

Dynamic changes in land use and vegetation in the Forest Protected Area of the southern rivers of Querétaro (1997-2016)

Dinámica de cambios en el uso de suelo y vegetación en la zona protectora forestal de los ríos del sur de Querétaro (1997-2016)

Silvia Pascual-Hernández¹; Alejandro I. Monterroso-Rivas^{2*}; Leopoldo Mohedano-Caballero¹; José L. Romo-Lozano¹; Jesús M. Cabrera-Delgado¹

¹Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales (DICIFO), km 38.5 carretera México-Texcoco. C. P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

²Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos. km 38.5 carretera México-Texcoco. C. P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

*Corresponding author: aimrivas@correo.chapingo.mx; tel.: +52 595 952 1500 ext. 6178.

Abstract

Introduction. Measuring gains and losses in land use and vegetation allows us to understand the dynamics of changes in natural protected areas.

Objectives. To analyze changes in land use and vegetation in the Forest Protected Area of the southern rivers of Querétaro.

Materials and Methods. The areas of land use and vegetation were quantified for the years 1997, 2009, and 2016. Changes and trends were analyzed using geographic information systems. Possible causes of the dynamics of change were examined based on field visits and a socioeconomic survey in five localities (94 households) within the area of influence.

Results. The net loss over the 20 years was 1026 ha (16 %) of oak forest and 472 ha (100 %) of pine-oak forest. Secondary shrubby oak forest increased from 21 ha to 1088 ha (+5000 %). Vegetation associated with productive activities such as induced pastureland increased 119 ha (98 %), while agriculture expanded 128 ha (6 %). Survey information indicates that 11 % are engaged in agriculture and 30 % use firewood as an energy source; furthermore, 90 % perceive that illegal logging is associated with high charcoal production.

Conclusion. The dynamics of land use and vegetation changes from 1997 to 2016 is moderate with losses of forest importance such as oak forest, caused by human activities according to the perception of the villagers.

Keywords: human activities; agriculture; natural protected area; pine-oak forest; induced pastureland.

Resumen

Introducción. La cuantificación de ganancias y pérdidas en los usos de suelo y vegetación permite conocer la dinámica de cambios en las áreas naturales protegidas.

Objetivo. Analizar los cambios de uso de suelo y vegetación en la Zona Protectora Forestal de los ríos del sur de Querétaro.

Materiales y métodos. Se cuantificaron las superficies de los usos de suelo y vegetación en los años 1997, 2009 y 2016. Los cambios y tendencias se analizaron con sistemas de información geográfica. Se indagaron las posibles causas de la dinámica de cambios a partir de visitas de campo y un cuestionario socioeconómico en cinco localidades (94 hogares) del área de influencia.

Resultados. Durante los 20 años, en términos netos, se registraron pérdidas de 1026 ha (16 %) de bosque de encino y 472 ha (100 %) de bosque de pino-encino. La vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino aumentó de 21 ha a 1088 ha (+5000 %). La vegetación asociada a actividades productivas como el pastizal inducido incrementó 119 ha (98 %), mientras que la agricultura se amplió 128 ha (6 %). La información del cuestionario señala que 11 % se dedica a la agricultura y 30 % usa leña como fuente energética; además, 90 % percibe que la tala ilegal está asociada con la producción alta de carbón.

Conclusión. La dinámica de cambios del uso de suelo y vegetación de 1997 a 2016 es moderada con pérdidas de importancia forestal como el bosque de encino, causadas por actividades antrópicas de acuerdo con la percepción de los pobladores.

Palabras clave: actividades antrópicas; agricultura; área natural protegida; bosque de pino-encino; pastizal inducido.

Introduction

Natural Protected Areas (NPA) are a policy instrument aimed at promoting biodiversity conservation and ecosystem services (Jiménez et al., 2014; Miranda et al., 2016; Tesfaw et al., 2018). Currently, over 15 % of the Earth's surface is under some form of protection, and there is an ongoing effort to increase this land cover (Shah et al., 2021). Studies in many countries have demonstrated that the establishment of PNA has led to a decrease in deforestation processes (Andam et al., 2008; Blankespoor et al., 2017). According to the Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP, 2024), Mexico has 226 PNA covering 93 807 804 ha, of which 23 013 380 ha correspond to land area, representing 11.71 % of the national land area.

Although Mexico has prioritized its natural protected areas (NPA), this has not been consistently reflected in the allocation of budgets for their management. For example, in the period 2012-2018 there was a largest increase in PNA (71.8 % of the current surface area) in history, but the allocated budget was reduced by approximately 7.7 % adjusted for inflation (CONANP, 2018; Errejón et al., 2019). Therefore, it is possible to deduce that insufficient funding is one of the factors that significantly influence limited conservation outcomes.

In Mexico, the effectiveness of natural protected areas (NPA) as a tool for stopping deforestation and conserving natural resources has been studied (Blackman et al., 2015; Figueroa et al., 2011). On the other hand, biological diversity and its importance associated with PNA, as well as changes in vegetation and land use, have also been studied (Ellis et al., 2017; Monjardín-Armenta et al., 2017; Neri-Suárez, 2018).

Changes in land use and vegetation within PNA are crucial for designing and implementing effective management and conservation plans (Von et al., 2020). However, some PNA in Mexico have not received sufficient attention, with limited research conducted in these areas. These NPAs include the Forest Protected Area of the rivers (San Ildefonso, Ñado, Aculco and Arrollo Zarco) in southern Querétaro (FPARSQ), located on the border with Estado de México, which was declared a protected area in 1941 (Secretaría de Agricultura y Fomento, 1941). The FPARSQ is significant in the region due to its irrigation works and aquifer recharge, which manifest as seasonal and permanent springs. Small streams flow through its ravines during the rainy season, which are stored in reservoirs to ensure the prosperity of local agriculture (Gutiérrez et al., 2015; Murillo & Orozco, 2016). Another notable feature of the area is the presence of dryland farming, specifically maize, a

Introducción

Las áreas naturales protegidas (ANP) son un instrumento de política para fomentar la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (Jiménez et al., 2014; Miranda et al., 2016; Tesfaw et al., 2018). Actualmente, más de 15 % de la superficie terrestre está bajo alguna forma de protección y existe el impulso para incrementar dicha cobertura (Shah et al., 2021). Estudios en varios países han demostrado que el establecimiento de las ANP ha significado disminución en los procesos de deforestación (Andam et al., 2008; Blankespoor et al., 2017). De acuerdo con la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP, 2024), México cuenta con 226 ANP que comprenden 93 807 804 ha, de las cuales 23 013 380 ha corresponden a la superficie terrestre protegida que representa 11.71 % de la superficie terrestre nacional.

Pese a la importancia que en México se ha dado al sistema de ANP, esta no se ha reflejado de manera consistente en la asignación de presupuestos para su operación. Por ejemplo, en el periodo 2012-2018 se registró el mayor incremento en ANP (71.8 % de la superficie actual) de la historia, pero el presupuesto asignado se redujo aproximadamente 7.7 % ajustado por la inflación (CONANP, 2018; Errejón et al., 2019). Por tanto, es posible deducir que el financiamiento insuficiente es uno de los factores que influyen de manera importante en los resultados limitados de conservación.

En México se ha estudiado la efectividad de las ANP como instrumento para detener los procesos de deforestación y conservar los recursos naturales (Blackman et al., 2015; Figueroa et al., 2011). Por otra parte, también se ha estudiado la diversidad biológica y su importancia asociada a las ANP, así como los cambios en la cobertura y uso de suelo (Ellis et al., 2017; Monjardín-Armenta et al., 2017; Neri-Suárez, 2018).

Los cambios que ocurren en el uso de suelo y la vegetación de las ANP son de interés para el diseño e implementación de planes de manejo y conservación pertinentes (Von et al., 2020); sin embargo, en el país existen ANP que no han recibido atención suficiente, donde se han desarrollado pocos estudios de interés. Dentro de esas ANP se encuentra la Zona Protectora Forestal de los ríos (San Ildefonso, Ñado, Aculco y Arrollo Zarco) del sur de Querétaro (ZPFRSQ), localizados en los límites con el Estado de México, la cual fue declarada como área protegida en 1941 (Secretaría de Agricultura y Fomento, 1941). La ZPFRSQ es relevante en la región debido a que en ella existen obras de irrigación y recargas de acuíferos que se manifiestan en manantiales estacionales y permanentes. Por sus barrancas discurren arroyos pequeños en temporada de lluvia que se almacenan en represas para asegurar la prosperidad de la agricultura local (Gutiérrez et al., 2015; Murillo

staple of the *Hñahñu* (Otomí) culture that resides there (Aguilar Sánchez & Lara Aguazul, 2021). Therefore, the objective of this study was to analyze the changes and trends in land use and vegetation in the FPARSQ for the periods 1997-2009 and 2009-2016, using geographic information systems (GIS) and fieldwork methodologies.

