



Spatiotemporal analysis (1971–2021) of forest cover conservation status in the Nevado de Toluca Protected Area, Mexico

Análisis espacio temporal (1971-2021) del estado de conservación de la cobertura forestal del área protegida Nevado de Toluca, México

Parix L. Luna Palacios^{1*}; Salvador Adame-Martínez²;
Jesús G. Gutiérrez-Cedillo³; Noel B. Pineda-Jaimes³

¹Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Química. Paseo Colón s/n, Residencial Colón y col. Ciprés. C. P. 50120. Toluca de Lerdo, México.

²Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Planeación Urbana y Regional. Mariano Matamoros casi esquina, Av. Paseo Tollocan. C. P. 50130. Toluca de Lerdo, México.

³Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Geografía. Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria. C. P. 50110. Toluca de Lerdo, México.

*Corresponding author: proyecx@gmail.com; tel.: +52 722 311 2016.

Abstract

Introduction. The assessment of forest cover and the outcomes of its management within protected natural areas is essential for determining the effectiveness of implemented initiatives.

Objective. To analyze the transitions and dynamics of forest cover and land use in the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area (APFFNT) during the period 1971–2021, with the aim of evaluating its conservation status.

Materials and methods. Forest cover in the APFFNT (53590.67 ha) was analyzed using geographic information systems by comparing satellite imagery from two time periods. Changes were evaluated using the Pontius methodology through a transition matrix for the period, which facilitated the quantification of total area, gains, losses, transitions between categories, overall change, and net change.

Results and discussion. Over the past 50 years, coniferous forest cover – primarily composed of *Pinus hartwegii* Lindl. and *Juniperus deppeana* Steud. – increased by 3577 ha (6.67 % of the total area of the APFFNT). This gain originated mainly from grassland areas, which showed a decline in their original extent, with a change rate of -1.26 %. Human settlements expanded by 148.92 ha (0.28 %). Additionally, the presence of a sand mine of approximately 15 ha was detected within the protected natural area.

Conclusion. The analysis of the APFFNT reflects the land use changes that occurred over the 50-year period between 1971 and 2021. While the changes are not considered extreme, there is a clear trend toward landscape transformation.

Keywords: protected natural area, coniferous forest, sand mine, grassland, land use

Resumen

Introducción. La evaluación de la cobertura forestal y los resultados de su gestión en las áreas naturales protegidas es esencial para determinar la eficacia de las iniciativas implementadas.

Objetivo. Analizar las transiciones y dinámicas de coberturas forestales y uso de suelo en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT) en el periodo 1971-2021, con el propósito de conocer el estado de su conservación.

Materiales y métodos. La cobertura forestal del APFFNT (53590.67 ha) se analizó con sistemas de información geográfica, mediante la comparación de imágenes de dos tiempos. Los cambios se compararon empleando la metodología de Pontius, a través de un matriz del periodo que permitió visualizar los totales, ganancias, pérdidas, intercambios, cambio total y cambio neto.

Resultados y discusión. En 50 años, la cobertura arbórea de coníferas, compuesta principalmente de *Pinus hartwegii* Lindl. y *Juniperus deppeana* Steud., creció 3577 ha (6.67 % del área total del APFFNT). Este incremento provino del pastizal que experimentó pérdida en su cobertura inicial con una tasa de cambio de -1.26 %. Los asentamientos humanos aumentaron 148.92 ha (0.28 %). Por otra parte, se observó la presencia de una mina de arena de aproximadamente 15 ha dentro del área natural protegida.

Conclusión. El análisis del APFFNT refleja los cambios en el uso del suelo ocurridos en los 50 años comprendidos entre 1971 y 2021. Aunque los cambios en la zona no son de carácter extremo, se observa una tendencia clara hacia la transformación del paisaje.

Palabras clave: área natural protegida, bosque de coníferas, mina de arena, pastizal, uso de suelo.

Please cite this article as follows (APA 7): Luna Palacios, P. L., Adame-Martínez, S., Gutiérrez-Cedillo, J. G., & Pineda-Jaimes, N. B. (2025). Spatiotemporal analysis (1971–2021) of forest cover conservation status in the Nevado de Toluca Protected Area, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 31, e24023. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2024.06.023>



Introduction

Protected areas are designated to conserve forest ecosystems and their associated biodiversity. These areas not only preserve species and biodiversity but also ensure the regeneration of natural resources that depend on forested environments. Over time, some of these areas develop into enduring landscapes that contribute to ecological stability, while others require adaptive management to address ongoing changes and threats—such as deforestation or degradation—thus ensuring the long-term preservation of forests and their ecological functionality.

Anthropogenic intervention is one of the main causes of the decline in native flora and fauna species, as well as forest fragmentation resulting from road construction, which disrupts habitat connectivity and reduces the functionality of ecological niches (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [CONANP], 2023).

Monitoring protected areas plays a critical role in supporting the design and implementation of public policies in the forestry sector, as well as in decision-making processes related to conservation, protection, restoration, and the promotion of sustainable forest ecosystem management (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2023). In addition, documenting historical changes in land use and vegetation patterns is essential, as it provides a crucial temporal context for ecological studies and informs conservation policy decisions (Duarte et al., 2016; Gordillo-Ruiz & Castillo-Santiago, 2016; Hernández-Cavazos et al., 2023).

Remote sensing technologies enable the accurate quantification and spatial mapping of forest distribution by producing highly reliable vegetation indices for estimating forest cover (Lumbres & Lee, 2014). To enhance the consistency and comparability of change analyses over time, it is essential to standardize land cover classification systems. Such standardization supports the development of consistent maps across different time periods, thereby improving the precision and reliability of assessments related to landscape transformation processes (Duarte et al., 2016).

Assessing land cover changes and current conditions over a specific time period allows for the identification of losses or gains in natural cover and provides key insights into the state of conservation. Land cover and land use change analysis is a widely used tool in studies of deforestation, environmental degradation, biodiversity loss, and alterations to the hydrological cycle (Pontius & Petrova, 2010; Wang et al., 2021). The significance of this type of analysis lies in its ability to quantify transformations and project future scenarios

Introducción

Las áreas de protección son establecidas con fines de conservación de los bosques y sus ecosistemas. Estas zonas no solo preservan especies y la biodiversidad, sino que también garantizan la regeneración de los recursos naturales que dependen de los bosques. Con el tiempo, algunas de estas zonas generan paisajes duraderos que contribuyen a la estabilidad ecológica, mientras que otras requieren una gestión adaptativa para enfrentar los cambios y amenazas, como la deforestación o la degradación, asegurando así la preservación de los bosques y su funcionalidad a largo plazo.

La intervención antrópica representa una de las causas principales de la disminución de especies nativas de flora y fauna, así como de la fragmentación del bosque debido a la apertura de caminos, lo que afecta la conectividad entre hábitats y reduce la funcionalidad de los nichos ecológicos (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [CONANP], 2023).

El monitoreo de las áreas protegidas desempeña un papel crucial como respaldo del diseño e implementación de políticas públicas en el sector forestal, así como en la toma de decisiones relacionadas con la conservación, protección, restauración y promoción del manejo sustentable de los ecosistemas forestales (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2023). Por otro lado, la documentación de los cambios históricos en los modelos de uso de suelo y vegetación es importante, ya que proporciona un contexto temporal crucial para los estudios ecológicos y para la toma de decisiones en políticas de conservación (Duarte et al., 2016; Gordillo-Ruiz & Castillo-Santiago, 2016; Hernández-Cavazos et al., 2023).

La cuantificación y cartografía de la distribución de los bosques mediante sensores remotos permite la generación de índices de vegetación altamente confiables para la estimación de la cobertura forestal (Lumbres & Lee, 2014). En este contexto, es necesaria la estandarización de las clasificaciones de cobertura que faciliten la comparación equitativa de los cambios y la elaboración de cartografía correspondiente a varios momentos, lo que a su vez genera un análisis más preciso y confiable de los procesos de transformación (Duarte et al., 2016).

La evaluación de los cambios y la condición actual en un período específico permite determinar la existencia de pérdidas o aumentos en las coberturas naturales y proporciona información clave sobre el estado de conservación. El análisis del cambio en la cobertura y el uso del suelo es una herramienta utilizada ampliamente en estudios sobre deforestación, degradación ambiental y alteraciones en la biodiversidad terrestre y ciclo hidrológico (Pontius & Petrova, 2010; Wang et al., 2021). La relevancia del análisis radica en la posibilidad

based on historical records (Sánchez-Reyes et al., 2017). To ensure accurate interpretation, it is important to distinguish between land cover and land use. These concepts together offer a more precise understanding of the spatial configuration of a given territory. Land cover refers to the biophysical elements present on the Earth's surface, such as vegetation, water bodies, or urban areas, whereas land use relates to the human activities that alter or maintain that cover for productive, residential, or recreational purposes (Hernández-Cavazos et al., 2023; Pineda Jaimes et al., 2009; Sandoval-García et al., 2021).

The Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area (APFFNT) is part of the conservation area system of Estado de México. The region is surrounded by communities undergoing continuous urban expansion, land use changes, and different forms of forest management (CONAFOR, 2023). These environmental and social dynamics have influenced conservation strategies and are particularly reflected in the change to the area's management category – from its designation as a national park in 1936 to its reclassification as a flora and fauna protection area in 2014 (Olvera & Pichardo, 2017). Therefore, analyzing this area is essential to determine whether the protection and conservation goals have been met within its boundaries. In this context, the objective of the present study was to analyze the transitions and dynamics of forest cover and land use in the APFFNT for the period 1971–2021.

Materials and methods

The study area is located in Estado de México and is one of the 97 Natural Protected Areas (NPAs) of the entity, covering a total area of 53590.67 ha. Currently, the area is managed by the Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna (CEPANAF, 2022).

Cartographic information on land use and vegetation was obtained through the photointerpretation of aerial images, enabling the classification of forest cover and land use based on the land use maps from the INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2023) and the classification system proposed by Miranda and Hernández (1963).

Digital files and the final analysis were generated using geographic information systems, following the methodological framework outlined in Figure 1.

The process of gathering and compiling information is often complicated, notably when it requires consistency with existing maps. A critical issue when comparing multiple datasets or studies is the spatial resolution or scale of cartographic materials, which is

de cuantificar transformaciones y proyectar escenarios a partir de registros históricos (Sánchez-Reyes et al., 2017). Para ello, es importante diferenciar entre cobertura y uso del suelo; ambos conceptos permiten una comprensión más precisa de la configuración espacial del territorio. La cobertura hace referencia a los elementos biofísicos en la superficie terrestre como vegetación, cuerpos de agua o áreas urbanas, mientras que el uso del suelo se relaciona con las actividades humanas que modifican o mantienen esa cobertura, de acuerdo con fines productivos, habitacionales y recreativos (Hernández-Cavazos et al., 2023; Pineda Jaimes et al., 2009; Sandoval-García et al., 2021).

El Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT) forma parte del sistema de áreas de conservación del Estado de México. La zona está rodeada de localidades que atraviesan procesos constantes de crecimiento urbano, cambios en el uso del suelo y varios tipos de manejo forestal (CONAFOR, 2023). Esta dinámica ambiental y social ha influido en las estrategias de conservación y se ha reflejado especialmente en la modificación de su categoría de manejo, ya que inició como parque nacional en 1936 y se convirtió en área de protección de flora y fauna en 2014 (Olvera & Pichardo, 2017). Por ello, es fundamental el análisis de esta área, para determinar si se han cumplido las metas de protección y conservación dentro de sus límites. En este contexto, el objetivo del presente estudio fue analizar las transiciones y dinámicas de coberturas forestales y uso de suelo en el APFFNT en el período 1971-2021.

Materiales y métodos

El área de estudio se encuentra en el Estado de México y forma parte de las 97 Áreas Naturales Protegidas (ANP) de la entidad, con una extensión total de 53590.67 ha; actualmente, el área es administrada por la Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna (CEPANAF, 2022).

La información cartográfica sobre el uso de suelo y la vegetación de la zona se obtuvo a través de la fotointerpretación de imágenes aéreas, lo que permitió la clasificación de las coberturas forestales y los usos del suelo, con base en las cartas de uso de suelo del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2023) y en la clasificación propuesta por Miranda y Hernández (1963).

Los archivos digitales y el análisis final se obtuvieron mediante el uso de sistemas de información geográfica, conforme al esquema metodológico presentado en la Figura 1.

La obtención y recopilación de información presenta diversas complicaciones, especialmente cuando busca apegarse a la cartografía existente. Una de las principales dificultades al comparar varios insumos

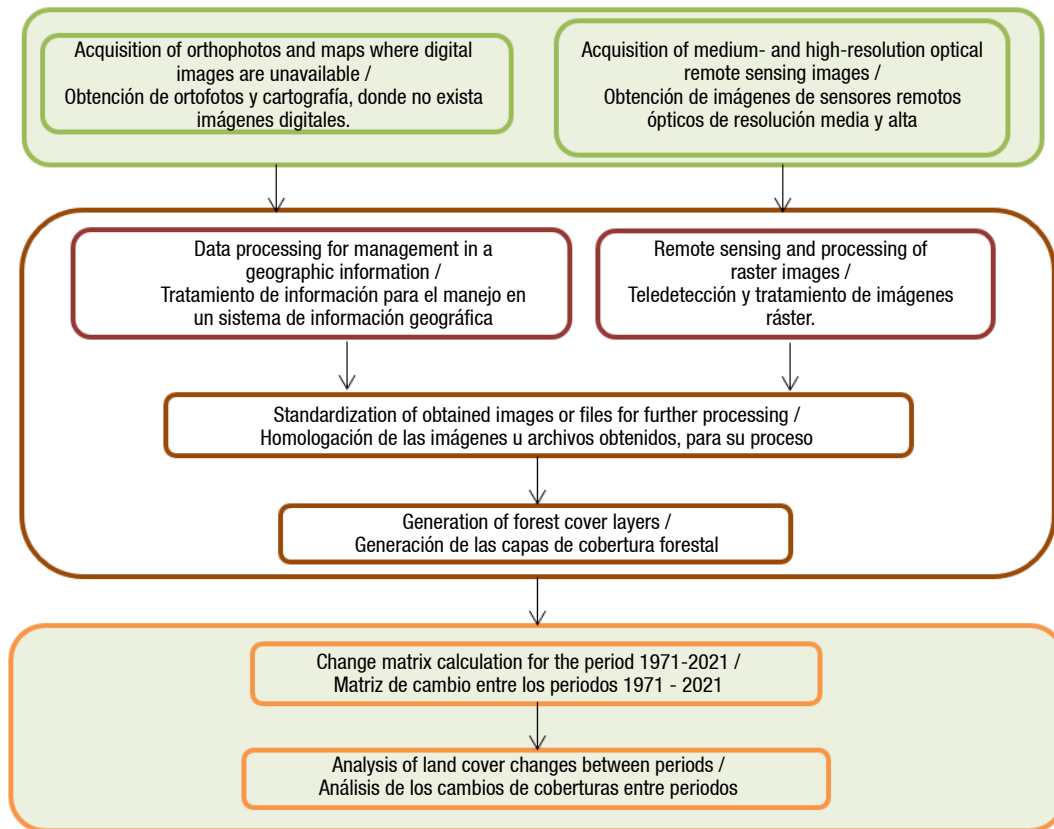


Figure 1. Methodological framework applied in the study area for the assessment of land cover and land use changes.
Source: Compiled by the authors.

Figura 1. Esquema metodológico aplicado en el área de estudio para la evaluación de cambios de cobertura y usos de suelo.
Fuente: Elaboración propia.

fundamental for temporal comparison. Occasionally, it is advantageous to produce information from original data sources.

In this study, new cartography was developed using satellite images and aerial photographs of the area, employing remote sensing techniques. Several studies have demonstrated that image classification is an effective tool for generating spatial data, as it provides accurate and reliable information (He et al., 2021; Li et al., 2021; Wang et al., 2021).

For the year 1971, cartography was created through photointerpretation of aerial images obtained from INEGI (2023b), while for 2021, Sentinel-2 images were utilized. The Sentinel images were processed using Erdas Imagine 2015 software with a supervised classification method based on the Maximum Likelihood algorithm (Duarte et al., 2016). Subsequently, land cover and land use were classified according to the system proposed by Miranda and Hernández (1963) and the land use and vegetation map from INEGI (2023b). For the study area, nine classes were generated: agricultural land, water bodies, coniferous forest 1 (*Abies religiosa* [Kunth] Schltdl. & Cham., *Pseudotsuga*

o trabajos de investigación es la resolución espacial o la escala de la cartografía, la cual resulta crucial para realizar comparaciones temporales. En ocasiones es más conveniente generar la información a partir de insumos primarios.

En este estudio se elaboró una nueva cartografía a partir de imágenes satelitales y fotografías aéreas de la zona, utilizando métodos de teledetección. Diversas investigaciones han demostrado que la clasificación de imágenes constituye una herramienta eficaz para la generación de insumos espaciales, ya que proporciona datos precisos y confiables (He et al., 2021; Li et al., 2021; Wang et al., 2021).

Para el año de 1971 se optó por generar la cartografía de origen por medio de la fotointerpretación de imágenes aéreas obtenidas del INEGI (2023b), mientras que el año 2021 se trabajó con imágenes Sentinel-2. Las imágenes Sentinel se trataron en el *software* Erdas Image 2015 con el método de clasificación supervisada, mediante el algoritmo 'Maximum Likelihood' (Duarte et al., 2016). Después, las coberturas y los usos de suelo se clasificaron con base en la clasificación de Miranda y Hernández (1963) y en la carta de uso de

menziesii [Mirb.] Franco, and *Cedrus* sp. Trew), coniferous forest 2 (*Pinus hartwegii* Lindl. and *Juniperus deppeana* Steud.), bare soil, sand mine areas, grassland, alpine grassland, and human settlements (INEGI, 2023a).

The second map was produced through the photointerpretation of aerial images from 1971 flight missions. These images were corrected and processed using Agisoft software (2023) to generate a composite image of the study area. This image was then digitized in QGIS (2023) based on the previously mentioned classification schemes and exported in TIF format. Spectral signatures were verified using ground-truth sampling points, supplemented with data from the Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2023) plant species database. Subsequently, the results were refined using satellite imagery available via Google's web-based image service (2023), corresponding to the year of study. Finally, the processed image was converted to a TIF file, from which a 1:10,000-scale map of the study area was generated. Before importing the data, a topological cleaning process was performed to eliminate digitization errors or overlaps between land cover classes (Cooper et al., 2021; He et al., 2021; Li et al., 2021).

Following the standardization of the files, an overlay analysis was performed using the TerrSet software (Clark Labs, 2020), specifically employing the Land Change Modeler module to compare two images and assess spatial overlap. Additionally, a CrossTab analysis was conducted using data from the two study periods to generate raw data for a land use change matrix, based on the methodology proposed by Pontius et al. (2004). This matrix produces a cross-tabulation of values, from which formulas were used to identify losses, gains, swaps, total change, and net change, as well as their respective rates of change.

The rate of change (rc , %) is a key indicator used to measure both the magnitude and speed of landscape transformations. Its analysis is essential for understanding the dynamics, proportions, and potential impacts of territorial change (Velázquez et al., 2002). The rc was quantified by analyzing vegetation cover dynamics in relation to space and time. The Food and Agriculture Organization of the United Nations and the United Nations Environment Programme (FAO & PNUMA, 2020) propose the following formula to express the percentage change relative to the area in the initial year:

$$rc = [(S2/S1) (1/t)] * 100$$

where,

$S1$ = area at the initial date (ha)

$S2$ = area at the final date (ha)

t = number of years between the initial and final dates

suelo y vegetación del INEGI (2023b). Así, para el área de estudio, se generó una clasificación de nueve clases: agrícola, agua, bosque de coníferas 1 (*Abies religiosa* [Kunth] Schltdl. & Cham., *Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco y *Cedrus* sp. Trew), bosque de coníferas 2 (*Pinus hartwegii* Lindl. y *Juniperus deppeana* Steud.), suelo desprovisto de vegetación, mina de arena, pastizal, pastizal alpino y asentamientos humanos (INEGI, 2023a).

El segundo mapa se hizo mediante fotointerpretación de imágenes aéreas de los vuelos del año 1971, mismas que se corrigieron y procesaron en el software Agisoft (2023), para así generar una imagen del área de estudio. Esta a su vez se digitalizó en el programa QGIS (2023) con base en las clasificaciones ya antes mencionadas y se importó a un formato TIF. Las firmas espectrales se comprobaron con puntos de muestreo obtenidos en campo, complementados con información de la base de datos de especies vegetales de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2023). Posteriormente, los resultados se afinaron mediante un servidor web de imágenes satelitales del servicio de Google (2023) correspondientes al año de estudio. Finalmente, la imagen se transformó a un archivo TIF y con base en esto se generó una cartografía de la zona de estudio a escala 1:10000. Previo a la importación, se hizo un proceso de limpieza topológica de las imágenes para eliminar errores de digitalización o sobreposición con otras coberturas (Cooper et al., 2021; He et al., 2021; Li et al., 2021).

