	1.397	0.16251
	Percentage of male population/ Porcentaje de población masculina	-0.157 ± 0.055	-2.857	0.00427
	Population over 5 years that speaks an indigenous language/ Población mayor de 5 años que habla lengua indígena	-0.001 ± 0.006	-0.265	0.79108
	Marginalization index/ Índice de marginación	-0.633 ± 0.437	-1.447	0.14778

Estimator ± standard deviation. Variables are considered significant when $P < 0.05$.

Estimador ± desviación estándar. Las variables se consideraron significativas cuando $P < 0.05$.

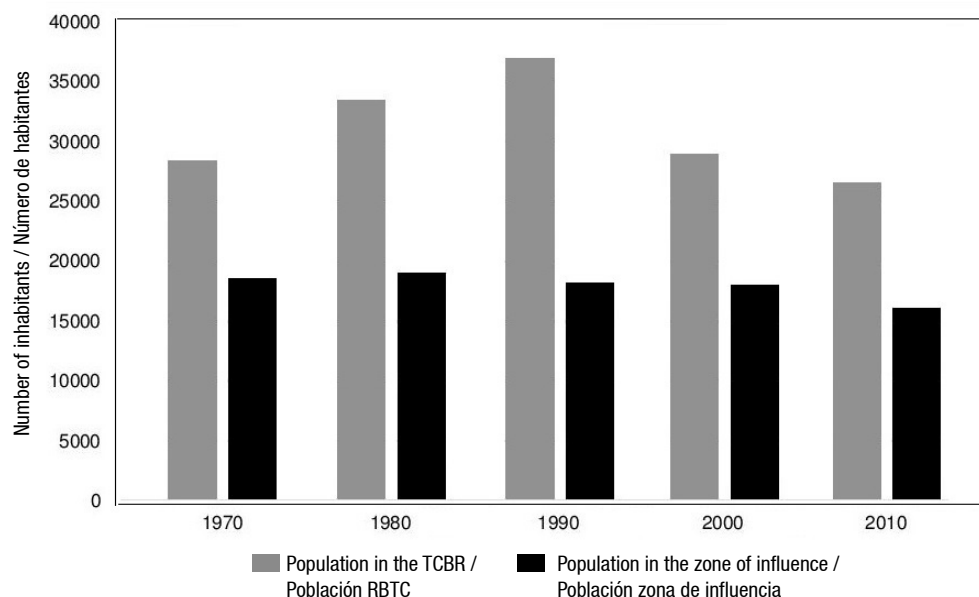


Figure 5. Rural population trend in the Tehuacán-Cuicatlán region (Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve [TCBR] and zone of influence) in the 1970-2010 period.

Figura 5. Tendencia de la población rural en la región Tehuacán-Cuicatlán (Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán [RBTC] y zona de influencia) en el periodo 1970-2010.

2008; Guerra-Martínez et al., 2019; Osorio et al., 2015). In addition, there is a continuous process of urbanization in the TCR due to the migration of people from rural populations to the city of Tehuacán, which implies the reduction of activities related to the use of natural resources and, therefore, cover recovery.

With respect to economic factors in the TCR, the primary sector (agriculture, livestock and forest extraction) maintained a negative trend in the 1980-2000 period, as people engaged in this sector decreased from 13 718 in 1980 to 10 263 in 2000 (INEGI, 1980, 2000); the total number of livestock decreased from 71 820 in 1990 to 41 513 in 2007 (INEGI, 1991, 2007); and the number of people who used firewood for domestic purposes decreased from 51 996 in 1980 to 13 608 in 2007 (INEGI, 1980, 2000). On the other hand, in the 1980-2000 period, the secondary sector (construction activities and manufacturing industry) also showed a negative trend: 15 044 people were employed in this sector in 1980, whereas only 2 443 were employed in 2000 (INEGI, 1980, 2000). The decrease in primary and secondary activities could be attributed to the increase in the tertiary sector (commerce, transport, professional and health services), since the number of people employed in this sector rose from 670 in 1980 to 3 886 in 2000 (INEGI, 1980, 2000). These trends support the evolution of the CLCU processes in the TCR, as it was observed in the post-decree period, when the oak forest cover recovery was associated with agricultural abandonment and with a greater participation of the population in occupational sectors other than primary.