Materials and Methods

Study area

The study area is the FPARSQ, situated at the border of Estado de México and Querétaro, encompassing the municipalities of Amealco, Aculco, and Arroyo Zarco. It is bounded by coordinates $20^{\circ} 6' 14.70''$ N - $99^{\circ} 56' 13.79''$ W and is situated at an elevation of 2622 meters (Google Earth, 2021; Figure 1). The nearest locality is San Ildefonso Tultepec, with a total population of 3632 residents, of which 40 % belong to the Otomí indigenous group: 1891 women (799 of whom speak an indigenous language) and 1741 men (692 of whom speak an indigenous language) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020).

Cartography, Land Use, and vegetation types

Cartography and land use/vegetation data layers (LuV) from Mexico were used, including data from 1968-1986 (Series I) published in 1997, 2007-2008 (Series IV) published in 2009, and Series VI published in 2017 but with 2016 information. All series were used at a

& Orozco, 2016). Otra característica de la zona es la existencia de agricultura de temporal, específicamente de maíz, producto básico de la cultura *hñahñu* (otomí) que ahí se asienta (Aguilar Sánchez & Lara Aguazul, 2021). Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue analizar los cambios y tendencias de los usos de suelo y vegetación en la ZPFRSQ en los periodos 1997-2009 y 2009-2016, aplicando metodologías de sistemas de información geográfica (SIG) y trabajo de campo.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio corresponde a la ZPFRSQ que se encuentra en los límites del Estado de México y Querétaro, en los municipios de Amealco, Aculco y Arroyo Zarco. La zona se delimita con coordenadas $20^{\circ} 6' 14.70''$ LN - $99^{\circ} 56' 13.79''$ LO y se encuentra a una elevación de 2622 m (Google Earth, 2021; Figura 1). La localidad más cercana es San Ildefonso Tultepec con una población total de 3632 habitantes de los que 40 % pertenecen al grupo indígena otomí: 1891 mujeres (799 hablan lengua indígena) y 1741 hombres (692 hablan lengua indígena) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020).

Cartografía, usos de suelo y tipos de vegetación

Se utilizó cartografía y base de datos de las capas de uso de suelo y vegetación (USV) de México con datos de 1968-1986 (serie I) publicados en 1997, de 2007-2008 (serie IV)

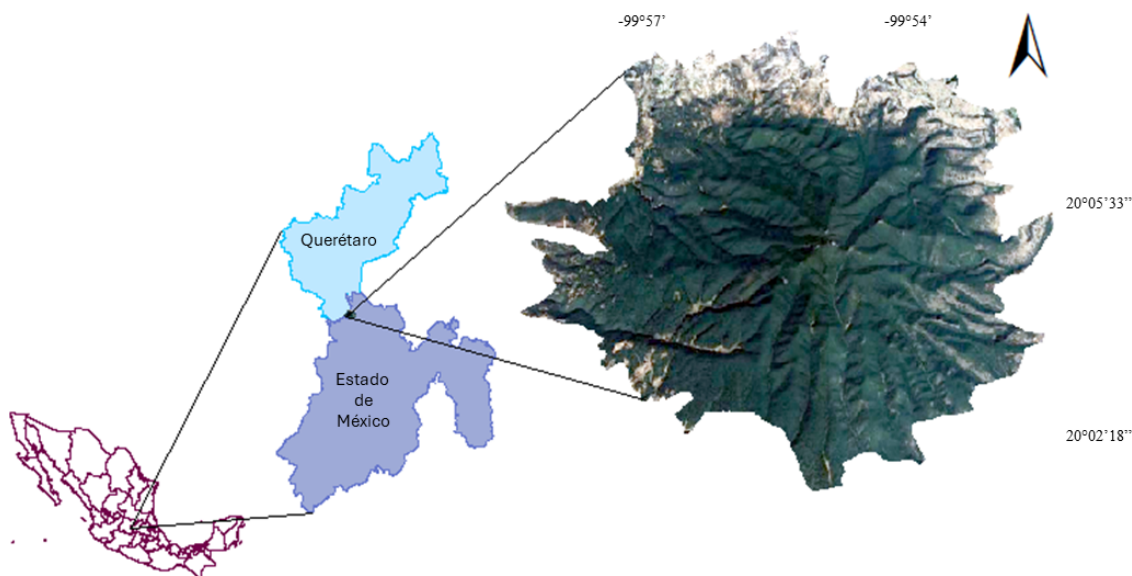


Figure 1. Location of the study area in the Forest Protected Area of the southern rivers of Querétaro. Source: Compiled by the author based on INEGI data (2016).

Figura 1. Localización del área de estudio en la Zona Protectora Forestal de los ríos del sur de Querétaro. Fuente: Elaboración propia con base en datos del INEGI (2016).

1:250,000 scale. The data source for all series was the Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2021).

The study area, encompassing the FPARSQ, was delineated using Google Earth (kml format) and converted to vector shapefile format using ArcGIS v. 10.7.1 (ESRI, 2011). All subsequent processes were carried out using this GIS due to its practicality, consistent use, and broad acceptance in the country.

Estimating changes in land use and vegetation types

Based on the area of each land use (ha and %), extracted from the cartography, three maps for the years 1997, 2009, and 2016 were created. The study considered two periods: 1) 1997-2009 and 2) 2009-2016. The rate of change in land use was calculated using the following formula from the FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996):

$$cr = \left[\left(\frac{a_2}{a_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] * 100$$

where,

cr = change of rate (%)

a_1 = area at the initial date

S_2 = area at the final date

n = Difference in years between the initial and final dates.

For both periods, the corresponding maps were overlapped, and cross-tabulation value matrices were obtained as proposed by Pontius et al. (2004) (Appendix 1).

Classification of Land Use Changes

Land use and vegetation (LuV) changes were classified into four categories based on the criteria set by Palacio-Prieto et al. (2004) and the transition matrix (Appendix 2) (Pontius et al., 2004):

- a) No Change: Areas where the land use remained the same in the final year as in the initial year, represented along the main diagonal.
- b) Deforested or Degraded Forest Loss: The first category refers to changes from tree-based land uses (forests and rainforests) to cultivated areas, induced pastureland, and croplands. Degraded forest loss includes the loss of non-tree vegetation cover (such as other types of vegetation, hydrophytic vegetation, scrubland, and natural grasslands) due

publicado en 2009 y la serie VI publicada en 2017, pero con información de 2016; todas las series se utilizaron a escala 1:250 000. En los tres casos, la fuente fue el portal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2021).

El área de estudio que comprende la ZPFRSQ se delimitó en la plataforma Google Earth (tipo kml) y se convirtió al formato vector *shapefile* del programa ArcGIS v. 10.7.1 (ESRI, 2011). Todos los procesos indicados en los apartados siguientes se realizaron con este SIG debido a su practicidad, uniformidad en el uso y aceptación amplia en el país.

Estimación de los cambios de usos de suelo y tipos de vegetación

A partir de la superficie de cada uso de suelo (ha y %), extraída de la cartografía, se obtuvieron tres mapas de los años 1997, 2009 y 2016. En el estudio se consideraron dos periodos: 1) 1997-2009 y 2) 2009-2016. La tasa de cambio en los usos de suelo se calculó con la fórmula siguiente de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996):

$$tc = \left[\left(\frac{s_2}{s_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] * 100$$

donde,

tc = tasa de cambio (%)

S_1 = superficie en la fecha inicial

S_2 = superficie en la fecha final

n = diferencia de años entre fecha inicial y final.

Para los dos periodos se sobrepusieron los mapas correspondientes y se obtuvieron matrices de valores de tabulación cruzada como la propuesta por Pontius et al. (2004) (Apéndice 1).

Clasificación de cambios de uso

Los cambios de USV se clasificaron en cuatro categorías con base en lo señalado por Palacio-Prieto et al. (2004) y en la matriz de transición (Apéndice 2) (Pontius et al., 2004):

- a) Sin cambio. Superficie que en el año final se mantiene con el mismo uso que en el año inicial y se expresan en la diagonal principal;
- b) Pérdida forestal deforestada o degradada. La primera se refiere al cambio de uso de suelo de formas arbóreas (bosques y selvas) a zonas de cultivos, pastizales inducidos y cultivados. La pérdida forestal degradada incluye pérdida de cobertura vegetal no arbórea (otros tipos

to conversion to induced and cultivated grasslands, crops, and other land covers.

c) Replacement Vegetation: Areas that were previously used for agricultural activities (such as croplands or induced and cultivated grasslands) and are now covered by forest, rainforest, scrubland, hydrophytic vegetation, or natural grasslands.

d) Productive Activity: Amount of area in land uses where productive human activities (induced pastureland or agriculture) are observed.

