

Cambio de uso de suelo asociado al manejo forestal sustentable en áreas de conservación: Caso Nevado de Toluca

Land use change associated with sustainable forest management in conservation areas: Case Nevado of Toluca

¹*Luis Mario García-Cuevas, ¹José Israel Yerena-Yamallel, ¹Luis Gerardo Cuéllar-Rodríguez, ¹Eduardo Alanís-Rodríguez, ¹Eduardo Javier Treviño-Garza

Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, carretera Nacional km 145, C.P. 67700, Linares, Nuevo León, México. Correo electrónico: lgarciaca@uanl.edu.mx; jose.yerenaym@uanl.edu.mx; luis.cuellarrd@uanl.edu.mx; eduardo.alanisrd@uanl.edu.mx; eduardo.trevinogr@uanl.edu.mx ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5212-4592>; <https://orcid.org/0000-0002-9216-7427>; <https://orcid.org/0000-0003-4969-611X>; <https://orcid.org/0000-0001-6294-4275>; <https://orcid.org/0000-0002-8921-857X>
*Autor para correspondencia

Recibido: 28 de junio del 2023
Aceptado: 21 de febrero del 2024
Publicado: 31 de mayo del 2024
<https://doi.org/10.33064/iycuaa2024924514>
e4514

RESUMEN

El propósito de este estudio fue evaluar el estado de conservación de las áreas con cobertura forestal en el Área de Protección de Flora y Fauna "Nevado de Toluca". Se determinó el cambio de uso de suelo mediante imágenes LANDSAT procesadas en Google Earth Engine (2003-2023). Se generaron seis usos de suelo: Hielo/arenales, Agricultura, Pastizal, Bosque abierto, Bosque cerrado y Cuerpos de agua, (2003, 2013 y 2023). Los bosques abiertos y cerrados, al año 2023, ocupan más del 79.0%. La mayor parte en los cambios fueron positivos para el área arbolada, donde la mayor tasa de cambio anual positiva corresponde al bosque cerrado (2.0%) y la negativa al pastizal (-5.5%). Esto sostiene la afirmación de que la implementación de los planes de manejo puede contribuir a la mejora de la conservación de las áreas bajo protección.

Palabras clave: área natural protegida; LANDSAT; Toluca; Google Earth Engine

ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate the conservation status of forested areas in the Flora and Fauna Protection Area "Nevado de Toluca." The change in land use was determined using processed LANDSAT images in Google Earth Engine from 2003 to 2023. Six land uses were identified: Ice/Sand, Agriculture, Grassland, Open Forest, Closed Forest, and Bodies of Water (in 2003, 2013, and 2023). As of 2023, open and closed forests occupy more than 79.0% of the area. Most of the changes were positive for the wooded area, with the highest positive annual change rate corresponding to the closed forest (2.0%) and the

negative to the grassland (-5.5%). This supports the claim that the implementation of management plans can contribute to the improvement of conservation in protected areas.

Keywords: protected natural area; LANDSAT; Toluca; Google Earth Engine

INTRODUCCIÓN

Las superficies forestales bajo conservación son áreas que desempeñan un papel indispensable por los múltiples servicios ecosistémicos que ofrecen, que generan beneficios al contribuir al bienestar social, económico y ambiental a largo plazo (García-Gil, et al., 2020). De acuerdo con el Artículo 44 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), las Áreas Naturales Protegidas (ANP) son zonas en las que las condiciones del ambiente son las originales, y no han sido significativamente alteradas por la actividad del ser humano, por lo que sus ecosistemas y funciones integrales requieren ser preservadas y restauradas.

En México se ha observado un acelerado deterioro de las ANP, que se ha incrementado con el paso del tiempo debido a múltiples causas. Una de las principales es el cambio de uso de suelo que se ha dado en los últimos años, debido a la expansión de las zonas urbanas y la degradación de la superficie debido a actividades agropecuarias, deforestación, incendios forestales, tala ilegal, creación de asentamientos humanos regulares e irregulares, escasa participación social en las acciones de conservación, entre otras (David, et al., 2021). Razón por la cual, la conservación es necesaria, pero no ha sido suficiente. Por lo que se vuelve indispensable ejecutar programas de manejo dentro de las ANP decretadas, con el fin de identificar los impactos y amenazas que puedan influir en el funcionamiento de estas áreas.

De acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2023), México actualmente cuenta con 203 ANP en 91.6 millones de hectáreas y 395 Áreas Destinadas a la Conservación, que abarcan una superficie aproximada de 701,760 hectáreas. Sin embargo, no todas las ANP del país cuentan con permisos de aprovechamiento de los recursos mediante planes de manejo. En el Estado de México, de un total de 90 ANP (CEPANAF 2023), sólo 6 de ellas cuentan con un programa de manejo: el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca, el Parque Nacional Lagunas de Zempoala, el Área de Protección de Recursos Naturales cuencas de los ríos Valle de Bravo,

Malacatepec, Tilostoc y Temascaltepec y el Área de Protección de Flora y Fauna Ciénegas de Lerma.

El Área de Protección de Flora y Fauna (APFyF) Nevado de Toluca fue creada el 25 de enero de 1936, con una superficie de 53,590 hectáreas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2023). Esta área de protección cambia su categoría de parque nacional a la de área de protección de flora y fauna el 1 de octubre del 2013. Desde la modificación de la categoría, se han implementado programas de manejo forestal maderable en la región. Actualmente, se cuentan con 34 predios autorizados, abarcando una superficie total aprovechable de 20,844.68 hectáreas y un volumen global de 1,210,322.32 metros cúbicos. De estos predios, cinco son comunidades y el resto son ejidos. Destacan entre ellos el Ejido Santa María Del Monte Ampliación, el Ejido San Antonio De Los Albarranes, el Ejido Las Lágrimas, el Ejido San Francisco Tlalcilcalpan Ampliación y el Ejido San Miguel Oxtotilpan, caracterizados por presentar los mayores volúmenes de aprovechamiento. Estos terrenos se distribuyen en nueve municipios del Estado de México, como Temascaltepec, Zinacantepec, Amanalco, entre otros. La implementación de planes de manejo en la zona inició en 2015, extendiéndose hasta 2021 con la última implementación registrada. Es relevante destacar que el "Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI)" ha sido la metodología de ordenación adoptada en todos los predios (CONAFOR, 2023).

Actualmente se tiene acceso a un acervo importante de recursos informáticos ligados a datos espaciales basados en imágenes satelitales, y con el desarrollo de sistemas de información geográfica se ha promovido la generación de programas computacionales para explicar los patrones observados de los cambios en las coberturas de suelo tanto temporales como espaciales. A partir de los mapas de uso de suelo y vegetación se puede identificar, cuantificar y analizar los procesos de cambio que ocurren en las diversas coberturas vegetales y usos del suelo de un espacio geográfico en un tiempo específico. En el sitio APFyF Nevado de Toluca es posible realizar evaluaciones, a través de los sistemas de información geográfica, de la efectividad de los programas de manejo forestal como instrumentos mejoradores de las áreas forestales, a través de los cambios de uso de suelo percibidos, dado que su cambio de categoría lo permite. Por lo que el objetivo de la presente investigación es diagnosticar el estado de conservación de las áreas con cobertura forestal en la APFyF Nevado de Toluca a partir de la apertura al *manejo forestal* - consiste en realizar de manera integrada acciones de ordenación, cultivo, protección de

la biodiversidad y restauración de los ecosistemas (CONAFOR 2023)-, mediante el análisis del cambio de uso de suelo basado en imágenes de satélite y realizando una investigación documental descriptiva de los programas de manejo forestal con el fin de contribuir a las estrategias de conservación de los bosques. Dicho objetivo busca comprobar la hipótesis de que los programas de manejo forestal en las áreas naturales protegidas aumentan las coberturas vegetales arboladas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca abarca los municipios de Almoloya de Juárez, Amanalco de Becerra, Calimaya, Coatepec Harinas, Temascaltepec, Tenango del Valle, Toluca, Villa Guerrero, Villa Victoria y Zinacantepec, en el Estado de México. Forma parte del Sistema Volcánico Transmexicano y alcanza una altitud de 4660 msnm. Los tipos de climas presentes van desde los fríos hasta los semifríos húmedos con lluvias en verano (Canales, et al., 2018). La vegetación principal comprende los bosques de pino y oyamel que cubren el 66.0% de la superficie forestal, conformados principalmente por *Pinus hartwegii* Lindl. y *Abies religiosa* Kunth Schltld. & Cham. Algunas otras especies encontradas son *P. montezumae* Lamb., *P. pseudostrobus* Lindl., *Cupressus lusitanica* Mill, *Quercus laurina* Humb et Bonpl. y *Alnus jorullensis* Humboldt, Bonpland & Kunth (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2013).