Segunda etapa: análisis de tendencias socioeconómicas municipales

El crecimiento de los factores demográficos, como es el caso del crecimiento poblacional, contribuye a una mayor demanda de los recursos naturales y a la deforestación (Figuroa et al., 2009; Geist & Lambin, 2001). Esta situación se observa en la RTC, aunque con diferencias en el comportamiento de la población de la RBTC con respecto a su zona de influencia. Mientras que en la RBTC hubo incremento de la población en el periodo 1970-1990 con tendencia a disminuir en el periodo 1990-2010, en la zona de influencia se registró una tendencia al decremento poblacional que se mantuvo constante en el periodo 1970-2010 (Figura 5) (INEGI, 1970, 1980, 1990, 2000, 2011). Esto se confirma con el índice elevado de expulsión que afectó a la RTC en los años 2000 (expulsión de -6.15) y 2010 (expulsión de -12.92) (SEGOB, 2010), sugiriendo un proceso de emigración intensa que se ha interpretado como una de las estrategias de supervivencia de los hogares que mayor impacto ha tenido sobre el abandono de tierras y la recuperación de la vegetación (Aide, Zimmerman, Pascarella, Rivera, & Marcano-Vega, 2000; Galicia et al., 2008; Guerra-Martínez et al., 2019; Osorio et al., 2015). Aunado a lo anterior, existe en la RTC un proceso insistente de urbanización debido a la emigración de las personas de poblaciones rurales hacia la ciudad de Tehuacán, lo que supone la disminución de actividades relacionadas con el aprovechamiento de los recursos naturales y, por ende, la recuperación de la cobertura.

Although socioeconomic trends have a logical relationship with the dynamics of the CLCU, the simple regression model applied between the change rates of the municipalities in the TCR and the socioeconomic variables, in both periods, shows that there are no unique factors explaining the processes of the CLCU. However, the model highlights a negative statistical relationship ($R^2 = 0.19$; $P = 0.039$) between the total population variable and the change rate of the oak forest in the TCR municipalities; that is, while the total population is lower, the change rates are positive, which represents a recovery of the forest cover (Figure 6).

The above-mentioned results show that socioeconomic trends within the TCR have positively impacted the oak forest ecosystem. Although it is not possible to determine that this was a determining factor in the conservation of natural resources in the TCR, the results indicate a positive and indirect influence, by causing negative impacts in socio-economic terms, mainly in terms of emigration and the decrease in primary activities. The results could be more forceful after considering some local factors, such as the local population's rights over the land and resources to reconcile conservation and the use of degraded ecosystems.

Finally, it is recognized that the regional analysis provides information for decision making on where to invest resources (human and economic) for

Respecto a los factores económicos, en la RTC, el sector primario (agricultura, ganadería y extracción forestal) mantuvo tendencia negativa en el periodo 1980-2000, ya que las personas dedicadas al sector disminuyeron de 13718 en 1980 a 10263 en el 2000 (INEGI, 1980, 2000); el número total de cabezas de ganado se redujo de 71820 en 1990 a 41513 en el 2007 (INEGI, 1991, 2007); y el número de personas que usaban leña con fines domésticos se redujo de 51996 en 1980 a 13608 en el 2007 (INEGI, 1980, 2000). Por otra parte, en el periodo 1980-2000, el sector secundario (actividades de construcción e industria manufacturera) también mostró tendencia negativa debido a que de 15044 personas que se empleaban en 1980, solo 2443 personas lo hicieron en el 2000 (INEGI, 1980, 2000). La disminución de la actividad primaria y secundaria se podría atribuir al incremento en la actividad terciaria (comercio, transportes, servicios profesionales y de salud) dado que de 670 personas que se ocupaban en este sector en 1980, el número aumentó a 3886 en el año 2000 (INEGI, 1980, 2000). Estas tendencias respaldan la evolución de los procesos de CCUS en la RTC, tal como se observó en el periodo posterior al decreto, cuando la recuperación de la cobertura del bosque de encino se asoció al abandono agrícola y a una mayor participación de la población en sectores ocupacionales distintos al primario.