Trends in Land Use and Vegetation Changes

A discrete-time Markov chain is a sequence of random variable $X_1, X_2, \dots, X_n$, where the probability distribution of the next state $X_{(n+1)}$ depends only on the current state X_n and not on previous states $X_{(n-1)}, X_{(n-2)}, \dots$ (Markov property). The chain moves from one state to another, and the probability p_{ij} of transitioning from state s_i to state s_j in one step, known as the transition probability, can be written as $p_{ij} = P_r(X_i = s_j | X_0 = s_i)$. Assuming that the transition probabilities depend only on the time interval between the initial year S_1 and the final year S_2 of the analysis, the stochastic process is considered homogeneous (Linares et al., 2022). In this study, Markov chain tools were used to analyze the probabilities of land use and vegetation (LuV) change trends using ArcGIS v. 10.7.1 (ESRI, 2011).

Possible Causes of Land Use Changes

Field surveys were conducted to identify potential causes of land use changes in affected areas. Georeferenced control points from these sites were extracted and loaded onto a Garmin Etrex 30 GPS device. The data obtained from the cartography were then verified on-site.

To identify socioeconomic factors as potential causes of these changes, a survey was designed, including closed-ended questions about productive activities related to forestry and other aspects of the population's perceptions (Appendix 3). The sample size for the application of the survey was determined with the following formula (León et al., 2016):

$$n = \frac{N * Z^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q}$$

where,

n = sample size sought

N = population size

Z = statistical parameter depending on the confidence level ($p = 0.05$)

e = maximum accepted estimation error

p = probability of occurrence of the studied event (success)

de vegetación, vegetación hidrófila, matorral y pastizales naturales) por pastizales inducidos y cultivados, cultivos y otras coberturas.

c) Vegetación de reemplazo. Superficie revegetada donde se llevaba a cabo alguna actividad agropecuaria (uso de suelo en cultivos o pastizales inducidos y cultivados) y que actualmente está ocupada por bosque, selva, matorral, vegetación hidrófila o pastizales naturales.

d) Actividad productiva. Cantidad de superficie en los usos de suelo donde se observan actividades humanas productivas (pastizal inducido o agricultura).

Tendencias en cambio de uso de suelo y vegetación

Una cadena de Markov de tiempo discreto es una sucesión de variables aleatorias $X_1, X_2, \dots, X_n$, la cual establece que la distribución de probabilidad del estado siguiente $X_{(n+1)}$ depende solo del estado X_n y no de los estados previos $X_{(n-1)}, X_{(n-2)}, \dots$ (propiedad de Markov). La cadena se mueve de un estado a otro y la probabilidad p_{ij} de moverse del estado s_i al estado s_j en un paso llamado probabilidad de transición puede escribirse como . Bajo el supuesto de que las probabilidades de transición dependen solo del intervalo de tiempo entre el año inicial S_1 y el año final S_2 de análisis, se considera que el proceso estocástico es homogéneo (Linares et al., 2022). En este estudio se aplicó la herramienta cadenas de Markov para analizar las probabilidades de tendencias de cambio de USV mediante el programa ArcGIS v. 10.7.1 (ESRI, 2011).

Posibles causas de cambios de uso de suelo

Se hicieron visitas de campo con el objetivo de identificar las posibles causas de los cambios de uso de suelo en sitios afectados. Para ello, se extrajeron puntos de control georreferenciados de los sitios y se cargaron a un sistema de posicionamiento global GPS Garmin Etrex 30. A partir de estos datos, la información obtenida en cartografía se verificó en terreno.

Con el propósito de identificar factores socioeconómicos como posibles causas de cambios se diseñó un cuestionario que incluyó preguntas cerradas sobre actividades productivas relacionadas con la actividad forestal y otros aspectos de percepción de la población (Apéndice 3). El tamaño de muestra para la aplicación del cuestionario se determinó con la fórmula siguiente (León et al., 2016):

$$n = \frac{N * Z^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q}$$

donde,

n = tamaño de muestra buscado

N = tamaño de la población

q (1- p) = probability that the event studied will not happen.

According to the Population and Housing Census of INEGI (2020), the municipality of Amealco de Bonfil contains 46 localities, including San Ildefonso Tultepec, which has 10 neighborhoods totaling 864 households. Nearby localities affected by the sites include San Ildefonso Centro, Cuisillo, Xajay (Texquedo, Llano Largo), and Bothe, which collectively comprise 125 households. Based on the calculated sample size, 94 surveys were applied.

Additionally, data from the Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2020) were reviewed, and a literature review of forest fires in the FPARSQ from 2009 to 2016 was conducted.

Results and Discussion

Land use, changes and trends in the period 1997-2009

At the beginning of the studied period, in 1997, the following land uses and vegetation types were identified: oak forest, oak-pine forest, pine-oak forest, agricultural use, secondary shrubby vegetation of pine-oak forest, induced pastureland, secondary shrubby vegetation of oak forest, and induced pastureland with erosion. It should be noted that oak forests covered 77 % of the studied area. Table 1 shows the results for this period.

Z = parámetro estadístico que depende del nivel de confianza ($p = 0.05$)
 e = error de estimación máximo aceptado
 p = probabilidad de que ocurra el evento estudiado (éxito)
 q (1- p) = probabilidad de que no ocurra el evento estudiado.

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda del INEGI (2020), en el municipio de Amealco de Bonfil hay 46 localidades entre las que se encuentra San Ildefonso Tultepec, y tiene 10 barrios sumando 864 hogares. San Ildefonso centro, Cuisillo, Xajay (Texquedo, Llano largo) y Bothe son localidades cercanas de los sitios afectados, que en conjunto reúnen 125 hogares. De acuerdo con el tamaño de muestra calculado se aplicaron 94 cuestionarios.

Adicionalmente, se revisaron datos de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2020) y se hizo una revisión bibliográfica de incendios forestales entre los años 2009-2016 en la ZPFRSQ.

Resultados y discusión

Usos de suelo, cambios y tendencia en el periodo 1997-2009

Al inicio del periodo estudiado, en 1997, se identificaron los siguientes usos de suelo y vegetación: bosque de encino, bosque de encino-pino, bosque de pino-encino, uso agrícola, vegetación secundaria

Table 1. Net changes in land use and vegetation (LuV) area in the Forest Protected Area of the southern rivers of Querétaro for the period 1997-2009.

Cuadro 1. Cambios netos de superficie de uso de suelo y vegetación (USV) en la Zona Protectora Forestal de los ríos del sur de Querétaro en el periodo 1997-2009.

LuV / USV	1997		2009		Difference / Diferencia	
	(ha)	%	(ha)	%	(ha)	%
Oak forest / Bosque de encino	6 180	77	5 222	65	-958	-12
Pine-oak forest ¹ / Bosque de encino-pino ¹	575	7	631	8	56	1
Pine-oak forest ² / Bosque de pino-encino ²	472	6	0	0	-472	-6
Agriculture / Agricultura	433	5	383	5	-50	0
SSv/PQF / VSa/BPQ	161	2	127	2	-34	0
Induced pastureland / Pastizal inducido	122	2	635	8	513	6
SSv/QF / VSa/BQ	21	0	763	10	742	10
Pine forest / Bosque de pino	ND	0	216	3	216	3
IPWE / PICE	14	ND	0	ND	0	0

¹According to INEGI (1997), ²According to Leopold (1950). SSv/PQF: Secondary shrubby vegetation of pine-oak forest; SSv/QF: Secondary shrubby vegetation of oak forest; IPWE: Induced pastureland with erosion; ND: no data.
¹Según INEGI (1997), ²Según Leopold (1950). VSa/BPQ: vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino; VSa/BQ: vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino; PICE: pastizal inducido con erosión.

Table 2 shows the LuV change transition matrix. According to Farfán et al. (2016), the matrix is an asymmetrical arrangement table: the horizontal axis represents the land use categories from the first date, and the vertical axis represents the categories from the second date. The diagonal of the matrix shows the area of each land use category that remained unchanged during the considered period. On the other hand, the rest of the cells show the area that experienced a change to some other type of category. In the second-to-last column of the matrix, the total areas of all categories from time 1 are shown. The second-to-last row presents the total sum for the land uses from time 2. An additional column has been added to the matrix to

arbustiva de bosque de pino-encino, pastizal inducido, vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino y pastizal inducido con erosión. Cabe subrayar que los bosques de encino abarcaban 77 % del área estudiada. El Cuadro 1 muestra los resultados para dicho periodo.

El Cuadro 2 muestra la matriz de transición de cambio de USV. Según Farfán et al. (2016), la matriz se trata de una tabla de arreglos asimétricos: el eje horizontal representa las categorías de USV de la primera fecha y el eje vertical la segunda fecha. La diagonal de la matriz muestra la superficie de cada categoría de USV que permaneció sin cambio durante el periodo considerado. Por otra parte, el resto de las celdas

Table 2. Land use and vegetation (LUV, ha) change transition matrix in the Forest Protected Area of the southern rivers of Querétaro for the periods 1997-2009 and 2009-2016.