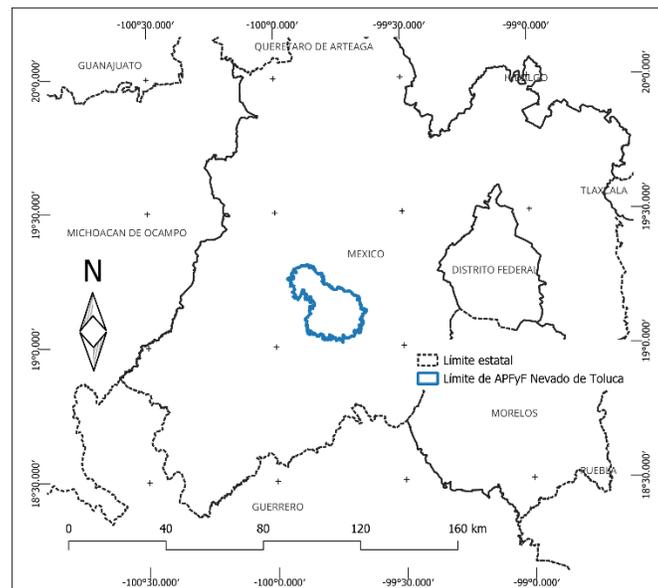


Figura 1. Ubicación del área de protección de flora y fauna Nevado de Toluca.

Generación de mapas de uso de suelo y vegetación.

El cambio de uso de suelo fue determinado a través de la plataforma Google Earth Engine (Gorelick et al. 2017) -plataforma basada en la nube para análisis geoespacial a escala planetaria que aplica las enormes capacidades computacionales de Google- mediante el procesamiento de imágenes Landsat 7, Landsat 8 y Landsat 9, para los años 2003, 2013 y 2023 respectivamente (U.S Geological Survey, 2003, 2013 y 2023). Se eligieron los años para este estudio teniendo en cuenta la modificación de la categoría de la ANPFyF en 2013. El propósito fue recopilar datos de uso de suelo anteriores, durante y posteriores a la implementación del manejo forestal. Esta elección temporal se realizó con la finalidad de registrar y analizar los cambios en el uso del suelo a partir de la introducción de las prácticas de aprovechamiento forestal. Para la selección de imágenes fue necesario establecer un filtrado mediante la definición de la fecha de interés (1 de enero al 30 de abril de cada año), el porcentaje de nubosidad (10.0%) y el límite del área de estudio (APFF). Posteriormente se realizaron estimaciones de los índices espectrales, NDVI, GNDVI y SAVI, que se incorporaron como bandas a la imagen a clasificar de acuerdo con lo recomendado por Leal Villamíl, Perea Ardila, and López Carvajal 2020; Luo et al. 2015; Rujoiu-Mare and Mihai 2016, utilizando un total de 9 bandas, y se generaron los mapas de Uso de Suelo y Vegetación (USV).