A pesar de que las tendencias socioeconómicas sostienen una relación lógica con la dinámica del

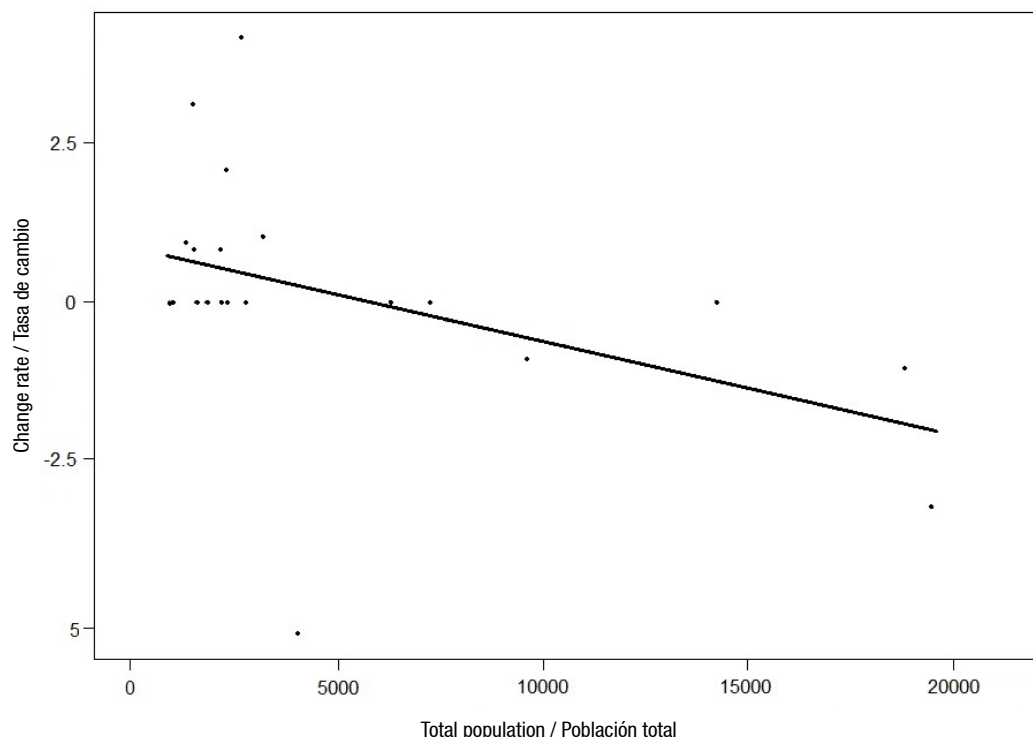


Figure 6. Model of the relationship between total population in the Tehuacán-Cuicatlán Reserve and the cover change rate.
Figura 6. Modelo de relación entre la población total en la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán y la tasa de cambio de la cobertura.

conservation and, particularly, for identifying key areas useful for subsequent assessments at the local level. In addition, the study indirectly allowed a comprehensive view of the social, economic and political processes that affected the CLCU, as has occurred in other studies (Geist & Lambin, 2002).

Conclusions

In the period before the decree establishing the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve (TCBR) (1979-2001), the oak forest was deforested. Areas with low slopes, proximity to localities, and higher male population were the main driving forces behind this change. In contrast, during the post-decree period (2001-2011), the recovery of the oak forest promoted by factors such as the high-slope, high-elevation areas and a decrease in the male population. The TCBR decree, which was issued in 1998, should not be considered as the main reason for containment of the oak forest deforestation or for its subsequent incipient recovery; however, indirect interference should be accepted, particularly related to the decrease in the male population, a social group that has traditionally been a promoter of agricultural activities, land use change and deforestation.

Acknowledgments

The first author wishes to thank the Graduate School of Geography of the National Autonomous University of Mexico (UNAM) and the National Council for Science and Technology (CONACYT) for the scholarship granted to carry out her doctoral studies. We are grateful to UNAM's Program to Support Research and Technological Innovation Projects (PAPIIT) (PAPIIT IN301218 project) for the financial support for this research.