Cuadro 2. Matriz de transición de cambio uso de suelo y vegetación (USV, ha) en la Zona Protectora Forestal de los ríos del sur de Querétaro para los periodos 1997-2009 y 2009-2016.

		2009										
	LuV/USV	IP/PI	IPWE/PICE	A	SSvPQF/VSaBPQ	SSvQF/VSaBQ	PQF/BPQ	PF/BP	QPF/BQ	QF/BQ	Total	Increase/Incremento
1997	IP/PI	74	–	2	–	7	–	–	40	0	123	49
	IPWE/PICE	11	–	3	–	–	–	–	–	0	14	14
	A	17	–	280	–	13	–	30	23	69	433	153
	SSvPQF/VSaBPQ	37	–	6	111	0	–	–	–	7	161	50
	SSvQF/VSaBQ	–	–	4	9	8	–	–	–	–	21	13
	PQF/BPQ	14	–	2	7	402	–	–	–	47	472	472
	PF/BP	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	0
	QPF/BQP	3	–	45	–	7	–	–	517	3	575	58
	QF/BQ	480	–	42	–	326	–	186	52	5095	6180	1085
	Total	635	0	383	127	763	0	216	631	5222	7978	
	Increase/Incremento	562	0	103	16	755	0	216	115	127		
		2016										
2009	IP/PI	173	–	152	0	46	–	4	0	261	635	463
	IPWE/PICE	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	0
	A	0	–	179	0	0	–	39	71	94	383	204
	SSvPQF/VSaBPQ	–	–	64	63	0	–	–	–	0	127	64
	SSvQF/VSaBQ	28	–	47	–	687	–	–	1	1	763	77
	PQF/BPQ	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0	0
	PF/BP	–	–	0	–	–	–	215	–	1	216	1
	QPF/BQP	–	–	15	–	–	–	–	617	0	631	15
	QF/BQ	41	–	5	–	375	–	1	2	4798	5222	425
	Total	242	0	461	63	1109	0	259	690	5154	7978	
	Increase/Incremento	69	0	282	0	422	0	44	74	357		

IP: induced pastureland; IPWE: induced pastureland with erosion; A: agriculture; SSvPQF: shrub secondary vegetation of pine-oak forest; SSvQF: shrub secondary vegetation of oak forest; QPF: oak-pine forest (according to INEGI, 1997); PF: pine forest; PQF: pine-oak forest (according to Leopold, 1950) and QF: oak forest (González Medrano, 2003).

PI: pastizal inducido; PICE: pastizal inducido con erosión; A: agricultura; VSa/BQP: vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino; VSa/BQ: vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino; BQP: bosque de encino-pino (según INEGI, 1997); BP: bosque de pino; BPQ: bosque de pino-encino (según Leopold, 1950) y BQ: bosque de encino (González Medrano, 2003).

represent the losses of each LuV category. Additionally, an extra row has been added to show the gains.

Tables 1 and 2 highlight the change in pine-oak forest, which lost 472 ha, of which, according to the transition matrix, the majority (402 ha) changed to secondary shrubby oak forest vegetation (SSv/QF). Additionally, the oak forest was reduced by 12 %, equivalent to a loss of 958 ha, with transitions to induced pastureland (480 ha) and secondary vegetation (326 ha). Regarding land uses that recorded substantial increases in occupied area, SSv/QF stands out with 9 % (742 ha) and induced pastureland with 6 % (513 ha).

For the period 1997-2009, Table 3 shows the trends in LuV using a probability matrix. According to the results, the LuV with the highest probability of remaining are oak-pine forest, oak forest, induced pastureland and agriculture with 90, 80, 60, 60 and 60 %, respectively. The secondary vegetation of oak forest has the lowest probability of remaining (40 %). On the other hand, pine-oak forest has a high probability (90 %) of migrating to shrub secondary vegetation of oak forest.

Land uses, changes and trend for the period 2009-2016

Table 4 shows the dynamics of LuV for the period 2009-2016. Among the changes observed, the loss of 394 ha of induced pastureland, representing 5 %, stands out. Also, the oak forest had losses that were mainly

muestra la superficie que experimentó cambio hacia algún otro tipo de categoría. En la penúltima columna de la matriz se muestra el total de las superficies de todas las categorías del tiempo 1. En la penúltima fila se presenta la suma total para los usos del tiempo 2. En esta matriz se agregó la última columna que representa las pérdidas de cada USV. Asimismo, se agregó la última fila en la que se muestran las ganancias.

Los Cuadros 1 y 2 resaltan el cambio de bosque de pino-encino que perdió 472 ha, de las cuales, de acuerdo con la matriz de transición, la mayor parte (402 ha) cambió a vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino (VSa/BQ). También, el bosque de encino se redujo 12 % que equivale a una pérdida de 958 ha con transición a pastos inducidos (480 ha) y vegetación secundaria (326 ha). Con respecto a los usos de suelo que registraron incremento sustancial en superficie ocupada destacan la VSa/BQ con 9 % (742 ha) y el pastizal inducido con 6 % (513 ha).

Para el periodo 1997-2009, el Cuadro 3 señala las tendencias en el USV mediante una matriz de probabilidades. De acuerdo con los resultados, los USV con mayor probabilidad de permanecer son el bosque de encino-pino, bosque de encino, pastizal inducido y agricultura con 90, 80, 60 y 60 %, respectivamente. La vegetación secundaria de bosque de encino tiene la menor probabilidad de permanecer (40 %). Por otra parte, el bosque de pino-encino tiene altas probabilidades (90 %) de migrar a vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino.

Table 3. Matrix of land use and vegetation (LuV) change probabilities in the Protected Forest Zone of the southern rivers of Queretaro for the period 1997-2009.

Cuadro 3. Matriz de probabilidades de cambio de uso de suelo y vegetación (USV) en la Zona Protectora Forestal de los ríos del sur de Querétaro durante el periodo 1997-2009.

LuV /USV	IPWE /PICE	A	SSvPQF / VSaBPQ	SSvQF / VSaBQ	PQF /BPQ	PF /BP	PQF /BQP	QF /BQ
IP /PI	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.3	0.0
IPWE /PICE	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
A	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2
SSvPQF /VSaBPQ	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SSvQF /VSaBQ	0.0	0.2	0.4	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
PQF /BPQ	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.1
QF /BP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PQF /BQP	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0
QF /BQ	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.8

IP: induced pastureland; IPWE: induced pastureland with erosion; A: agriculture; SSv/PQF: shrub secondary vegetation of pine-oak forest; SSv/QF: shrub secondary vegetation of oak forest; PQF: oak-pine forest (according to INEGI, 1997); PF: pine forest; PQF: pine-oak forest (according to Leopold, 1950) and QF: oak forest (González Medrano, 2003).
PI: pastizal inducido; PICE: pastizal inducido con erosión; A: agricultura; VSa/BQP: vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino; VSa/BQ: vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino; BQP: bosque de encino-pino (según INEGI, 1997); BP: bosque de pino; BPQ: bosque de pino-encino (según Leopold, 1950) y BQ: bosque de encino (González Medrano, 2003).

Table 4. Net changes in land use and vegetation in the Forest Protected Areas of the southern rivers of Querétaro for the period 2009-2016.**Cuadro 4. Cambios netos del uso de suelo y vegetación en la Zona Protectora Forestal de los ríos del sur de Querétaro en el periodo 2009-2016.**

LuV/USV	2009		2016		Difference /Diferencia	
	ha	%	ha	%	ha	%
Oak forest/Bosque de encino	5 222	65	5 154	65	-68	0
Oak-pine forest1/Bosque de encino-pino1	631	8	690	9	59	1
Pine-oak forest2/Bosque de pino-encino2	0	ND	0	ND	0	0
Agriculture/Agricultura	383	5	461	6	78	1
SSvPQF/VSaBPQ	127	2	63	1	-64	-1
Induced pastureland/Pastizal inducido	635	8	242	3	-394	-5
SSvQF/VSaBQ	763	10	1 109	14	345	4
Pine forest/Bosque de pino	216	3	259	3	43	0
IPWE/PICE	0	ND	0	0	0	0

¹According to INEGI (1997); ²according to Leopold (1950). SSv/QF: shrub secondary vegetation of pine-oak forest; SSv/QF: shrub secondary vegetation of oak forest; IPWE: Induced pastureland with erosion; ND: no data.

¹Según INEGI (1997); ²según Leopold (1950). VSa/BPQ: vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino; VSa/BQ: vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino; PICE: pastizal inducido con erosión; s. d.: sin datos.

occupied by secondary vegetation (375 ha) and induced pastureland (40 ha), so in net terms the loss was 68 ha.

Usos de suelo, cambios y tendencia en el periodo 2009-2016

Table 5 shows that in the 1997-2009 period, 76 % of the area remained unchanged; however, forest loss was about 631 ha, representing 8 % of the total area. In the 2009-2016 period, the area that remained unchanged stands out, which increased slightly by 5 % compared to the previous period, from 6085 ha to 6516 ha. The forest loss is 432 ha less than the loss observed in the period 1997-2009. Also, there was a decrease of 117 ha in replacement vegetation compared to the previous period.