Después de la homologación de archivos se hizo un análisis de sobreposición con el programa TerrSet (Clark Labs, 2020) para la comparación entre dos imágenes por medio del módulo 'Land Change Modeler' y con ello obtener un análisis de la superposición de la información. Igualmente se hizo un 'CrossTab' con la información de dos tiempos estudiados, para así tener los datos crudos y crear una matriz de cambios de uso de suelo basada en la metodología de Pontius et al. (2004). Esta matriz genera una tabulación cruzada de datos, donde por medio de fórmulas se identificaron las pérdidas, ganancias, intercambios, cambio total y cambio neto, así como su tasa de cambio.

La tasa de cambio (tc , %) es un indicador clave para medir la magnitud y la velocidad de las transformaciones. Su análisis resulta fundamental para comprender la dinámica, proporción y posibles impactos del cambio en el territorio (Velázquez et al., 2002). La tc se cuantificó mediante el análisis de la dinámica de la cubierta vegetal relacionándola con el espacio y el tiempo. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (FAO & PNUMA, 2020) proponen la siguiente fórmula que expresa el cambio en porcentaje de la superficie del año inicial:

Traditionally, the location and quantification of land use changes are carried out through cartographic overlay and the generation of a transition matrix. This process produces maps and data that enable the identification of the magnitude and spatial distribution of land cover change dynamics.

Pontius et al. (2004) proposed a transition matrix-based method that analyzes land cover changes from a general level down to more detailed categories. This approach breaks down observed changes into categories such as gains, losses, swaps, persistence, net change, and total change, thereby facilitating comparison and evaluation of the degree of land cover persistence over time. Based on the identified changes, it is also possible to determine whether the gains and losses follow a random pattern. This is assessed by calculating the difference between the observed and expected percentages, as well as the magnitude ratio. A positive difference indicates that land cover categories at time 1 (t_1) experienced greater-than-expected losses under a random process, while a negative difference suggests lower-than-expected losses (Pontius et al., 2004).

The transition matrix numerically represents the changes that occurred during the study period, expressed in relative values corresponding to the percentage of each land cover category and its transitions to other categories. This is achieved by comparing the original area from the initial date with the area observed on the final date, along with their respective transitions, as described by Bocco et al. (2001).

One of the change indices proposed by Pontius et al. (2004) is gain (G_{ij}), which indicates the proportion of the landscape that experienced an increase between the initial time (t_1) and the final time (t_2). Gain is calculated as the difference between the total area of a category at t_2 (P_{+j}) and its persistence (P_{jj}), where persistence refers to the area of each land cover class that remained unchanged over the study period. These persistent values are located along the main diagonal of the transition matrix.

$$G_{ij} = P_{+j} - P_{jj}$$

Loss (L_{ij}) represents the proportion of the landscape that decreases between two time periods and is calculated from the difference between the total row of t_1 (P_{j+}) and the persistence value (P_{jj}) (Pontius et al., 2004).

$$L_{ij} = P_{j+} - P_{jj}$$

Swap (S_j) between categories is a concept that simultaneously involves both gain and loss of a land-use category over a given land cover. It occurs when the

$$tc = [(S_2/S_1) (1/t)] * 100$$

donde,

S_1 = superficie en la fecha inicial (ha)

S_2 = superficie en la fecha final (ha)

t = diferencia de años entre fecha inicial y final

Tradicionalmente, la localización y cuantificación de los cambios de uso del suelo se hacen a través de una sobreposición cartográfica y una matriz de transición, generando de esta manera mapas y datos que permiten la identificación de la magnitud y distribución espacial de la dinámica del cambio.

Pontius et al. (2004) propusieron un método basado en matrices de transición que analiza los cambios en la cobertura del suelo de un nivel general hasta llegar a un nivel más detallado. Este enfoque descompone los cambios observados en categorías como ganancias, pérdidas, intercambios, persistencias, cambio neto y cambio total, lo que facilita la comparación y evaluación del grado de persistencia de las coberturas a lo largo del tiempo. A partir de los cambios identificados, es posible determinar si las ganancias y pérdidas responden a un patrón aleatorio. Esto se realiza mediante el cálculo de la diferencia entre el porcentaje observado y el esperado, así como el cociente de magnitud. Si dicha diferencia es positiva, las categorías del tiempo 1 (t_1) experimentan pérdidas mayores que las esperadas bajo un proceso aleatorio; si es negativa, las pérdidas son menores que las esperadas (Pontius et al., 2004).

La matriz de transición muestra numéricamente los cambios que existen en el período estudiado, expresados en valores relativos que corresponden al porcentaje de cada una de las categorías y su condición de cambio ante otras categorías. Esto se logra mediante la comparación de la superficie original de la primera fecha con la obtenida para la nueva fecha con sus respectivas transiciones, de acuerdo con lo mencionado por Bocco et al. (2001).

Uno de los índices de cambio propuestos por Pontius et al. (2004) representa la ganancia (G_{ij}), que indica la proporción del paisaje que experimenta un aumento entre la fecha inicial (t_1) y la fecha final (t_2). La ganancia se obtiene de la diferencia entre el total del t_2 (P_{+j}) y la persistencia (P_{jj}) que es la cantidad de superficie de las diversas clases que se mantuvieron estables durante los tiempos estudiados y se pueden obtener a partir de la diagonal principal de la matriz.

$$G_{ij} = P_{+j} - P_{jj}$$

La pérdida (L_{ij}) representa la proporción del paisaje que decrece entre ambas fechas y se obtiene de la diferencia entre la fila del total del t_1 (P_{j+}) y la persistencia (P_{jj}) (Pontius et al., 2004).

spatial location of a land-use category changes between two dates while its overall area remains constant. Therefore, for every unit of gain in one category, there is an equivalent amount of loss in another. Swap is calculated as twice the minimum value between the gains and losses (Pontius et al., 2004).

$$Sj = 2 \times \text{MIN} (Pj+ - Pjj, P+j - Pjj)$$

Total change (DTj) is defined as the sum of all proportions of the landscape that changed, whereas net change (Dj) refers to the definitive change in the landscape. It represents the difference between total change and swap, expressed in absolute values (Pontius et al., 2004).

$$DTj = (Gij + Lij)$$

$$Dj = |DTj - Sj|$$

Results and discussion

The first phase of the results involved the development of two maps corresponding to the years 1971 and 2021 (Figure 2), with the objective of comparing changes in vegetation cover and generating the land-use change matrix (Table 1). These maps classified nine types of land cover, enabling precise categorization and detailed analysis of tree vegetation, specifically within the APFFNT study area. The maps not only reflect vegetation dynamics but also serve as a foundation for generating the necessary inputs for an in-depth analysis of land use and forest cover in the region.

This methodological approach, based on the use of satellite imagery and photointerpretation, is similar to that used by Hernández-Pérez et al. (2022) in their study on land-use change in Veracruz, where maps from different dates were also employed to assess landscape transformation.

After generating the land cover classifications for the study area, transition matrices were constructed for each period with the aim of quantifying exchange trends among categories and characterizing the spatial and temporal patterns of landscape transformation. Each interval showed particular dynamics, such that each land cover type demonstrated specific behavior both in general terms and in the detailed analysis of observed trends. Within this framework, Table 1 summarizes the information related to persistence and transitions of the land covers. The values located along the main diagonal represent the persistence of each category, while the remaining cells reflect conversions and exchange flows between different land uses. Notably, the swap between coniferous forest and agricultural and grassland areas increased

$$Lij = Pj+ - Pjj$$

El intercambio (Sj) entre categorías es un concepto que involucra simultáneamente ganancia y pérdida de una categoría de ocupación sobre una cobertura. Este se da cuando la localización de una categoría de ocupación cambia entre dos fechas, mientras su superficie permanece constante; por tanto, para cada unidad de ganancia de una categoría hay una misma cantidad de pérdida para otra. Esta se calcula como dos veces el valor mínimo de las ganancias y las pérdidas (Pontius et al., 2004).

$$Sj = 2 \times \text{MIN} (Pj+ - Pjj, P+j - Pjj)$$

El cambio total (DTj) es definido como la suma de todas las proporciones del paisaje que cambiaron, mientras que el cambio neto (Dj) indica cambio definitivo sobre el paisaje y representa la diferencia entre el cambio total y el intercambio, dada en valores absolutos (Pontius et al., 2004).

$$DTj = (Gij + Lij)$$

$$Dj = |DTj - Sj|$$

Resultados y discusión

La primera fase de los resultados consistió en la elaboración de dos mapas correspondientes a 1971 y 2021 (Figura 2) con el objetivo de comparar los cambios en la cobertura vegetal y obtener la matriz de cambio de uso de suelo (Cuadro 1). En estos mapas se clasificaron nueve tipos de coberturas, lo que permitió una categorización precisa y un análisis detallado de la vegetación arbórea, específicamente para el área de estudio del APFFNT. Los mapas no solo reflejan la dinámica de la vegetación, sino que también sirven como base para la creación de los insumos necesarios para un análisis profundo sobre el uso del suelo y las coberturas forestales en la región.

Este enfoque metodológico, basado en el uso de imágenes satelitales y la fotointerpretación, es similar al utilizado por Hernández-Pérez et al. (2022) en su estudio sobre el cambio de uso de suelo en Veracruz, donde también empleó mapas de fechas distintas para evaluar la transformación del paisaje.