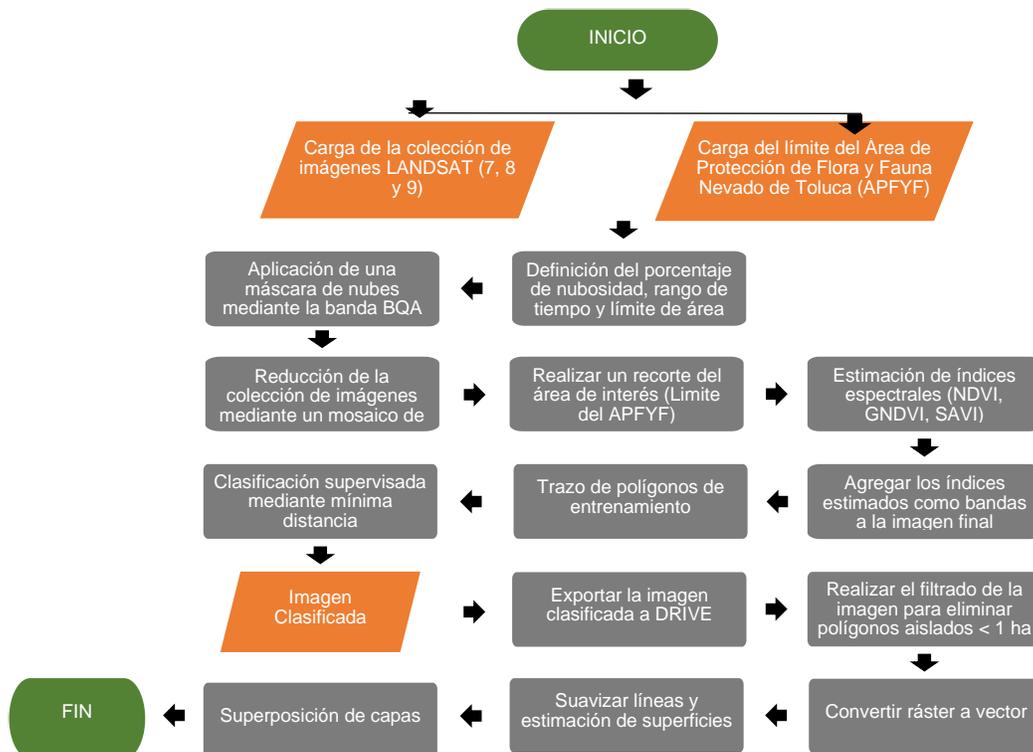


Figura 2. Diagrama de flujo para la generación de los mapas de uso de suelo y vegetación.

Se llevaron a cabo recorridos de campo con el fin de obtener datos correspondientes al año 2023, además de revisar las capas de uso de suelo y vegetación proporcionadas por el INEGI para los años 2003 y 2013 (INEGI, 2003, 2013). Esta revisión permitió definir seis clases de uso de suelo específicas para el Área de Protección de Flora y Fauna (APFF): Hielo/arenales, Agricultura, Pastizal, Bosque abierto, Bosque cerrado y Cuerpos de agua. En la categoría de bosque cerrado, se incluyen aquellos con un dosel forestal denso, donde los árboles se encuentran próximos entre sí, formando una cobertura continua. En contraste, la categoría de bosque abierto se distingue por presentar un dosel más disperso, con árboles separados que permiten una mayor penetración de la luz solar hasta el suelo. Para llevar a cabo esta clasificación, se adoptó el criterio establecido por Villavicencio Gorda et al. 2019, donde se considera una cobertura de copa mayor al 40% para bosque cerrado y menor al 40% para bosque abierto.

Se generaron campos de entrenamiento para cada clase mediante el trazo de polígonos y se elaboró una clasificación supervisada con el método de mínima distancia (Zhao, et al., 2012) para obtener una imagen clasificada por cada año: 2003, 2013 y 2023. Se realizó un filtrado a la imagen de conjuntos de menos de 10 píxeles, eliminando así áreas menores a 9,000 m² y la capa final se convirtió a formato de vector (*.shp).

Validación de los mapas

Mediante los recorridos de campo se validó el mapa de cobertura vegetal del año 2023, a través de un muestreo aleatorio simple sin considerar la superficie ocupada por cada uno de ellos, de acuerdo con la metodología propuesta por (Olofsson et al. 2014):

$$n = \frac{z^2 P(1 - P)}{E^2}$$

Donde P es la precisión general expresada como proporción, z es un percentil de la distribución normal estándar ($z = 1,96$ para un intervalo de confianza del 95%) y E es el ancho medio deseado del intervalo de confianza de P .

Así, considerando que se quiere estimar, con un nivel de confianza del 95%, el valor de Z es 1.96, con un margen de error (E) del 0.05% y una proporción inicial de cambios en el uso del suelo (P) del 0.2 (20%), basada en (Maass et al. 2006), el tamaño de muestra calculado es de 245.86. En este caso, redondearíamos hacia arriba para obtener un tamaño de muestra entero y práctico. Por lo tanto, podríamos decidir que necesitamos una muestra de al

menos 246 unidades para obtener una estimación de los cambios en el uso del suelo con un margen de error del 5% y un nivel de confianza del 95%.