El Cuadro 4 muestra la dinámica de USV para el periodo 2009-2016. De los cambios ocurridos resalta la pérdida de 394 ha de pastos inducidos que equivale a 5 %. También, el bosque de encino tuvo pérdidas que fueron ocupadas principalmente por vegetación secundaria (375 ha) y por pastizal inducido (40 ha), por lo que en términos netos la pérdida fue de 68 ha.

Table 6 shows the probability matrix for the period 2009-2016. The land uses with the highest probability of remaining over time are pine forest, oak-pine forest and oak forest with 100, 100 and 90 %, respectively. Agriculture recorded 50 % probability of remaining and the other 50 % could change to oak-pine forest (20 %) or oak forest (20 %) and pine forest (10 %).

El Cuadro 5 señala que, en el periodo 1997-2009, 76 % de la superficie se mantuvo sin cambio; sin embargo, la pérdida forestal fue del orden de 631 ha, lo que representa 8 % de la superficie total. En el periodo 2009-2016 destaca la superficie que se mantiene sin cambios, la cual incrementa ligeramente 5 % respecto al periodo anterior, pasando de 6085 ha a 6516 ha. La pérdida forestal es 432 ha menor que la pérdida observada en el periodo 1997-2009. De igual manera se registra un decremento de 117 ha en la vegetación de remplazo con respecto al periodo anterior.

In general, during the 20 years analyzed, three important results can be distinguished in the FPARSQ: 1) the land uses and vegetation (LuV) with tree cover that lost the most surface area in net terms were oak forest with 1026 ha (16 %) and pine-oak forest, whose 472 ha disappeared from the FPARSQ (100 %); 2) secondary shrub vegetation/oak forest increased from 21 ha to 1088 ha, representing an increase of over 5000 %; 3) regarding LuV associated with productive activities, induced pastureland grew by 119 ha (98 %) and agriculture increased by 128 ha (6 %).

El Cuadro 6 muestra la matriz de probabilidades correspondiente al periodo 2009-2016. Los usos de suelo con mayor probabilidad de permanecer en el tiempo son el bosque de pino, bosque de encino-pino y bosque de encino con 100, 100 y 90 %, respectivamente. La agricultura registró 50 % de probabilidad de permanecer y el otro 50 % podría cambiar a bosque de encino-pino (20 %) o bosque de encino (20 %) y bosque de pino (10 %).

Table 5. Dynamics of land use change in the Forest Protected Area of the southern rivers of Querétaro for the periods 1997-2009 and 2009-2016.

Cuadro 5. Dinámica de cambio de uso de suelo en la Zona Protectora Forestal de los ríos del sur de Querétaro en los periodos 1997-2009 y 2009-2016.

Type of change /Tipo de cambio	1997-2009		2009-2016	
	ha	%	ha	%
No change /Sin cambio	6 085	76	6 516	82
Replacement vegetation /Vegetación de reemplazo	1 229	15	1 111	14
Forest loss /Pérdida forestal	631	8	199	2
Productive activity /Actividad productiva	33	1	152	2
Total	7 978	100	7 978	100

Table 6. Probability matrix of land use and vegetation (LuV) change in the Forest Protected Area of the southern rivers of Querétaro for the period 2009-2016.

Cuadro 6. Matriz de probabilidades de cambio de uso de suelo y vegetación (USV) en la Zona Protectora Forestal de los ríos del sur de Querétaro en el periodo 2009-2016.

LuV /USV	IP /PI	IPWE /PICE	A	SSvPQF / VSaBPQ	SSvQF / VSaBQ	PQF /BPQ	PF /BP	QPF /BQP	QF /BQ
IP /PI	0.3	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.4
IPWE /PICE	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
A	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2
SSvPQF / VSaBPQ	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SSvQF / VSaBQ	0.0	0.0	0.1	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0
PQF /BPQ	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PF /BP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
QPF /BQP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
QF /BQ	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.9

IP: induced pastureland; IPWE: induced pastureland with erosion; A: agriculture; SSv/PQF: shrub secondary vegetation of pine-oak forest; SSv/QF: shrub secondary vegetation of oak forest; QPF: oak-pine forest (according to INEGI, 1997); PF: pine forest; PQF: pine-oak forest (according to Leopold, 1950) and QF: oak forest (González Medrano, 2003).

PI: pastizal inducido; PICE: pastizal inducido con erosión; A: agricultura; VSa/BQP: vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino; VSa/BQ: vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino; BQP: bosque de encino-pino (según INEGI, 1997); BP: bosque de pino; BPQ: bosque de pino-encino (según Leopold, 1950) y BQ: bosque de encino (González Medrano, 2003).

Studies related to natural protected areas (NPA) provide different kinds of results. For example, Rioja-Nieto et al. (2015) found no clear evidence supporting the conservation objectives of the PNA. Blackman et al. (2015) concluded that PNA do not have clear protection effects on the clearings occurring in them. On the other hand, Morales-Hernández et al. (2016), in their study of the Bahía de Banderas PNA, found that there is a process of change and replacement of land cover and uses mainly associated with agriculture at the expense of forests and rainforests.

Mexico has lost large areas of its ecosystems in recent decades; by 1976, the original total coverage in Mexico had been reduced by 38 %, and by 1993 it only covered 54 % (Challenger et al., 2009). A significant portion of these areas belong to rural communities; their

De manera general, durante los 20 años analizados, se pueden distinguir tres resultados importantes en la ZPFRSQ: 1) los USV con existencia arbórea que en términos netos perdieron más superficie fueron el bosque de encino con 1 026 ha (16 %) y el bosque de pino-encino, cuyas 472 ha desaparecieron de la ZPFRSQ (100 %); 2) la vegetación secundaria arbustiva/bosque de encino aumentó de 21 ha a 1 088 ha, lo que significó más de 5 000 %; 3) en referencia a los USV asociados a actividades productivas, el pastizal inducido creció 119 ha (98 %) y la agricultura incrementó 128 ha (6 %).

Los estudios relacionados con ANP aportan resultados de índole distinta. Por ejemplo, Rioja-Nieto et al. (2015) no encontraron evidencia clara que favorezca el objetivo conservacionista del ANP. Blackman et al. (2015) concluyeron que las ANP no tienen efectos claros

land use changes affect biodiversity and reduce vital ecosystem services (De Alba et al., 2020). Under these circumstances, the identification and characterization of vegetation units have been of great importance, and GIS have been widely used in their analysis (Flores et al., 2020). GIS generates data using remote sensors that allow for the integration of forest cover information.

Causes of Land Use Change

Figure 2 shows the analyzed dynamics from 1997 to 2016 and the identified sites with some impact on the cover, which were visited to corroborate the land use change.

A preliminary study was conducted using a survey applied to a sample of 94 households from five localities in the region, aimed at identifying people's perceptions regarding the dynamics of change of LuV. This survey, applied on November 2021, indicated that 67 % stay at home, 11 % are involved in agriculture, 10 % are engaged in artisanal activities, and the rest in other activities. Regarding the energy used for cooking, the responses indicate that 32 % use liquefied petroleum gas (LPG), 30 % use firewood, and 38 % use both LPG and firewood; respondents stated that the firewood is extracted from nearby forests.

de protección sobre los desmontes ocurridos en ellas. Por otra parte, Morales-Hernández et al. (2016), en el estudio del ANP Bahía de Banderas, encontraron que existe un proceso de cambio y reposición de coberturas y usos de suelo asociado principalmente a la agricultura a expensas de bosques y selvas.

México ha perdido grandes áreas de sus ecosistemas en las últimas décadas; en 1976, la cobertura original total en México se había reducido 38 % y para 1993 solo cubría 54 % (Challenger et al., 2009). Buena parte de estas áreas pertenecen a comunidades rurales; sus cambios de uso de suelo afectan la biodiversidad y reducen servicios ecosistémicos vitales (De Alba et al., 2020). En estas circunstancias, la identificación y caracterización de las unidades de vegetación han sido de gran relevancia y en su análisis se han utilizado ampliamente SIG (Flores et al., 2020), los cuales generan datos mediante el uso de sensores remotos que permiten cruzar la información de coberturas de bosque.

Causas del cambio de uso de suelo

La Figura 2 ilustra la dinámica analizada de 1997 a 2016 y los sitios identificados con alguna afectación a la cobertura que fueron visitados para corroborar el cambio de uso de suelo.