Una vez generadas las coberturas de la zona de estudio, se construyeron matrices de transición para cada periodo con el objetivo de cuantificar las tendencias de intercambio entre categorías y caracterizar los patrones espaciales y temporales de transformación del paisaje. Cada intervalo presentó dinámicas particulares, de manera que cada tipo de cobertura mostró un comportamiento específico, tanto en

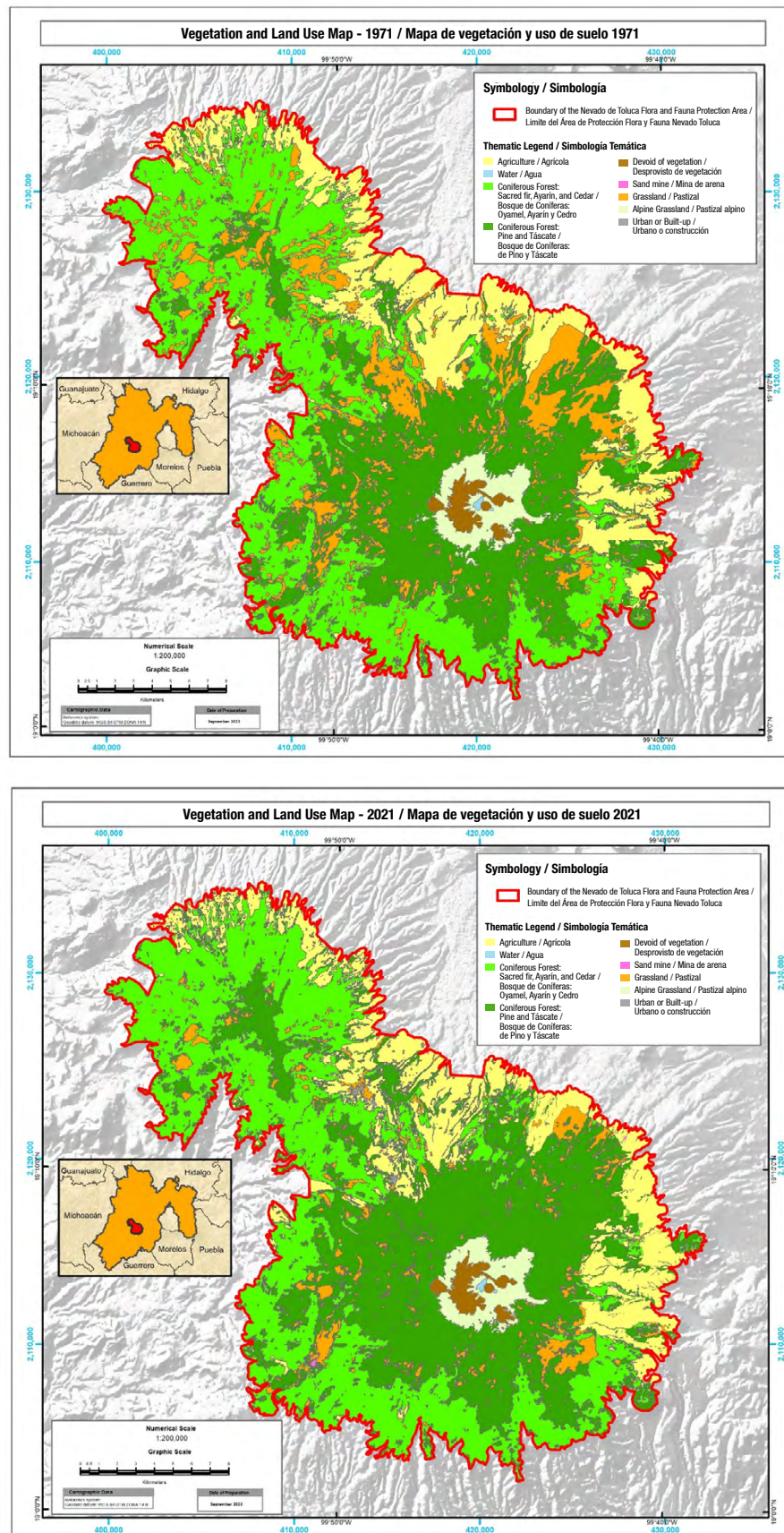


Figure 2. Vegetation and Land Use Maps from 1971 and 2021 of the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area. Source: Compiled by the authors using QGIS software (2023).

Figura 2. Mapas de vegetación y uso de suelo de 1971 y 2021 del Área de Protección Flora y Fauna Nevado de Toluca. Fuente: Elaboración propia con el software QGIS. (2023).

Table 1. Land Use Change Matrix in the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area during the 1971–2021 period**Cuadro 1. Matriz de cambio de uso de suelo en el Área de Protección Flora y Fauna Nevado de Toluca durante el período 1971-2021.**

Category/ Categoría	Agriculture/ Agrícola	Water/ Agua	Coniferous Forest 1/ Bosque de coníferas 1	Coniferous Forest 2/ Bosque de coníferas 2	Devoid of vegetation/ Desprovisto de vegetación	Grassland/ Pastizal	Alpine Grassland/ Pastizal alpino	Urban or Built-up Area/ Urbano o construcción	Total 2021 (ha)
Agriculture/ Agrícola	7559.76	0.00	309.00	95.52	1.52	875.31	0.00	0.32	8841.43
Water/ Agua	0.16	24.28	0.00	0.00	0.00	0.52	0.32	0.00	25.28
Coniferous Forest 1/ Bosque de coníferas 1	790.31	0.00	15766.75	392.24	0.00	3405.12	168.72	0.20	20523.34
Coniferous Forest 2/ Bosque de coníferas 2	466.04	0.00	194.16	17459.62	0.00	1268.59	0.00	0.00	19388.40
Devoid of vegetation/ Desprovisto de vegetación	0.00	0.00	0.00	0.00	586.55	0.00	1.36	0.00	587.91
Grassland/ Pastizal	189.08	0.00	661.63	56.72	0.00	1856.46	4.76	0.32	2768.97
Alpine Grassland/ Pastizal alpino	0.00	1.56	0.04	0.00	2.52	0.00	1276.31	0.00	1280.43
Urban or Built-up Area/ Urbano o construcción	83.36	0.00	5.12	3.72	0.00	57.04	0.52	8.44	158.20
Sand mine/ Mina de arena	5.80	0.00	9.52	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00	15.92
Total 1971 (ha)	9094.50	25.84	16946.22	18007.81	590.59	7463.64	1451.98	9.28	

Coniferous Forest: 1) *Pinus hartwegii* and *Juniperus deppeana* (táscate), 2) *Abies religiosa* (sacred fir), *Pseudotsuga menziesii* (ayarín) and *Cedrus* sp. (cedar). Source: Compiled by the authors.

Bosque de coníferas: 1) *Pinus hartwegii* y *Juniperus deppeana* (táscate), 2) *Abies religiosa* (oyamel), *Pseudotsuga menziesii* (ayarín) y *Cedrus* sp. (cedro). Fuente: Elaboración propia.

from 34954.03 ha in 1971 to 39911.74 ha in 2021. These dynamics have also been observed in other geographical contexts, such as the Republic of Congo (Mangaza, 2022) and the Mediterranean region (Coskuner, 2022), where transitions from agricultural use to other land covers were identified; however, such behaviors may vary depending on the natural and anthropogenic factors that influence them.

Another result was the rate of change for each land cover type, which allowed for the identification of land uses exhibiting similar behaviors over time. In other cases, declining trends were observed, as in the case of grasslands, while coniferous forest areas showed an increase in surface area. This is consistent with the findings of Pérez Hernández et al. (2021), who reported similar trends in their study on forest cover change in Oaxaca.

Table 2 clearly shows the growth trend in coniferous forests (types 1 and 2), which exhibit a rate of change of 0.57 % during the period analyzed, equivalent to a gain of 4957.71 ha. These data suggest that the protection strategies implemented in the area have yielded positive results and have contributed to the significant expansion of this forest cover. An important aspect is identifying the type of land cover from which this gain originates; it is observed that grasslands have experienced a loss in their initial coverage, with a

términos generales como en el análisis detallado de las tendencias observadas. En este marco, el Cuadro 1 sintetiza la información relativa a la permanencia y a las transiciones de las coberturas. Los valores ubicados en la diagonal principal representan la permanencia de cada categoría, mientras que las celdas restantes reflejan las conversiones y los flujos de intercambio entre diferentes usos del suelo. Destaca el intercambio entre bosque de coníferas con las zonas agrícolas y pastizales, cuya magnitud pasó de 34954.03 ha en 1971 a 39911.74 ha en 2021. Estas dinámicas también se han observado en otros contextos geográficos, como en la República del Congo (Mangaza, 2022) y en la región Mediterránea (Coskuner, 2022), donde se identificaron procesos de transición de uso agrícola hacia otras coberturas; sin embargo, dichos comportamientos pueden variar en función de los fenómenos naturales y antrópicos que los condicionan.

Otro de los resultados fue la tasa de cambio de cada cobertura, que permitió la identificación de usos del suelo que presentan comportamientos similares a lo largo del tiempo. En otros casos, se observan tendencias descendentes como es el caso de los pastizales, mientras que las áreas de bosques de coníferas muestran incremento en superficie, lo cual es consistente con los resultados de Pérez Hernández et al. (2021), quienes reportaron tendencias similares en su estudio sobre el cambio de cobertura forestal en Oaxaca.

Table 2. Land cover change rates by period in the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area.
Cuadro 2. Tasas de cambio de cobertura por período en el Área de Protección Flora y Fauna Nevado de Toluca.

Categories / Categorías	Total 1971 (ha)	Total 2021 (ha)	Change rate (%) / Tasa cambio (%)	Change (ha) / Cambio (ha)	Annual change rate (%) / Tasa de cambio anual (%)	Annual change (ha) / Cambio anual (ha)	Status / Estatus
Agriculture / Agrícola	9 094.50	8 841.43	-0.06	-253.08	-0.001	-5.06	Loss / Pérdida
Water / Agua	25.84	25.28	-0.04	-0.56	-0.000	-0.01	Loss / Pérdida
Coniferous Forest 1 / Bosque de coníferas 1	16 946.22	20 523.34	0.42	3 577.12	0.008	71.54	Gain / Ganancia
Coniferous Forest 2 / Bosque de coníferas 2	18 007.81	19 388.40	0.15	1 380.59	0.003	27.61	Gain / Ganancia
Devoid of vegetation / Desprovisto de vegetación	590.59	587.91	-0.01	-2.68	-0.000	-0.05	Loss / Pérdida
Grassland / Pastizal	7 463.64	2 768.97	-1.26	-4 694.67	-0.025	-93.89	Loss / Pérdida
Alpine Grassland / Pastizal alpino	1 451.98	1 280.43	-0.24	-171.56	-0.005	-3.43	Loss / Pérdida
Urban or Built-up Area / Urbano o construcción	9.28	158.20	32.09	148.92	0.642	2.98	Gain / Ganancia
Sand mine / Mina de arena	0.00	15.92	29.84	15.92	0.597	0.32	Gain / Ganancia

Coniferous Forest: 1) *Pinus hartwegii* and *Juniperus deppeana* (táscate), 2) *Abies religiosa* (sacred fir), *Pseudotsuga menziesii* (ayarín) and *Cedrus* sp. (cedar).
Source: Compiled by the authors.
Bosque de coníferas: 1) *Pinus hartwegii* y *Juniperus deppeana* (táscate), 2) *Abies religiosa* (oyamel), *Pseudotsuga menziesii* (ayarín) y *Cedrus* sp. (cedro).
Fuente: Elaboración propia.

negative rate of change of 1.26 %. The same grassland loss trend was reported by Pineda (2017) in his study on land use and dynamics in Hidalgo.

During the study period, the pine and táscate coniferous forest has experienced the greatest growth, expanding by more than 3 307 ha, primarily in areas that were previously grasslands. This change has been driven by both reforestation efforts and natural ecological succession. The replacement of grasslands by coniferous forests improves ecosystem recovery and could have positive implications for biodiversity and water balance in the region. Increases have also been recorded in other land covers, such as the coniferous forest of sacred fir, ayarín, and cedar (1 380 ha), as well as in agriculture (253 ha). Urban areas have increased by 0.28 % within the boundaries of the APFFNT, which corresponds to an increase of 148.92 ha. It is important to note that a sand mine has been detected in the protected area, reflecting management deficiencies in the region, impacting approximately 15 ha (Table 2).