End of English version

References / Referencias

- Aide, T. M., Zimmerman, J. K., Pascarella, J. B., Rivera, L., & Marcano-Vega, H. (2000). Forest regeneration in a chronosequence of tropical abandoned pastures: Implications for restoration ecology. *Restoration Ecology*, 8(4), 328–338. doi: 10.1046/j.1526-100x.2000.80048.x
- Arizaga, S., Cruz, J. M., Cabrales, M. S., & González, M. Á. B. (2009). *Manual de la biodiversidad de encinos michoacanos*. México: Instituto Nacional de Ecología. Retrieved from http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=603
- Bezaury-Creel, J., & Gutiérrez, C. D. (2009). Áreas naturales protegidas y desarrollo social en México. In CONABIO (Ed.), *Capital natural de México* (vol. II, pp. 385–431). México:

CCUS, el modelo de regresión simple aplicado entre las tasas de cambio de los municipios de la RTC y las variables socioeconómicas, en ambos periodos, muestra que no existen factores únicos que expliquen los procesos del CCUS. No obstante, el modelo destaca una relación estadística negativa ($R^2 = 0.19$; $P = 0.039$) entre la variable población total y la tasa de cambio del bosque de encino en los municipios de la RTC; es decir, mientras la población total es menor, las tasas de cambio son positivas, lo que representa una recuperación de la cobertura del bosque (Figura 6).

Los resultados previos demuestran que las tendencias socioeconómicas dentro de la RTC han impactado positivamente al ecosistema del bosque de encino. Aunque no es posible determinar una responsabilidad del decreto como factor de la conservación de los recursos naturales en la RTC, los resultados indican injerencia positiva e indirecta, al provocar impactos negativos en términos socioeconómicos, principalmente sobre la emigración y la disminución de las actividades primarias. Los resultados podrían ser más contundentes tras la consideración de algunos factores locales, como es el caso de los derechos sobre la tierra y de los recursos de las poblaciones locales para conciliar la conservación y el aprovechamiento de ecosistemas degradados.

Finalmente, se reconoce que el análisis regional aporta información para la toma de decisiones sobre dónde invertir los recursos (humanos y económicos) para la conservación y, sobre todo, identificar áreas clave útiles para evaluaciones posteriores a nivel local. Además, el estudio permitió una visión integral de los procesos sociales, económicos y políticos a nivel indirecto que incidieron en el CCUS, tal como ha ocurrido en otros estudios (Geist & Lambin, 2002).

Conclusiones

En el periodo previo al decreto de la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán (RBTC) (1979-2001), el bosque de encino se deforestó. Las áreas de baja pendiente, la cercanía a localidades y una mayor población masculina fueron los principales conductores de tal cambio. En contraste, en el periodo posterior al decreto (2001-2011) resaltó la recuperación del bosque de encino promovida por factores como las áreas de pendiente y altitud elevadas y disminución de la población masculina. El decreto de la RBTC, ocurrido en 1998, no debe considerarse la causa principal de la contención de la deforestación del bosque de encino ni de su posterior recuperación incipiente; sin embargo, debe aceptarse injerencia indirecta, particularmente sobre la disminución de la población masculina, grupo social que tradicionalmente ha sido promotor de las actividades agropecuarias, del cambio de uso del suelo y de la deforestación.

- Author. Retrieved from https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/pdf/CapNatMex/Vol_II/II09_Areas_naturales_protegidas_y_desarrollo_social_en_Mex.pdf
- Brandon, K., Gorenflo, L. J., Rodrigues, A. S. L., & Waller, R. W. (2005). Reconciling biodiversity conservation, people, protected areas, and agricultural suitability in Mexico. *World Development*, 33(9), 1403–1418. doi: 10.1016/j.worlddev.2004.10.005
- Burnham, K. P., Anderson, D. R., & Huyvaert, K. P. (2011). Erratum to: AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: some background, observations, and comparisons. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 65, 23–35. doi: 10.1007/s00265-010-1029-6
- Chape, S., Blyth, S., Fish, L., Fox, P., & Spalding, M. (2003). 2003 United Nations. *List of protected areas*. UK: IUCN, UNEP, WCMC. Retrieved from <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/UNLNP-2003.pdf>
- Chape, S., Harrison, J., Spalding, M., & Lysenko, I. (2005). Measuring the extent and effectiveness of protected areas as an indicator for meeting global biodiversity targets. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1454), 443–455. doi: 10.1098/rstb.2004.1592
- Chazdon, R. L. (2014). *Second growth: The promise of tropical forest regeneration in an age of deforestation*. Yokohama, Japan: University of Chicago Press. Retrieved from <https://press.uchicago.edu/ucp/books/book/chicago/S/bo17407876.html>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2019). Áreas Naturales Protegidas decretadas. Retrieved February 19, 2019 from http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/datos_anp.htm
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), & Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza. (2003). Estimación de la tasa de transformación del hábitat en la Reserva de la Biosfera “Tehuacán-Cuicatlán” periodo 1986-2003. Retrieved from https://simec.conanp.gob.mx/TTH/Tehuacan/Tehuacan_TTH_1986_2000.pdf
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). (2000). Grado de marginación por localidad 2000. Retrieved from <https://datos.gob.mx/busca/dataset/indice-de-marginacion-carencias-poblacionales-por-localidad-municipio-y-entidad/resource/f8004298-e527-45db-8f0e-7d5ed2df6401>
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). (2010). Grado de marginación por localidad 2010. Retrieved from https://datos.gob.mx/busca/dataset/indice-de-marginacion-carencias-poblacionales-por-localidad-municipio-y-entidad/resource/b7abcc1f-416d-4017-a35f-cf683b4cea1f?inner_span=True
- Crk, T., Uriarte, M., Corsi, F., & Flynn, D. (2009). Forest recovery in a tropical landscape: what is the relative importance of biophysical, socioeconomic, and landscape variables? *Landscape Ecology*, 24(5), 629–642. doi: 10.1007/s10980-009-9338-8