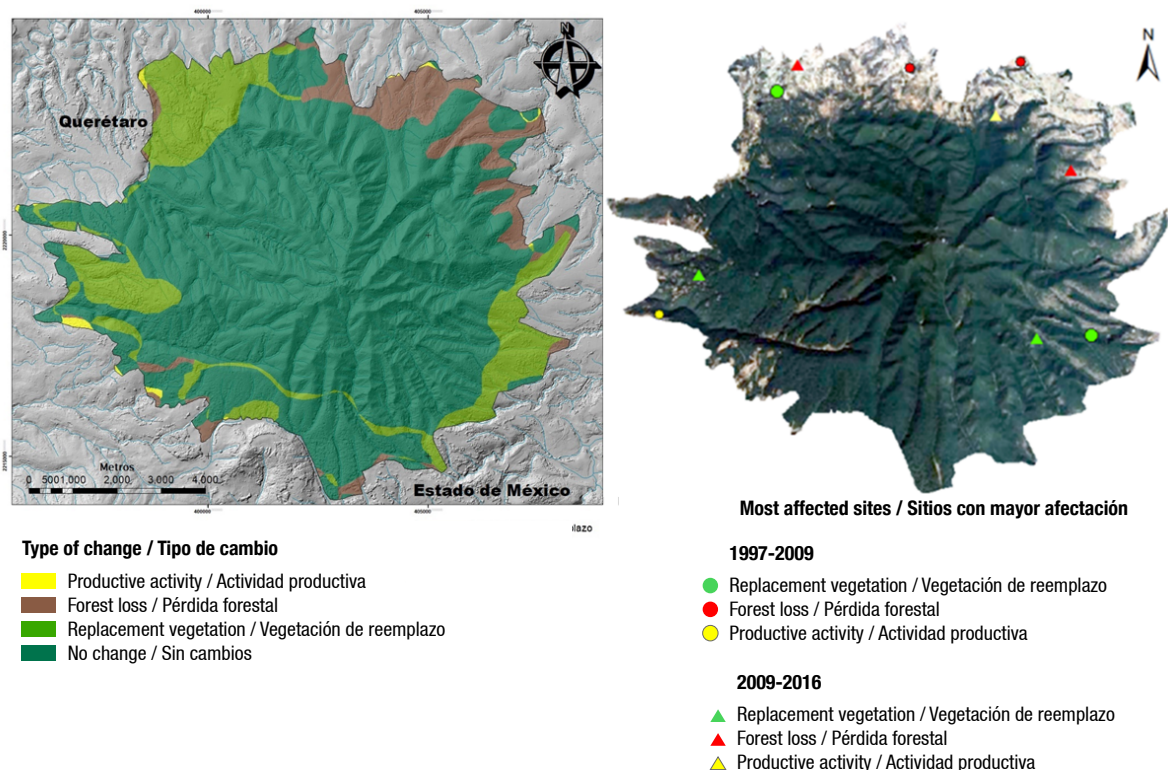


Figure 2. Dynamics of change (left) and main affected sites (right) in the Forest Protected Area of the southern rivers of Querétaro.
Source: Compiled by the authors based on data from INEGI (1997, 2016).

Figura 2. Dinámica de cambio (izquierda) y principales sitios afectados (derecha) en la Zona Protectora Forestal de los ríos del sur de Querétaro. Fuente: Elaboración propia con base en datos del INEGI (1997, 2016).

Regarding the residents' perception of the possible causes of the impacts, 90% identify illegal logging as the main problem, which is associated with charcoal production and the extraction of firewood for domestic use. Charcoal production carries a high risk of causing fires. CONAFOR reports that between 2009 and 2016, a fire affected nearly 30 hectares of vegetation in the study area.

The conditions and trends of biodiversity change, as indicated by Morales-Hernández et al. (2016), are rooted in social, economic, and political factors known as root causes. These factors often lead to changes in land cover and land use, overexploitation of organisms, introduction of invasive exotic species, anthropogenic climate change, and the addition of polluting products. Consequently, regarding the causes of vegetation changes, it is common for frequently reported factors to include anthropogenic activities and the high content of woody material that is vulnerable to forest fires. Another contributing factor is the expansion of agriculture and livestock farming, which leads to the extension of infrastructure (Ellis et al., 2017; Monjardín-Armenta et al., 2017).

GIS methodologies have frequently been used in the study of natural protected areas (NPA) in the country. For example, Neri-Suárez (2018) evaluated conservation gaps (known as gap analysis) in vegetation types relative to PNAs in Guerrero, Mexico. Additionally, Chico et al. (2015) assessed land use changes using orthophotos from 1994, 1999, and 2007 in the Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla National Park, also known as La Marquesa, in Mexico City. Rioja-Nieto et al. (2015) evaluated the effects of management in El Palmar State Reserve on the Yucatán Peninsula using remote sensing techniques based on hierarchical analysis of habitat characteristics. A similar case, but applying geospatial modeling of agroecological and forestry variables, was conducted by Villegas-Martínez (2021) in the Otomí-Mexica Park in Estado de México.

Conclusions

From 1997 to 2016, changes in land use and vegetation in the Forest Protected Area of the southern rivers of Querétaro show losses in oak forest and the disappearance of pine-oak forest, while shrub secondary vegetation/oak forest, grassland and agriculture increased. The trends showed that the pine-oak forest had a high probability of migrating or being replaced by the shrubby secondary vegetation of oak forest, while the oak forest, despite the losses, had a high probability of remaining. Therefore, it is expected that, as the shrub secondary vegetation increases, the tree vegetation will also gradually increase. The possible causes of change are of anthropogenic origin, such as

Se realizó un trabajo exploratorio a partir de un cuestionario aplicado a una muestra de 94 hogares de cinco localidades de la región, para identificar la percepción de las personas con relación a la dinámica de cambios del USV. El cuestionario aplicado en noviembre de 2021 indicó que 67 % se dedica al hogar, 11 % a agricultura, 10 % a actividades artesanales y el resto a otras actividades. Con respecto al energético usado para preparar alimentos, las respuestas indican que 32 % utiliza gas LP (licuado de petróleo), 30 % usa leña y 38 % usa gas Lp y leña; los encuestados manifestaron que esta es extraída de los bosques aledaños.

En cuanto a la percepción de los pobladores sobre las causas posibles de las afectaciones, 90 % percibe a la tala ilegal como el principal problema, asociada a la producción de carbón y a la extracción de leña para uso doméstico. Cuando se produce carbón, el riesgo de generar incendios es alto. La CONAFOR reporta que en el periodo 2009-2016 ocurrió un incendio que afectó la vegetación de la zona de estudio en poco menos de 30 ha.

El estado y las tendencias de cambio de la biodiversidad, tal como lo indican Morales-Hernández et al. (2016), están anclados a factores sociales, económicos y políticos llamados factores de raíz que suelen provocar cambios en la cobertura y el uso del suelo, sobreexplotación de organismos, introducción de especies invasoras exóticas, cambio climático antropogénico y la adición de productos contaminantes. De este modo, en el tema de las causas de los cambios en la vegetación, es común que entre los factores reportados con mayor frecuencia se mencionen el antrópico y el alto contenido de material leñoso que es vulnerable a los incendios forestales. Otro factor es la expansión agrícola y ganadera que conlleva a la extensión de infraestructura (Ellis et al., 2017; Monjardín-Armenta et al., 2017).

Las metodologías SIG han sido utilizadas con frecuencia en el estudio de las ANP del país, tal es el caso de Neri-Suárez (2018), quien evaluó los vacíos y omisiones de conservación (conocido como análisis de vacíos o análisis gap) de los tipos de vegetación con respecto a las ANP del estado de Guerrero, México. Por otra parte, Chico et al. (2015) evaluaron los cambios de uso de suelo empleando ortofotos de los periodos 1994, 1999 y 2007 en El Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla, conocido como La Marquesa en la Ciudad de México. Asimismo, Rioja-Nieto et al. (2015) evaluaron el efecto del manejo en la reserva estatal El Palmar en la península de Yucatán mediante técnicas de percepción remota, basadas en el análisis jerárquico de características cualitativas del hábitat. Un caso similar, pero aplicando modelación geoespacial de variables agroecológicas y forestales, fue el de Villegas-Martínez (2021) en el Parque Otomí-Mexica del Estado de México.

deforestation (agriculture), illegal logging (charcoal production, cutting and firewood extraction) and forest fires, according to the most frequent answers to the survey. This study only shows the analysis from 1997 to 2016, so this dynamic is expected to be different in the last eight years.

Acknowledgements

The main author thanks to CONAHCYT for the scholarship granted for the completion of his master's studies. To the Universidad Autónoma Chapingo-División de Ciencias Forestales and the other authors who contributed to the research phase in the field and in the office to improve this paper. To the anonymous reviewers whose insightful suggestions helped improve this manuscript.