Another point of interest is the behavior of urban or construction land covers and sand mine, which together have undergone significant transformation with a rate of change exceeding 30 %, corresponding to

El Cuadro 2 muestra de manera clara la tendencia de crecimiento en los bosques de coníferas (1 y 2) que presentan una tasa de cambio del 0.57 % en el período analizado, lo que equivale a una ganancia de 4 957.71 ha. Estos datos sugieren que las estrategias de protección implementadas en el área han tenido resultados positivos y han contribuido a la expansión significativa de esta cobertura forestal. Un aspecto relevante es identificar de qué tipo de cobertura proviene esta ganancia y se observa que el pastizal ha experimentado una pérdida en su cobertura inicial, con una tasa de cambio negativa del 1.26 %. La misma tendencia de pérdida en pastizales fue reportada por Pineda (2017) en su estudio sobre la dinámica y el uso de suelo en Hidalgo.

Durante el período de estudio, el bosque de coníferas de pino y táscate ha experimentado el mayor crecimiento, con una expansión de más de 3 307 ha, principalmente en áreas que anteriormente eran pastizales. Este cambio ha sido impulsado tanto por esfuerzos de reforestación como por la sucesión ecológica natural. El desplazamiento de los pastizales por bosques de coníferas mejora la recuperación del ecosistema y podría tener implicaciones positivas para la biodiversidad y el equilibrio hídrico de la región.

an approximate increase of 160 ha. This phenomenon is particularly important since these activities are anthropogenic in origin and are occurring within a conservation area where, ideally, such settlements and activities should not take place. The presence of these transformations underscores the need to evaluate and strengthen management and conservation policies in the area to prevent the expansion of activities incompatible with ecosystem conservation.

To more precisely identify changes in land cover, an analysis was conducted using the change indices proposed by Pontius et al. (2004) through a period matrix that allowed visualization of the most relevant results, such as totals, gains, losses, swaps, total change, and net change (Table 3). The use of this type of analysis is highly recommended by studies such as those by Pineda Jaimes et al. (2009), Sandoval-García et al. (2021), and Hernández-Cavazos et al. (2023), who also applied Pontius's method in their research

También se han registrado incrementos en otras coberturas como en el bosque de coníferas de oyamel, ayarín y cedro (1 380 ha) y la agricultura (253 ha). Las zonas urbanas han aumentado 0.28 % con respecto al territorio de la APFFNT, dicho aumento equivale a 148.92 ha. Es importante mencionar que se ha detectado una mina en el área protegida, lo que refleja deficiencias en la gestión del área con impacto en aproximadamente 15 ha (Cuadro 2).

Otro dato de interés es el comportamiento de las coberturas de uso urbano o de construcción y de mina de arena, que en conjunto han experimentado una transformación significativa con una tasa de cambio superior al 30 %, lo que equivale a un incremento aproximado de 160 ha. Este fenómeno es especialmente importante dado que estas actividades son de origen antrópico y se están desarrollando en una zona de conservación, donde, idealmente, no deberían ocurrir asentamientos ni actividades de este tipo. La presencia

Table 3. Transition matrix for the 1971–2021 period in the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area.

Cuadro 3. Matriz de transición del período 1971-2021 en el Área de Protección Flora y Fauna Nevado de Toluca.

Category/ Categoría	Total 1971		Total 2021		Gains/ Ganancias		Losses/ Pérdidas		Swap/ Intercambio		Total change/ Cambio total		Net change/ Cambio neto	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Agriculture/ Agrícola	9 094.50	16.97	8 841.43	16.50	1 534.74	16.96	1 281.67	14.16	2 563.33	4.78	1 408.21	2.63	126.54	0.24
Water/ Agua	25.84	0.05	25.28	0.05	1.56	0.02	1.00	0.01	2.00	0.00	1.28	0.00	0.28	0.00
Coniferous Forest 1/ Bosque de coníferas 1	16 946.22	31.62	20 523.34	38.30	1 179.47	13.03	4 756.59	52.55	2 358.94	4.40	2 968.03	5.54	1 788.56	3.34
Coniferous Forest 2/ Bosque de coníferas 2	18 007.81	33.60	19 388.40	36.18	548.19	6.06	1 928.78	21.31	1 096.39	2.05	1 238.49	2.31	690.29	1.29
Devoid of vegetation/ Desprovisto de vegetación	590.59	1.10	587.91	1.10	4.04	0.04	1.36	0.02	2.72	0.01	2.70	0.01	1.34	0.00
Grassland/ Pastizal	7 463.64	13.93	2 768.97	5.17	5 607.18	61.95	912.51	10.08	1 825.02	3.41	3 259.85	6.08	2 347.34	4.38
Alpine Grassland/ Pastizal alpino	1 451.98	2.71	1 280.43	2.39	175.68	1.94	4.12	0.05	8.24	0.02	89.90	0.17	85.78	0.16
Urban or Built-up Area/ Urbano o construcción	9.28	0.02	158.20	0.30	0.84	0.01	149.76	1.65	1.68	0.00	75.30	0.14	74.46	0.14
Sand mine/ Mina de arena	0.00	0.00	15.92	0.03	0.00	0.00	15.92	0.18	0.00	0.00	7.96	0.01	7.96	0.01
Total (ha)	53 589.88	100.00	53 589.88	100.00	9 051.71	100.00	9 051.71	100.00	7 858.32	14.66	9 051.71	16.89	5 122.55	9.56

Coniferous forest: 1) *Pinus hartwegii* and *Juniperus deppeana* (táscate), 2) *Abies religiosa* (sacred fir), *Pseudotsuga menziesii* (ayarín) and *Cedrus* sp. (cedar). Source: Compiled by the authors using TerrSet software (Clark Labs, 2020).

Bosque de coníferas: 1) *Pinus hartwegii* y *Juniperus deppeana* (táscate), 2) *Abies religiosa* (oyamel), *Pseudotsuga menziesii* (ayarín) y *Cedrus* sp. (cedro). Fuente: Elaboración propia con el uso del software TerrSet (Clark Labs, 2020).

to obtain detailed results on land use and cover dynamics. This methodological approach enables a more comprehensive and precise assessment of land cover transformations and facilitates the interpretation of trends and change patterns that may be crucial for management and conservation.

The transition matrix in Table 3 reflects the changes that occurred during the period from 1971 to 2021 and highlights the land cover types with the highest percentage of area. Coniferous forest cover (types 1 and 2) shows the greatest increase, accounting for 74.48 % of the total area, primarily composed of pine, táscate, oyamel, ayarín, and cedar species. On the other hand, 16.83 % of the area corresponds to anthropogenic activities such as agriculture, mining, and human settlements. The remaining 8.69 % is represented by other non-invasive land covers that have undergone fewer modifications. This distribution pattern underscores the interaction between natural processes and human interventions throughout the study period.

The gains and losses in land cover reflect significant trends in land use behavior, which can be observed in the results for total change and net change. In particular, it was found that coniferous forests (types 1 and 2) had the greatest changes, accounting for 7.84 % of the total area—a trend consistent with the findings of Cruz-Huerta et al. (2015) in their study on land use modeling in the Chignahuapan-Zacatlán region, Puebla. Grassland, on the other hand, was identified as one of the most dynamic land cover types during the analyzed period, showing a decrease of 4694 ha, equivalent to 8.76 % of the APFFNT. Considering grassland persistence in relation to its dynamics, the total change corresponds to 6.08 % of the existing 16.89 % land cover in the area. This figure reflects the extent of the dynamics associated with the sum of all land cover types that experienced transformations (Table 3). Moreover, the net area change drops to 9.56 %, as some grassland areas have been lost while others, such as coniferous forests, have expanded—revealing a complex transformation dynamic that characterizes the study area.

One of the most significant land cover changes between 1971 and 2021 was observed in the coniferous forests dominated by *P. hartwegii* and *J. deppeana* (táscate), which expanded by 6.67 % of the total area of the APFFNT, equivalent to approximately 3577 ha. This increase in forested areas is mainly due to the conversion of grassland areas into forests, a phenomenon also noted by Pineda Jaimes et al. (2009) in their study on land use change in Estado de México. The expansion of coniferous forests has been supported by different reforestation programs implemented during the analyzed period, which have significantly

de estas transformaciones subraya la necesidad de evaluar y fortalecer las políticas de gestión y conservación en el área para evitar la expansión de actividades incompatibles con la conservación del ecosistema.

Para identificar de manera más precisa los cambios en las coberturas se hizo un análisis utilizando los índices de cambio propuestos por Pontius et al. (2004), a través de un matriz del período que permitió visualizar los resultados más relevantes como los totales, ganancias, pérdidas, intercambios, cambio total y cambio neto (Cuadro 3). El uso de este tipo de análisis es altamente recomendado por estudios como los de Pineda Jaimes et al. (2009), Sandoval-García et al. (2021) y Hernández-Cavazos et al. (2023), quienes también aplicaron el método de Pontius en sus investigaciones para obtener resultados detallados sobre la dinámica del uso del suelo y las coberturas. Este enfoque metodológico permite una evaluación más robusta y precisa de las transformaciones en las coberturas del suelo, y facilita la interpretación de las tendencias y patrones de cambio que pueden ser cruciales para la gestión y conservación.

La matriz de transición del Cuadro 3 refleja los cambios ocurridos en el período comprendido entre 1971 y 2021, y destaca las coberturas con mayor porcentaje de extensión. La cobertura de bosques de coníferas (1 y 2) es la que presenta el mayor incremento con 74.48 % de la superficie total, conformada principalmente por especies de pino, táscate, oyamel, ayarín y cedro. Por otro lado, 16.83 % de la superficie corresponde a actividades antrópicas, tales como la agricultura, las minas y los asentamientos humanos. El porcentaje restante (8.69 %), está representado por otras coberturas no invasivas que han experimentado menos modificaciones. Este patrón de distribución resalta la interacción entre los procesos naturales y las intervenciones humanas a lo largo del período estudiado.

Las pérdidas y ganancias de coberturas reflejan tendencias importantes en el comportamiento del uso del suelo, las cuales se pueden observar en los resultados de cambio total y cambio neto. En particular, se constató que los bosques de coníferas (1 y 2) presentaron los mayores cambios con 7.84 % del área total, tendencia que coincide con lo reportado por Cruz-Huerta et al. (2015) en su trabajo sobre modelaje y uso de suelo en la región de Chignahuapan-Zacatlán, Puebla. Por otra parte, el pastizal se identificó como una de las coberturas con mayor dinámica dentro del periodo analizado, ya que registró disminución de 4694 ha, equivalente al 8.76 % del APFFNT. Considerando la persistencia del pastizal en relación con su dinámica, el cambio total corresponde al 6.08 %

contributed to the growth of these forested areas (Figure 3), reflecting efforts to mitigate environmental degradation and promote ecosystem conservation in the region.