Agradecimientos

La primera autora agradece al Posgrado en Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar los estudios de doctorado. Agradecemos al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM (proyecto PAPIIT IN301218) por el financiamiento de esta investigación.

Fin de la versión en español

- Dávila, P., Arizmendi, M. C., Valiente-Banuet, A., Villaseñor, J. L., Casas, A., & Lira, R. (2002). Biological diversity in the Tehuacan-Cuicatlán Valley, Mexico. *Biodiversity & Conservation*, 11(3), 421–442. doi: 10.1023/A:1014888822920
- Ervin, J. (2003). Protected area assessments in perspective. *Bioscience*, 53(9), 819–822. doi: 10.1641/0006-3568(2003)053[0819:PAAIP]2.0.CO;2
- Farfán, M., Mas, J. F., & Osorio, L. P. (2012). Interpolating socioeconomic data for the analysis of deforestation: A comparison of methods. *Journal of Geographic Information System*, 4(4), 358–365. doi: 10.4236/jgis.2012.44041
- Figueroa, F., Sánchez-Cordero, V., Illoldi-Rangel, P., & Linaje, M. (2011). Evaluación de la efectividad de las áreas protegidas para contener procesos de cambio en el uso del suelo y la vegetación. ¿Un índice es suficiente? *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(3), 951–963. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmbiodiv/v82n3/v82n3a20.pdf>
- Figueroa, F., Sánchez-Cordero, V., Meave, J., & Trejo, I. (2009). Socioeconomic context of land use and land cover change in Mexican biosphere reserves. *Environmental Conservation*, 36(3), 180–191. doi: 10.1017/S0376892909990221
- Galicia, L., Zarco-Arista, A. E., Mendoza-Robles, K. I., Palacio-Prieto, J. L., & García-Romero, A. (2008). Land use/cover, landforms and fragmentation patterns in a tropical dry forest in the southern Pacific region of Mexico. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 29(2), 137–154. doi: 10.1111/j.1467-9493.2008.00326.x
- Geist, H. J., & Lambin, E. (2002). Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience*, 52(2), 143–150. Retrieved from <https://academic.oup.com/bioscience/article/52/2/143/341135>
- Geist, H. J., & Lambin, E. F. (2001). *What drives tropical deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence*. Belgium: LUC International Project Office. Retrieved from <http://www.pik-potsdam.de/~luedeke/lucc4.pdf>
- Guerra-Martínez, F., García-Romero, A., Cruz-Mendoza, A., & Osorio-Olvera, L. (2019). Regional analysis of indirect