End of English version

References / Referencias

- Aguilar Sánchez, G., & Lara Aguazul, C. (2021). Recursos naturales y desarrollo en Amealco, Querétaro. In S. E. Martínez Pellegrini, J. F. Sarmiento Franco, & M. C. Valles Aragón (Eds.), *Aproximaciones teórico-metodológicas para el análisis territorial y el desarrollo regional sostenible* (vol. I). Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Investigaciones Económicas-Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional. <https://ru.iiec.unam.mx/5448/>
- Andam, K. S., Ferraro, P. J., Pfaff, A., Sanchez-Azofeifa, G. A., & Robalino, J. A. (2008). Measuring the effectiveness of protected area networks in reducing deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(42), 16089–16094. <https://doi.org/10.1073/pnas.0800437105>
- Blackman, A., Pfaff, A., & Robalino, J. (2015). Paper park performance: Mexico's natural protected areas in the 1990s. *Global Environmental Change*, 31, 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.12.004>
- Blankespoor, B., Dasgupta, S., & Wheeler, D. (2017). Protected areas and deforestation: new results from high-resolution panel data. *Natural Resources Forum*, 41(1), 55–68. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12118>
- Challenger, A., Dirzo, R., Semsarian, C., Richmond, D. R., Schwartz, K., Trent, R. J., Prince, R., Hospital, A., & Hospital, P. A. (2009). Tendencias de cambio y estado de la biodiversidad, los ecosistemas y sus servicios. In CONABIO (Ed.), *Capital natural de México* (vol. 2, pp. 37–73). <https://spc.conanp.gob.mx/FACTORES%20DE%20CAMBIO.pdf>
- Chico, M., Trinidad, M. Á., & Montoya, R. (2015). Evaluación del cambio de uso de suelo en el parque nacional “La Marquesa” (1994-2007), aplicando tecnología SIG. *Ciencias Espaciales*, 8(2), 243–258. <https://doi.org/10.5377/ce.v8i2.2080>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2018). *100 años de conservación en México: Áreas Naturales Protegidas de*

Conclusiones

De 1997 a 2016, los cambios en el uso de suelo y vegetación de la Zona Protectora Forestal de los ríos del sur de Querétaro muestran pérdidas en bosques de encino y la desaparición de los bosques de pino-encino, mientras que la vegetación secundaria arbustiva/bosque de encino, pastizal y agricultura aumentaron. Las tendencias mostraron que el bosque de pino-encino tuvo altas probabilidades de migrar o ser reemplazado por la vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino, mientras que el bosque de encino, a pesar de las pérdidas, tuvo altas probabilidades de permanecer. Por lo anterior se espera que, al aumentar la vegetación secundaria arbustiva, la vegetación arbórea también incrementa paulatinamente. Las posibles causas de cambio son de origen antrópico como la deforestación (agricultura), tala ilegal (producción de carbón, corte y extracción de leña) e incendios forestales, según las respuestas más frecuentes del cuestionario aplicado. El trabajo solo muestra el análisis de 1997 a 2016, por lo que esta dinámica se prevé sea diferente en los últimos ocho años.

Agradecimientos

A CONAHCYT por la beca otorgada para la culminación de estudios de maestría. A la Universidad Autónoma Chapingo-División de Ciencias Forestales y demás autores que contribuyeron a la fase de campo y gabinete en la mejora del trabajo. A los revisores anónimos que ayudaron a mejorar el manuscrito con sugerencias atinadas.

Fin de la versión en español

- México. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (1.ª ed.). <https://www.conanp.gob.mx/pdf/100AñosConservación.pdf>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2024). *Categorías de protección de las Áreas Naturales Protegidas federales*. www.gob.mx/semarnat/articulos/conoce-las-categorias-de-proteccion-de-las-areas-naturales-protegidas-federales
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2020). *Plataforma geoespacial de datos forestales*. <https://idefor.cnf.gob.mx/layers/?limit=30&offset=0>
- Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2021). *Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB)*. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- De Alba, C. F., Ceccon, E., Romero-Calcerrada, R., & Rosete-Vergés, F. (2020). Revisión sistemática de cuarenta años de análisis de cambio de uso del suelo en México mediante sistemas de información geográfica. *Revista de Geografía Espacios*, 10(20), 139–162. <https://doi.org/10.25074/07197209.20.1740>

- Ellis, E. A., Hernández-Gómez, I. U., & Romero-Montero, J. A. (2017). Los procesos y causas del cambio en la cobertura forestal de la península de Yucatán, México. *Ecosistemas*, 26(1), 101–111. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2017.26-1.16>
- Errejón, J. C., Ortega, A., & Santos, J. (2019). Programa Nacional para Áreas Naturales Protegidas en México en el periodo 2014–2018: análisis de dos de sus objetivos. *Sociedad y Ambiente*, 21(21), 33–51. <https://doi.org/10.31840/sya.v0i21.2038>
- ESRI (2011). *ArcGIS Desktop: Release 10*. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Farfán, G. M., Rodríguez-Tapia, G., & Mas, J. F. (2016). Análisis jerárquico de la intensidad de cambio de cobertura/uso de suelo y deforestación (2000–2008) en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, México. *Investigaciones Geográficas*, 90, 89–104. <https://doi.org/10.14350/rig.48600>
- Figuerola, F., Sánchez-Cordero, V., Illoldi-Rangel, P., & Linaje, M. (2011). Evaluation of protected area effectiveness for preventing land use and land cover changes in Mexico. Is an index good enough? *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(3), 951–963. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2011.3.768>
- Flores, N., Castro, I., & Aponte, H. (2020). Evaluación de las unidades de vegetación en Los Pantanos De Villa (Lima, Perú) mediante sistemas de información geográfica y teledetección. *Arnaldoa*, 27(1), 303–321. <https://journal.upao.edu.pe/index.php/Arnaldoa/article/view/1506>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (1996). *Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes*. <https://www.fao.org/3/w1358e/w1358e00.htm>
- González Medrano, F. (2003). *Las comunidades vegetales de México*. INE & SEMARNAT. https://www.academia.edu/7215597/Las_comunidades_vegetales_de_Mexico
- Google Earth. (2021). *Límites México-Querétaro*. Maxar Technologies. <https://earth.google.com/>
- Gutiérrez, P. J., Rocío, R., Andrea, O., & Álvarez, A. (2015). Justicia, justicia social y justicia ambiental: juntas son todo; separadas son nada. Caso comunidad Nhã-Nhũ Xajay-Querétaro (México). *Cuadernos Latinoamericanos*, 25(46), 79–103. <https://lc.cx/dpgrRa>
- Instituto Nacional de Información y Geografía (INEGI). (1997). *Carta de uso de suelo y vegetación serie I. Escala 1:250,000*. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#descargas>
- Instituto Nacional de Información y Geografía (INEGI). (2016). *Uso de suelo y vegetación*. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#descargas>
- Instituto Nacional de Información y Geografía (INEGI). (2020). *Conjunto de datos con los principales resultados por localidad (ITER) del Censo de Población y Vivienda, 2020*. <https://www.inegi.org.mx/app/descarga/ficha.html?tit=326108&ag=0&f=csv>
- Jiménez, C. L., Sosa, J., Cortés-Calva, P., Solís, A. B., Íñiguez, L. I., & Ortega-Rubio, A. (2014). México país megadiverso y la relevancia de las áreas naturales protegidas. *Investigación y Ciencia*, 22(60), 16–22. https://www.academia.edu/17888130/México_país_megadiverso_y_la_relevancia_de_las_áreas_naturales_protegidas
- León, A. C., Gómez, M. U., & Bueno, A. L. (2016). Diálogo del saber campesino y la investigación científica: árboles nativos dendroenergéticos en la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla, Morelos, México. *Revue d'Ethnoécologie*, 9, 1–12. <https://doi.org/10.4000/ethnoecologie.2493>
- Leopold, A. S. (1950). Vegetation zones of Mexico. *Ecology*, 31, 507–518. <https://doi.org/10.2307/1931569>
- Linares, G., Valera, M., & Millán, E. (2022). Mexico Markov chains in the analysis of land use change in Ixtapaluca, Mexico. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 13(1), 25–34. <https://www.executivebs.org/publishing.cl/avances-en-ciencias-e-ingenieria-vol-13-nro-1-ano-2022-articulo-3/>
- Miranda, J. J., Corral, L., Blackman, A., Asner, G., & Lima, E. (2016). Environment for development effects of protected areas on forest cover change and local communities: Evidence from the Peruvian Amazon. *World Development*, 78, 288–307, 40. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.10.026>
- 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 Bosques*, 23(1), 7–22. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2311482>
- Morales-Hernández, J. C., Carrillo-González, F. M., Farfán-Molina, L. M., & Cornejo-López, V. M. (2016). Vegetation change cover in the coastal region of Bahía de Banderas, Mexico. *Caldasia*, 38(1), 17–29. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v38n1.57831>
- Murillo, F. J., & Orozco, J. (2016). *El turismo alternativo en las áreas naturales protegidas*. Universidad de Guadalajara.
- Neri-Suárez, M. (2018). Análisis de vacíos y omisiones de conservación de las áreas naturales protegidas del estado de Guerrero, México. *Agro Productividad*, 11(10), 93–98. <https://doi.org/10.32854/agrop.v11i10.1251>
- Palacio-Prieto, J. L., Sánchez-Salazar, M. T., Casado Izquierdo, J. M., Propin Frejomil, E., Delgado Campos, J., Velázquez Montes, A., Chías Becerril, L., Ortiz Álvarez, I., González Sánchez, J., Negrete Fernández, G., Gabriel Morales, J., Márquez Huitzil, R., Niedo Manzano, T., Jiménez Rosenberg, R., Muñoz López, E., Ocaña Nava, D., Juárez Aguirre, E., Anzaldo Gómez, C., Hernández Esquivel, C.,... Camacho Ramírez, C. G. (2004). *Indicadores para la caracterización y el ordenamiento territorial* (1.ª ed.). UNAM-SEDESOL-SEMARNAT-INE. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/161/149/818-1>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>
- Rioja-Nieto, R., Moreno-Ruiz, J. A., & Gómez-Valdés, J. (2015). Efecto del manejo de un Área Natural Protegida en el paisaje del bosque de manglar en la Península de Yucatán. *Hidrobiológica*, 25(2), 203–211. <https://hidrobiologica.izt.uam.mx/index.php/revHidro/article/view/477>
- Secretaría de Agricultura y Fomento. (1941). *Decreto declarando Zona Protectora Forestal, los terrenos comprendidos dentro de las cuencas hidrográficas de los ríos San Ildefonso, Nado, Aculco y Arroyozarco*. México: Diario Oficial de la Federación (DOF). <https://www.dof.gob.mx/copias.php?acc=ajaxPaginas&paginas=4&seccion=PRIMERA&edicion=189728&ed=MATUTINO&fecha=04/11/1941>
- Shah, P., Baylis, K., Busch, J., & Engelmann, J. (2021). What determines the effectiveness of national protected area networks? *Environmental Research Letters*, 16(7), 12. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac05ed>