The expansion of coniferous forests in the Nevado de Toluca has been driven by forest repopulation programs (Figure 3), although outcomes vary according to the study. The region's forest restoration efforts began with a logging ban from 1947 to 1970, followed by the establishment of PROTINBOS (Protectora e Industrializadora de Bosques) in 1970, which managed the sustainable exploitation of forest resources. However, restoration efforts during the 1970s and 1980s were limited, leading to the dissolution of PROTINBOS and its replacement by PROBOSQUE (Protectora de Bosques) in the 1990s. Despite the implementation of new reforestation programs, the overall impact has been moderate, constrained by urban expansion, unrestricted vehicular access, and agricultural pressure in surrounding areas.

To accurately identify land use changes, a detailed map was developed (Figure 4) to clearly and visually pinpoint the transitions. Notably, a higher incidence of transformations is observed in the northern area of the Nevado de Toluca, as well as in transitional

del 16.89 % de cobertura existente en la zona. Este valor refleja la magnitud de la dinámica asociada a la suma de todas las coberturas que experimentaron transformaciones (Cuadro 3). Por otra parte, el cambio neto del área descende a 9.56 %, debido a que algunas zonas de pastizales se han perdido y otras como los bosques de coníferas han experimentado expansión, reflejando una dinámica compleja de transformación que caracteriza a la zona de estudio.

A lo largo del período 1971-2021, la dinámica más relevante se dio en la cobertura de bosques de coníferas de *P. hartwegii* y *J. deppeana* (táscate) que experimentó crecimiento del 6.67 % del área total del APFFNT, lo que equivale aproximadamente a 3577 ha. Este aumento en la superficie forestal se debe principalmente a la conversión de áreas de pastizal en bosques, un fenómeno también señalado por Pineda Jaimés et al. (2009) en su estudio sobre el cambio de uso de suelo en el Estado de México. Este crecimiento de los bosques de coníferas ha sido favorecido por diversos programas de reforestación implementados en el período analizado, los cuales han contribuido de manera significativa a la expansión de dichas áreas forestales (Figura 3), reflejando los esfuerzos para mitigar la degradación ambiental y promover la conservación de los ecosistemas en la región.

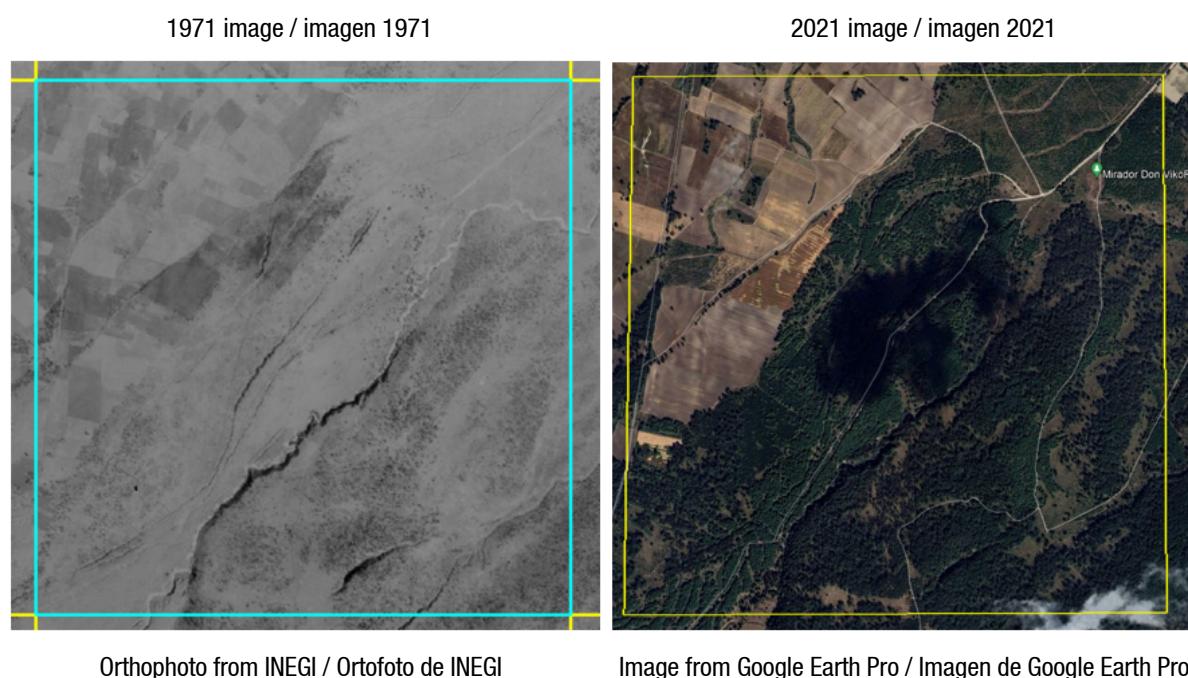


Figure 3. Comparative images of conifer growth due to reforestation in the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area. Source: Compiled by the authors using INEGI orthophotos (2023b) and satellite images from Google (2023).

Figura 3. Comparativo de imágenes del crecimiento de coníferas por reforestación en el Área de Protección Flora y Fauna Nevado de Toluca. Fuente: Elaboración propia con el uso de ortofotos de INEGI (2023b) e imágenes satelitales de Google (2023).

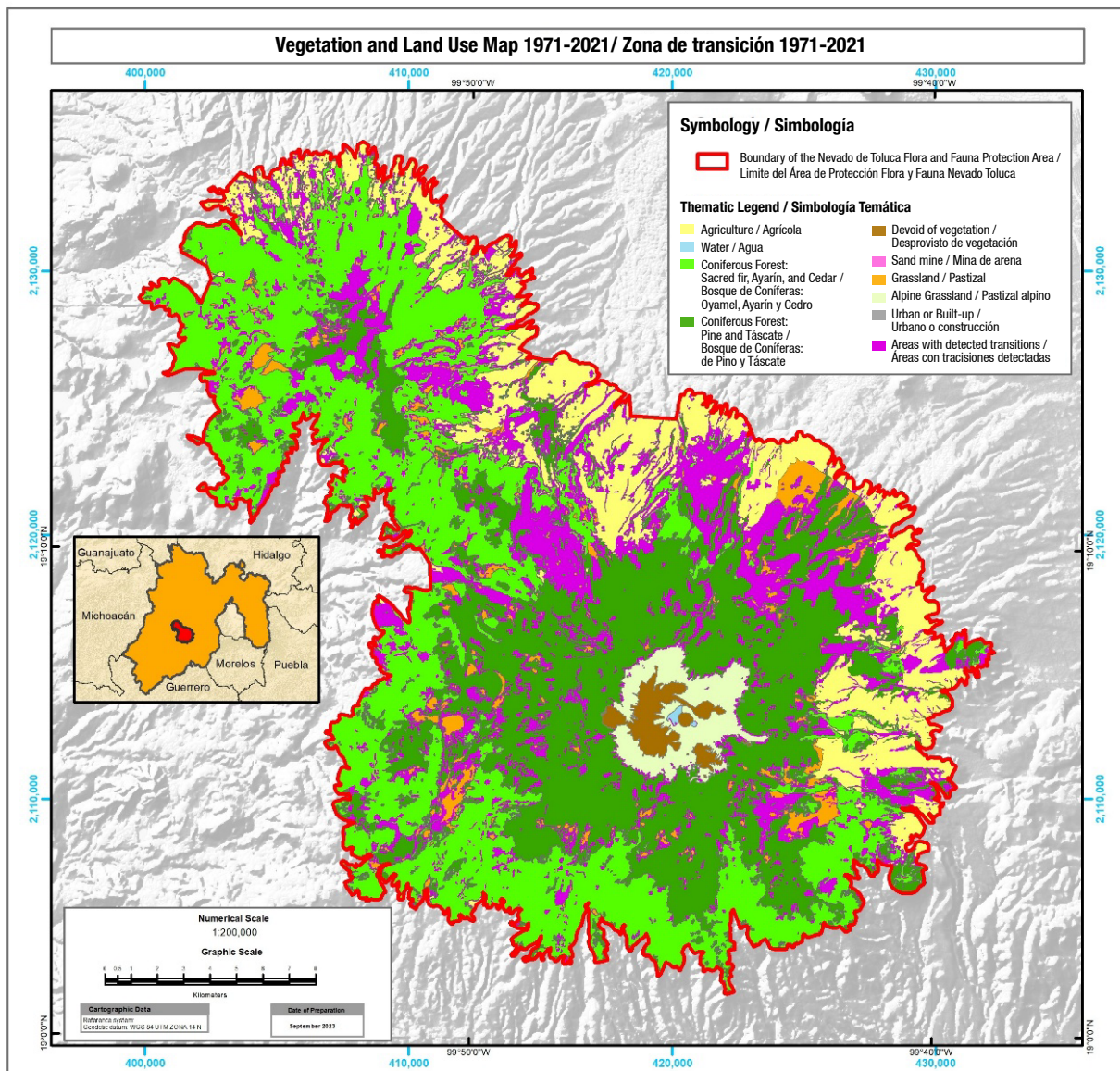


Figure 4. Vegetation and land use map with detected transitions (1971–2021) in the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area. Source: Compiled by the authors using QGIS software (2023).

Figura 4. Mapa de vegetación y uso de suelo con las transiciones detectadas en el período 1971-2021 del Área de Protección Flora y Fauna Nevado de Toluca. Fuente: Elaboración propia con el software QGIS (2023).

zones between different land cover types, where the boundaries between ecosystems or land uses appear to undergo more pronounced alterations. These changes, which are especially evident in key areas, may reflect dynamic and complex processes such as urban expansion, agricultural activity, or climate change, all of which significantly influence the evolution and transformation of the landscape.

Quantifying land cover changes through a map, complemented by a behavior matrix, organizes the information in a clearer and more structured manner, allowing for more accurate and realistic comparisons. This methodology enables the efficient identification

El crecimiento del bosque de coníferas en el Nevado de Toluca ha sido impulsado por programas de repoblamiento forestal (Figura 3), aunque los resultados varían según el estudio. La historia de la restauración forestal en la zona comenzó con la veda forestal de 1947 a 1970, seguido por la creación de PROTINBOS (Protectora e Industrializadora de Bosques) en 1970, que gestionó la explotación sostenible de los recursos forestales. No obstante, los esfuerzos de restauración entre las décadas de 1970 y 1980 fueron limitados, lo que llevó a la disolución de PROTINBOS y a su reemplazo por PROBOSQUE (Protectora de Bosques) en los 90. A pesar de nuevos programas de reforestación, el impacto ha sido moderado debido a la expansión urbana, el acceso

of processes such as permanence, degradation, deforestation, or forest cover recovery, which are essential for understanding the current land use dynamics in the area.