- factors affecting the recovery, degradation and deforestation in the tropical dry forests of Oaxaca, Mexico. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 40(3), 387–409. doi: 10.1111/sjtg.12281
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1970). IX Censo de población y Vivienda, 1970. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/1970/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1980). X Censo de población y Vivienda, 1980. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/1980/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1990). XI Censo de Población y Vivienda, 1990. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/1990/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1991). Censo Agrícola-Ganadero 1991. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/programas/cagf/1991/default.html#Microdatos>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2000). Principales resultados por localidad (ITER). XII Censo General de Población y Vivienda 2000. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2000/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2001). Uso del suelo y la vegetación, serie 1 (continuo nacional), 1:250,000. Retrieved from http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/inegi/usv250kcs1agw
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2007). Censo agrícola-ganadero y forestal 2007. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/programas/cagf/2007/default.html#Microdatos>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2008). Uso del suelo y la vegetación, serie 3 (continuo nacional), 1:250,000. Retrieved from http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/inegi/usv250ks3gw
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2011). Censo de Población y Vivienda 2010. Datos abiertos. Principales resultados por localidad (ITER). Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/default.html>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). Uso del suelo y la vegetación, serie 5 (continuo nacional), 1:250,000. Retrieved from http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/inegi/usv250s5ugw
- Martínez-Cruz, J., Téllez, V. O., & Ibarra-Manríquez, G. (2009). Estructura de los encinares de la sierra de Santa Rosa, Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 80(1), 145–156. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-34532009000100017
- Mas, J. F. (2005). Assessing protected area effectiveness using surrounding (buffer) areas environmentally similar to the target area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 105, 69–80. doi: 10.1007/s10661-005-3156-5
- Mas, C. J. F., Osorio, O. L. P., 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. doi: 10.14350/rig.43853
- Olvera-Vargas, M., & Figueroa-Rangel, B. L. (2012). Caracterización estructural de bosques montanos dominados por encino en el centro-occidente de México. *Revista Ecosistemas*, 21(1-2), 74–84. Retrieved from <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/28>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1995). *Forest resources assessment 1990. Tropical forest plantation resources*. Rome, Italy: Author. Retrieved from <http://www.fao.org/3/v8330e/v8330e00.htm>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2002). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2000*. Rome, Italy: Author. Retrieved from <http://www.fao.org/3/y1997s/y1997s00.htm>
- Ortíz-García, A. I., Ramos-Robles, M. I., Pérez-Solano, L. A., & Mandujano, S. (2012). Distribución potencial de los ungulados silvestres en la Reserva de Biosfera de Tehuacán-Cuicatlán, México. *Therya*, 3(3), 333–348. doi: 10.12933/therya-12-89
- Pérez-Vega, A., Regil-García, H., Boni-Nóñez, A., Farfán-Gutiérrez, M., Rocha-Álvarez, F., & Magaña-Cota, G. (2016). Valoración de la subzonificación del plan de manejo en la Reserva de la Biósfera de Sierra Gorda Guanajuato. *Acta Universitaria*, 26(473), 45–61. doi: 10.15174/au.2016.1538
- Pontius, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101(2–3), 251–268. doi: 10.1016/j.agee.2003.09.008
- Pressey, R. L., Whish, G. L., Barrett, T. W., & Watts, M. E. (2002). Effectiveness of protected areas in north-eastern New South Wales: recent trends in six measures. *Biological Conservation*, 106(1), 57–69. doi: 10.1016/S0006-3207(01)00229-4
- Pretty, J., & Smith, D. (2004). Social capital in biodiversity conservation and management. *Conservation Biology*, 18(3), 631–638. doi: 10.1111/j.1523-1739.2004.00126.x
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México* (1.ª ed. digital). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Retrieved from https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf
- Secretaría de Gobernación (SEGOB). (2010). Instituto Nacional de Migración. Datos y recursos. Retrieved from <https://datos.gob.mx/busca/dataset/instituto-nacional-de-migracion>
- Secretaría de Gobernación (SEGOB). (2018). Categoría migratoria municipal 1995-2000 y 2005-2010. Retrieved from <https://datos.gob.mx/busca/dataset/>

- migracion-interna/resource/f9b8055a-be8b-4ffc-bfdc-c5f93f1eb22e
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN). (2016). Informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN). Retrieved June 15, 2018 from <https://www.iucn.org/es/news/secretariat/201609/el-15-de-las-tierras-del-planeta-est%3%A1n-protegidas-pero-quedan-excluidas-%3%A1reas-cruciales-para-la-biodiversidad>
- Valencia, A. S. (2004). Diversidad del género *Quercus* (Fagaceae) en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 75, 33–53. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57707503>
- Villaseñor, J. L. (2004). Los géneros de plantas vasculares de la flora de México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 75, 105–135. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/577/57707506.pdf>