- Tesfaw, A. T., Pfaff, A., Golden, R. E., Qin, S., Medeiros, R., & Mascia, M. B. (2018). Land-use and land-cover change shape the sustainability and impacts of protected areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(9), 2084–2089. <https://doi.org/10.1073/pnas.1716462115>
- Villegas-Martínez, D. (2021). Determinación del uso potencial del suelo a partir de la modelación geoespacial de variables agroecológicas y forestales de un área de protección ambiental ubicada en la Región Centro-Sur de México. *Acta Universitaria*, 31, 1–17. <https://doi.org/10.15174/au.2021.3049>
- Von, J. J., Laborde, J., Guevara, S., & Mokondoko-Delgadillo, P. (2020). Revista Mexicana de Biodiversidad vegetal en la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas (2006-2016). *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 91. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.3190>

Appendix 1. Tabulated transition matrix of land use and vegetation losses and gains (Pontius et al., 2004). Interaction of time 1 and time 2 between LuV areas (P11...P33), total sum of time 1 (P1+... P3+), total sum of time 2 (P+1... P+3), total area (1), losses (P1+ - P11... P3+ - P33), gains (P+1 - P11... P+3 - P33),

Apéndice 1. Matriz de transición tabulada de pérdidas y ganancias de usos de suelo y vegetación (Pontius et al., 2004). Interacción del tiempo 1 y el tiempo 2 entre superficies de los USV (P11...P33), suma total del tiempo 1 (P1+... P3+), suma total del tiempo 2 (P+1... P+3), superficie total (1), pérdidas (P1+ - P11... P3+ - P33), ganancias (P+1 - P11... P+3 - P33),

		Time 2/Tiempo 2			Total	Losses/Pérdidas
		Category 1/ Categoría 1	Category 2/ Categoría 2	Category 3/ Categoría 3	Time 1/ Tiempo 1	
Time 1/Tiempo 1	Category 1/ Categoría 1	P11	P12	P13	P1+	P1+ - P11
	Category 2/ Categoría 2	P21	P22	P23	P2+	P2+ - P22
	Category 3/ Categoría 3	P31	P32	P33	P3+	P3+ - P33
Total	Time 2/ Tiempo 2	P+1	P+2	P+3	1	
Gains/Ganancias	P+1 - P11	P+2 - P22	P+3 - P33			

Appendix 2. Identification of values for the transition matrix (Pontius et al., 2004) of land use and vegetation (LuV) in the Forest Protected Area of the southern rivers of Querétaro. LuV changes based on four categories (Palacio-Prieto et al. (2004): No change (gray), forest loss (orange), replacement vegetation (blue) and productive activity (pink).

Apéndice 2. Identificación de los valores para la matriz de transición (Pontius et al., 2004) de usos de suelo y vegetación (USV) en la Zona Protectora Forestal de los ríos del sur de Querétaro. Cambios de USV con base en cuatro categorías (Palacio-Prieto et al. (2004): Sin cambio (gris), pérdida forestal (naranja), vegetación de reemplazo (azul) y actividad productiva (rosa).

Final year / Año final											
LuV / USV			IG / PI	IGWE / PICE	A	SSvPQF / VSaBPQ	SSvQF / VsaBQ	PQF / BPQ	PF / BP	QPF / BQP	QF / BQ
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Initial year / Año inicial	IG / PI	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	IGWE / PICE	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
	A	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
	SSvPQF / VsaBPQ	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
	SSvQF / VsaBQ	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
	PQF / BPQ	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
	PF / BP	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
	QPF / BQP	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89
	QF / BQ	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99

IP: induced pastureland; IPWE: induced pastureland with erosion; A: agriculture; SSv/PQF: shrub secondary vegetation of pine-oak forest; SSv/QF: shrub secondary vegetation of oak forest; QPF: oak-pine forest (according to INEGI, 1997); PF: pine forest; PQF: pine-oak forest (according to Leopold, 1950) and QF: oak forest (González Medrano, 2003).

PI: pastizal inducido; PICE: pastizal inducido con erosión; A: agricultura; Vsa/BQP: vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino; Vsa/BQ: vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino; BQP: bosque de encino-pino (según INEGI, 1997); BP: bosque de pino; BPQ: bosque de pino-encino (según Leopold, 1950) y BQ: bosque de encino (González, 2003).

Appendix 3. Survey model applied in 94 households in five localities of the Forest Protected Area of the southern rivers of Querétaro.

Apéndice 3. Modelo de cuestionario aplicado en 94 hogares de cinco localidades de la Zona Protectora Forestal de los ríos del sur de Querétaro.

QUESTIONNAIRE FOR THE RESIDENTS OF SAN ILDEFONSO (FOUR SECTIONS) AMEALCO, QUERÉTARO / CUESTIONARIO PARA POBLADORES DE SAN ILDEFONSO (CUATRO BARRIOS) AMEALCO, QUERÉTARO			
INTERVIEWER'S NAME: / NOMBRE DEL ENCUESTADOR: SILVIA PASCUAL HERNÁNDEZ		Date: / Fecha:	
Interviewee's Name (optional): / Nombre del encuestado (opcional):			
Age: / Edad:	Residence: / Residencia:	Years of residence: / Años de residencia:	
1. What is your occupation? / ¿Cuál es su ocupación?			
a) Livestock Farmer / Ganadero ☐			
Livestock feeding / Alimentación del ganado			
Grazing / Pastoreo	Forage and grains / Forrajes y granos	Other / Otros	
b) Farmer / Agricultor ☐			
Type of grain / Tipo de grano			
☐ Maize / Maíz	☐ Beans / Frijol	☐ Other / Otros	
Area of cultivation: / Hectáreas de siembra: hectares / hectáreas			
Land / Terreno			
Private / Privado			
2. Which fuel do you use the most for cooking or heating your food? / ¿Qué combustible usa más para cocinar o calentar sus alimentos?			
☐ LP gas / Gas LP	☐ Firewood / Leña	☐ Charcoal / Carbón	☐ Other / Otro
COMMUNITY ISSUES REGARDING CERRO ÑADO IN SAN ILDEFONSO AMEALCO, QUERÉTARO / PROBLEMAS DE LA COMUNIDAD CON RESPECTO AL CERRO ÑADO DE SAN ILDEFONSO AMEALCO, QUERÉTARO			
3. Illegal logging / Tala ilegal			
Have you ever reported a case of illegal logging? / ¿Ha denunciado algún caso de tala ilegal?	a) Yes, I have / Si Date: / Fecha:	b) No	
4. Firewood extraction / Extracción de leña			
Have you ever reported any cases of firewood extraction? / ¿Ha denunciado algún caso de extracción de leña?	a) Yes, I have / Si Date: / Fecha:	b) No	
5. Fires / Incendios			
Have you ever reported a forest fires? / ¿Ha denunciado algún incendio forestal?	a) Yes, I have / Si Date: / Fecha:	b) No	
6. Charcoal production / Producción de carbón			
Have you ever seen or reported coal production on or near Cerro Ñado? / Ha observado o denunciado la producción de carbón en el cerro Ñado o cercano	a) Yes, I have / Si Date: / Fecha:	b) No	