The integration of both approaches provides a more detailed and accurate view of the ongoing changes, enabling a better interpretation of landscape interactions and transformations. Furthermore, this approach allows for the identification of critical areas undergoing significant modifications, thus facilitating informed decision-making for land management and conservation. In this way, not only can the processes of change be better understood, but their potential impacts and future dynamics can also be anticipated.

Regarding land use changes, Figure 5 shows the losses and gains in the study area. A notable reduction in grassland is observed, with minimal gains compared to coniferous forests. While coniferous forests show some loss in area, this is offset by gains in other regions. Agricultural land, on the other hand, shows variation in coverage; however, the total change is minor due to nearly equivalent losses and gains – consistent with the findings of Camacho-Sanabria et al. (2015), who modeled land cover and land use changes in the region.

Studies on land use change are essential for identifying trends and patterns in land cover dynamics. These changes are driven by a combination of physical, social,

vehicular sin restricciones y la presión agrícola en las áreas cercanas.

Con el objetivo de identificar los cambios en el uso del suelo de manera precisa, se desarrolló un mapa detallado (Figura 4) que permitiera localizar las transiciones de forma clara y visual. En particular, se observa mayor incidencia de transformaciones en la zona norte del Nevado de Toluca, así como en las regiones de transición entre tipos de cobertura donde, al parecer, los límites entre ecosistemas o usos del suelo experimentan alteraciones más notorias. Estos cambios, que resultan más evidentes en áreas clave, podrían estar reflejando procesos dinámicos y complejos como la expansión urbana, actividad agrícola o cambio climático que inciden de manera significativa en la evolución y transformación del paisaje.

La cuantificación de los cambios a partir de un mapa, complementado con una matriz de comportamiento, estructura la información de manera más clara y organizada para una comparación más precisa y ajustada a la realidad. Esta metodología permite la identificación eficiente de procesos como la permanencia, degradación, deforestación o recuperación de las coberturas forestales, lo que resulta fundamental para la comprensión de las dinámicas actuales del uso del suelo en la zona.

La integración de ambos enfoques genera una visión más detallada y precisa de los cambios que están ocurriendo, lo que posibilita una mejor interpretación de las

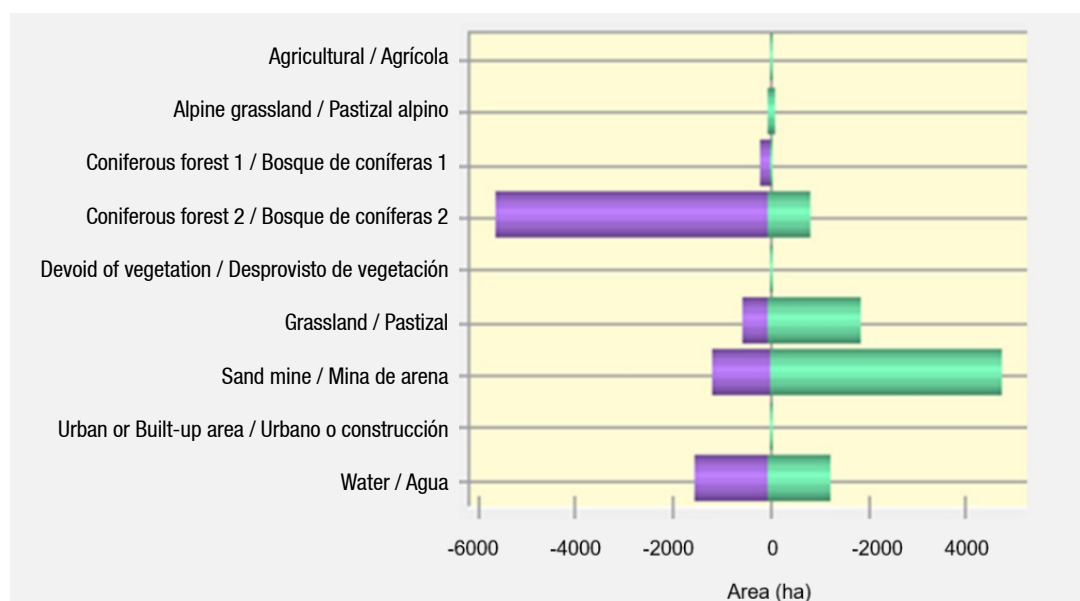


Figure 5. Losses and gains by land cover in the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area (1971–2021). Coniferous Forest: 1) *Pinus hartwegii* and *Juniperus deppeana* (táscate), 2) *Abies religiosa* (sacred fir), *Pseudotsuga menziesii* (ayarín), and *Cedrus* sp. (cedar). Source: Compiled by the authors.

Figura 5. Pérdidas y ganancias por cobertura del Área de Protección Flora y Fauna Nevado de Toluca en el período 1971-2021. Bosque de coníferas: 1) *Pinus hartwegii* y *Juniperus deppeana* (táscate), 2) *Abies religiosa* (oyamel), *Pseudotsuga menziesii* (ayarín) y *Cedrus* sp. (cedro). Fuente: Elaboración propia.

and, in many cases, economic factors (Brovelli et al., 2020). Understanding the magnitude and dynamics of each land cover type is crucial for assessing their impact on the area. This information is presented in Table 4, which highlights positive outcomes – namely, the favorable expansion of forest cover types, now encompassing approximately 74 % of the area. However, anthropogenic interventions, including agriculture and urbanization, remain a concern, as they now occupy nearly 17 % of the territory.

A notable phenomenon in this area is reforestation, which has led to a change in the spatial organization of the landscape. The main consequence of this phenomenon is the success of the implemented conservation plans, which have positively impacted the area’s recovery. In the past, numerous gaps existed within the forests, but over time, these have been filled, demonstrating the

interacciones y transformaciones del paisaje. Además, esta aproximación permite la identificación de áreas críticas que experimentan modificaciones importantes, facilitando así la toma de decisiones informadas para la gestión y conservación del territorio. De esta forma, no solo se logran entender los procesos de cambio, sino también anticipar sus posibles impactos y dinámicas futuras.

En cuanto a los cambios en el uso del suelo, la Figura 5 evidencia las pérdidas y ganancias en el área de estudio. Se observa una notable disminución de pastizales con una baja ganancia en comparación con los bosques de coníferas. En estos se registra disminución de hectáreas; sin embargo, esta pérdida es contrarrestada por las ganancias de cobertura en otras áreas. Por otro lado, la agricultura muestra cambios en su cobertura, pero el cambio total es pequeño debido a que las pérdidas y ganancias son similares, tal como lo menciona el

Table 4. Dynamics and magnitude of environmental impact on vegetation covers in the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area.
Cuadro 4. Dinámica y magnitud del daño ambiental en las coberturas vegetales del Área de Protección Flora y Fauna Nevado de Toluca.

Category / Categoría	Total 1970		Total 2020		Change Dynamics of Land Cover / Dinámica de cambio de la cobertura	Magnitude of Environmental Damage / Magnitud de daño al ambiente
	(ha)	(%)	(ha)	(%)		
Agriculture / Agrícola	9 094.50	16.97	8 841.43	16.50	Remains stable / Permanece estable	Moderate / Moderado
Water / Agua	25.84	0.05	25.28	0.05	Remains stable / Permanece estable	No damage / No afecta
Coniferous Forest 1 / Bosque de coníferas 1	16 946.22	31.62	20 523.34	38.30	Growth with progressive recovery / Crecimiento con recuperación progresiva	No damage / No afecta
Coniferous Forest 2 / Bosque de coníferas 2	18 007.81	33.60	19 388.40	36.18	Growth with progressive recovery / Crecimiento con recuperación progresiva	No damage / No afecta
Devoid of vegetation / Desprovisto de vegetación	590.59	1.10	587.91	1.10	Remains stable / Permanece estable	Moderate / Moderado
Grassland / Pastizal	7 463.64	13.93	2 768.97	5.17	Decrease with a trend toward degradation / Disminución con tendencia a la degradación	Partial / Parcial
Alpine Grassland / Pastizal alpino	1 451.98	2.71	1 280.43	2.39	Decrease with a trend toward degradation / Disminución con tendencia a la degradación	No damage / No afecta
Urban or Built-up Area / Urbano o construcción	9.28	0.02	158.20	0.30	Growth with degradation / Crecimiento con degradación	Very high / Muy alto
Sand mine / Mina de arena	0.00	0.00	15.92	0.03	Growth with degradation / Crecimiento con degradación	High / Alto

Coniferous Forest: 1) *Pinus hartwegii* y *Juniperus deppeana* (táscate), 2) *Abies religiosa* (oyamel), *Pseudotsuga menziesii* (ayarín) and *Cedrus* sp. (cedro). Source: Compiled by the authors.
Bosque de coníferas: 1) *Pinus hartwegii* y *Juniperus deppeana* (táscate), 2) *Abies religiosa* (oyamel), *Pseudotsuga menziesii* (ayarín) y *Cedrus* sp. (cedro). Fuente: Elaboración propia.

benefits derived from conservation strategies. However, deficiencies in oversight have also been identified, particularly regarding the establishment of mines in the area (15 ha), which requires an analysis of the factors that contributed to this event. Despite this, no significant vegetation losses have been recorded since 1971; rather, forest cover has increased over the past 50 years.

It is important to remember that PNAs are key instruments for the planning and regulation of activities in these zones, both in terms of management and administration. The use of technological tools can be a crucial support for decision-making in specific management strategies, as each zone presents characteristics that require differentiated approaches.

Despite the progress achieved in the forest restoration programs in the Nevado de Toluca, results remain limited due to pressure from urban expansion, agricultural activities, and unregulated access to the park. These factors continue to undermine the effectiveness of the implemented strategies, highlighting the need to adopt more comprehensive and sustainable approaches to ensure the long-term conservation of this important natural area.

Conclusions

The analysis of the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area (APFFNT) reflects land use changes that occurred over the 50-year period between 1971 and 2021. Although changes in the area are not extreme, a clear trend toward landscape transformation is evident. An example of this is the northern region of Nevado de Toluca, where there has been a notable loss of grasslands, which have decreased by approximately 8.76 % of the total APFFNT territory, equivalent to about 4694 ha. This type of cover has been largely replaced by areas of tree vegetation, primarily pine and táscate, whose extent has increased by 6.67 % (3577 ha). Additionally, urban areas have experienced gradual growth, increasing by 0.28 % of the territory, equivalent to 148.92 ha.

Acknowledgments

The first author thanks CONACYT for the doctoral scholarship (443361) granted to support the development of this research.

Conflict of interest declaration

The authors declare that they have no economic conflicts of interest or known personal relationships that could have influenced the research presented in this article.

End of English version

estudio de Camacho-Sanabria et al. (2015) en el que se modelan los cambios en la cobertura y uso del suelo en la región.

Los estudios sobre los cambios en el uso del suelo son fundamentales, ya que se logra la identificación de tendencias y comportamientos de las coberturas. Estos cambios están determinados por factores físicos, sociales y, en muchos casos, económicos (Brovelli et al., 2020). El conocimiento de la magnitud y la dinámica de cada cobertura es esencial para la comprensión del impacto en el área; el Cuadro 4 presenta dicha información. En este se pueden apreciar resultados positivos, ya que muestran un comportamiento favorable en cuanto al crecimiento de las coberturas forestales que abarcan aproximadamente 74 % del área. Sin embargo, las actividades de intervención antrópica como la agricultura y la urbanización son preocupantes, ya que ocupan casi 17 % del territorio de la zona.

Un fenómeno destacado en esta área es la reforestación, que ha implicado un cambio en la organización espacial del paisaje. La principal consecuencia de este fenómeno es el éxito de los planes de conservación implementados, los cuales han impactado positivamente en la recuperación del área. En el pasado, existían numerosos huecos o *gaps* dentro de los bosques, pero con el tiempo, estos han sido rellenados, lo que evidencia los beneficios derivados de las estrategias de conservación. No obstante, también se han identificado deficiencias en la supervisión, particularmente en lo que respecta a la creación de minas en la zona (15 ha), lo que requiere un análisis de los factores que propiciaron este evento. A pesar de ello, no se han registrado pérdidas significativas de vegetación desde 1971, sino que ha incrementado la cobertura forestal a lo largo de los últimos 50 años.

Es importante recordar que las ANP son instrumentos clave para la planificación y regulación de las actividades en estas zonas, tanto en términos de manejo como de administración. El uso de herramientas tecnológicas puede ser un apoyo crucial para la toma de decisiones en las estrategias específicas de manejo, ya que cada zona presenta características particulares que requieren enfoques diferenciados.

A pesar de los avances logrados en los programas de restauración forestal en el Nevado de Toluca, los resultados siguen siendo limitados debido a la presión ejercida por la expansión urbana, la intervención agrícola y el acceso no regulado al parque. Estos factores continúan afectando la efectividad de las estrategias implementadas, lo que subraya la necesidad de adoptar enfoques más integrales y sostenibles que garanticen la conservación a largo plazo de esta importante área natural.

References / Referencias

- Agisoft (2023). Agisoft Metashape (Versión 2.1.0) [Software de computadora]. <https://www.agisoft.com/downloads/installer/>
- Bocco, G., Mendoza, M., & Masera, O. R. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 44, 18–38. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112001000100003
- Brovelli, M. A., Sun, Y., & Yordanov, V. (2020). Monitoring forest change in the amazon using multi-temporal remote sensing data and machine learning classification on Google Earth Engine. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/ijgi9100580>
- Camacho-Sanabria, J. M., Juan-Pérez, J. I., & Pineda-Jaimes, N. B. (2015). Modeling of land use/cover changes: Prospective scenarios in the Estado de Mexico. Case study - Amanalco de Becerra. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 21(2), 203–220. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.10.049>
- Clark Labs. (2020). TerrSet: Geospatial monitoring and modeling software (Versión 2020) [Software de computadora]. Clark University. <https://clarklabs.org/terrset>
- Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna (CEPANAF). (2022). *Áreas Naturales Protegidas*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. http://cepanaf.edomex.gob.mx/areas_naturales_protegidas
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2023). *Áreas Naturales Protegidas*. <https://www.gob.mx/conanp/acciones-y-programas/areas-naturales-protegidas-decretadas>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2023). *Enfoques para el monitoreo de la cobertura forestal en México*. Comisión Nacional Forestal. <https://www.gob.mx/conafor/articulos/enfoques-para-el-monitoreo-de-la-cobertura-forestal-en-mexico>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (2023). Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad de México (SNIB) [Base de datos]. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Cooper, S., Okujeni, A., Pflugmacher, D., van der Linden, S., & Hostert, P. (2021). Combining simulated hyperspectral EnMAP and Landsat time series for forest aboveground biomass mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 98. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102307>
- Coskuner, K. A. (2022). Land use/land cover change as a major driver of current landscape flammability in Eastern Mediterranean region: A case study in Southwestern Turkey. *Bosque*, 43(2), 157–167. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002022000200157>
- Cruz Huerta, C., González-Guillén, M. J., Martínez-Trinidad, T., & Escalona-Maurice, M. J. (2015). Modeling land-use change and future deforestation in two spatial scales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 21(2), 137–156. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.06.025>
- Duarte, E., Emanuelli, P., Milla, F., Orellana Díaz, O., & Lopez, S. (2016). *Análisis de cambios de la cobertura forestal y uso de la tierra mediante imágenes satelitales de alta resolución espacial: años 2009 – 2012 – 2015. Sitio piloto Cantón Puriscal. Costa Rica*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10664.78086>

Conclusiones

El análisis del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT) refleja los cambios en el uso del suelo ocurridos en los 50 años comprendidos entre 1971 y 2021. Aunque los cambios en la zona no son de carácter extremo, se observa una tendencia clara hacia la transformación del paisaje. Un ejemplo de ello es la región norte del Nevado de Toluca, donde es notable la pérdida de pastizales que ha disminuido aproximadamente 8.76 % con respecto al territorio total de la APFFNT, lo que equivale a unas 4694 ha. Este tipo de cobertura ha sido mayormente reemplazado por áreas con vegetación arbórea, principalmente de pino y táscate, cuya extensión ha aumentado 6.67 % (3577 ha). Por otro lado, las zonas urbanas han experimentado crecimiento gradual con incremento de 0.28 % del territorio, lo que equivale a 148.92 ha.

Agradecimientos

El primer autor agradece al CONACYT por la beca doctoral (443361) otorgada para la realización de la presente investigación.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaramos que no tenemos conflictos de intereses económicos ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en la investigación presentada en este artículo.

Fin de la versión en español

- Google. (2023). Google Earth [Imágenes satelitales]. <https://earth.google.com>
- Gordillo-Ruiz, M. C., & Castillo-Santiago, M. A. (2016). Cambio de uso del suelo en la cuenca del río Sabinal, Chiapas, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(10), 39. <https://doi.org/10.19136/era.a4n10.803>
- He, X., Lei, X. D., & Dong, L. H. (2021). How large is the difference in large-scale forest biomass estimations based on new climate-modified stand biomass models? *Ecological Indicators*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107569>
- Hernández-Cavazos, M. C., Sandoval-García, R., Molina-Guerra, V. M., & Alanís-Rodríguez, E. (2023). Análisis multitemporal del cambio de uso de suelo en el municipio de Linares, Nuevo León. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(2), e3743. <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3743>
- Hernández-Pérez, E., García-Franco, J. G., Vázquez, G., & Cantellano de Rosas, E. (2022). Land-use change and landscape fragmentation in central Veracruz, Mexico (1989–2015). *Madera y Bosques*, 28(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812294>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023a). *Diccionario de datos de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463908364>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023b). *Ortoimágenes*. <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes/#descargas>
- Li, S., Wang, T., Hou, Z., Gong, Y., Feng, L., & Ge, J. (2021). Harnessing terrestrial laser scanning to predict understory biomass in temperate mixed forests. *Ecological Indicators*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107011>
- Lumbres, R. I. C., & Lee, Y. J. (2014). Aboveground biomass mapping of La Trinidad forests in Benguet, Philippines, using Landsat Thematic Mapper data and *k*-nearest neighbor method. *Forest Science and Technology*, 10(2), 104–111. <https://doi.org/10.1080/21580103.2013.866171>
- Mangaza, L. (2022). Impacts of land use change on biomass and diversity in the forest landscape of the Yangambi Biosphere Reserve in the Democratic Republic of Congo. *Bois et Forêts des Tropiques*, 353, 61–73. <https://doi.org/10.19182/bft2022.353.a36836>
- Miranda, F., & Hernández X, E. (1963). *Los tipos de vegetación de México y su clasificación*. *Botanical Sciences*, 28, 29-179. <https://doi.org/10.17129/botsoci.1084>
- Olvera García, J., & Pichardo Pagaza, I. (2017). *Área de protección de flora y fauna. Nevado Toluca. Retos y oportunidades* (1.^a ed.). Universidad Autónoma del Estado de México. <https://altexto.mx/area-de-proteccion-de-flora-y-fauna-nevado-de-toluca-retos-y-oportunidades-x761q.html>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura & Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (FAO & PNUMA). (2020). *El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas*. FAO & PNUMA. <https://doi.org/10.4060/ca8642es>
- Pérez Hernández, M. J., Hernández Acosta, E., Sánchez Jiménez, R., González Gervacio, C., & Madrigal Reyes, S. (2021). Dynamics of changes in land use and vegetation due to anthropogenic activities in Zaachila, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(66). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.894>
- Pineda Jaimes, N. B., Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M., & Plata Rocha, W. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, 69, 33–52. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56912295004>
- Pineda López, M. d. R. (2017). Dynamics of land use and land cover in a Mexican national park. *Madera Bosques*, 23(3), 87–99. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331492>
- Pontius, R., & Petrova, S. (2010). Assessing a predictive model of land change using uncertain data. *Environmental Modelling & Software*, 25, 299–309. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.09.005>
- Pontius, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101(2–3), 251–268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>
- QGIS Development Team. (2023). *QGIS Geographic Information System*. Open-Source Geospatial Foundation Project. <https://qgis.org/es/site/>
- Sánchez-Reyes, U. J., Niño-Maldonado, S., Barrientos-Lozano, L., & Treviño-Carreón, J. (2017). Assessment of land use-cover changes and successional stages of vegetation in the natural protected area altas cumbres, Northeastern Mexico, using landsat satellite imagery. *Remote Sensing*, 9(7), 712. <https://doi.org/10.3390/rs9070712>
- Sandoval-García, R., Jiménez-Pérez, J., Yerena-Yamallel, J. I., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., & Gómez-Meza, M. V. (2021). Multitemporal analysis of land use and vegetation in the Cumbres de Monterrey National Park. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(66). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.896>
- Velázquez, A., Mas, J. F., Díaz Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, P. C., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra, E., & Palacio, Y. J. L. (2002). *Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México*. <https://www.redalyc.org/pdf/539/53906202.pdf>
- Wang, Y., Zhang, X., & Guo, Z. (2021). Estimation of tree height and aboveground biomass of coniferous forests in North China using stereo ZY-3, multispectral Sentinel-2, and DEM data. *Ecological Indicators*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107645>