Sin embargo, se tomó la decisión de aumentar la muestra en 10 puntos adicionales. Esto se debió a que, para la validación de los glaciares y cuerpos de agua, se seleccionaron 40 y 16 puntos respectivamente, debido a las dificultades de acceso asociadas con estas áreas específicas. Como resultado, se decidió cerrar la muestra para los restantes usos de suelo (4 categorías) en 50 unidades cada uno, lo que llevó a un total de 256 puntos de muestreo.

Para la validación de los mapas 2003 y 2013 se utilizó la información disponible de la Serie III y V de USV (INEGI, 2003 y 2013). Con esta información se conformaron matrices de confusión para cada uno de los mapas de USV. En esta matriz bidimensional las filas representan lo observado en campo y las columnas los valores obtenidos en la clasificación en gabinete. Los valores de la diagonal de la matriz indican los puntos que fueron correctamente clasificados, es decir, valores en los que existe correspondencia entre la imagen clasificada y los datos reales o de referencia (Maass, et al., 2006; Camacho, et al., 2015). También se determinó la confiabilidad del usuario y del productor. La confiabilidad del usuario se refiere a la probabilidad de que un sitio clasificado como A, aleatoriamente seleccionado, sea realmente A; por otro lado, la confiabilidad del productor refiere a la proporción de sitios seleccionados aleatoriamente de la clase A que están representados en el mapa (François-Mas, et al., 2003).

Estimación de la tasa de cambio de uso de suelo.

Se estimó el porcentaje de cambio de uso de suelo para cada periodo evaluado, usando la siguiente fórmula (FAO, 1996):

$$q = \left[1 - \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{1/n} \right] * 100$$

Donde:

q = Tasa de cambio (%)

S_1 = Superficie ocupada por la vegetación en la fecha 1

S_2 = Superficie ocupada por la vegetación en la fecha 2

n = Número de años del periodo de análisis

RESULTADOS

Uso de suelo y vegetación

Se obtuvieron tres mapas de uso de suelo para el APFF, correspondientes a los años 2003, 2013 y 2023, cada uno con seis categorías: Hielo/arenales, Agricultura, Pastizal, Bosque abierto, Bosque cerrado y Cuerpos de agua. La mayor parte de la superficie de APFF está ocupada por los bosques abiertos y cerrados, seguidos del pastizal, para los tres años evaluados. En el 2003 el bosque abierto ocupaba el 37.9% de la superficie total del área, mientras que el bosque cerrado el 33.7%; para el 2013, el bosque abierto disminuyó al 35.3% y el bosque cerrado aumentó al 35.8%; entre estos periodos, el hielo/arenales tuvieron una disminución importante, pasando del 1.3% al 0.8%, mientras que la agricultura registró una ganancia en superficie de 8.7% al 10.6%; para el año 2023, el bosque abierto ocupa el 35.8% de la superficie del área, el bosque cerrado el 44.0%, además de que entre el año 2013 y 2023 los pastizales registraron una disminución importante en su superficie, pasando del 17.5% al 9.0%.

Validación de mapas

Los indicadores de la precisión de las clasificaciones para los tres años evaluados son aceptables, ya que mediante la matriz de confusión se obtuvieron valores de 0.88, 0.84 y 0.84 de precisión general para los años 2003, 2013 y 2013, respectivamente. Para los años 2003 y 2013 la clase más confusa fue la de pastizal, con un valor de 67%. Las clases con las que presenta mayor confusión son las zonas de hielo/arenales y zonas agrícolas, esto debido a que se encuentran en los límites de transición entre las áreas bajas, en las que predominan áreas agrícolas y las zonas más altas del APFF donde se encuentran los arenales. Otra clase que presenta valores bajos de confiabilidad del usuario es la de bosque abierto en los años 2013 y 2023, confundiendo principalmente con áreas de pastizal y bosque cerrado, que son áreas con las que comparte límites habitualmente.

Tasa de cambio de uso de suelo y vegetación

El bosque cerrado tuvo cambios positivos en los periodos evaluados, mientras que los pastizales y bosques abiertos presentaron valores negativos, es decir, que estos usos se convirtieron en zonas arboladas. Por otro lado, las partes bajas de la APFF son las que presentan mayor presencia de zonas agrícolas, mismas que tuvieron valores positivos para los periodos 2013-2023 y 2003-2023.

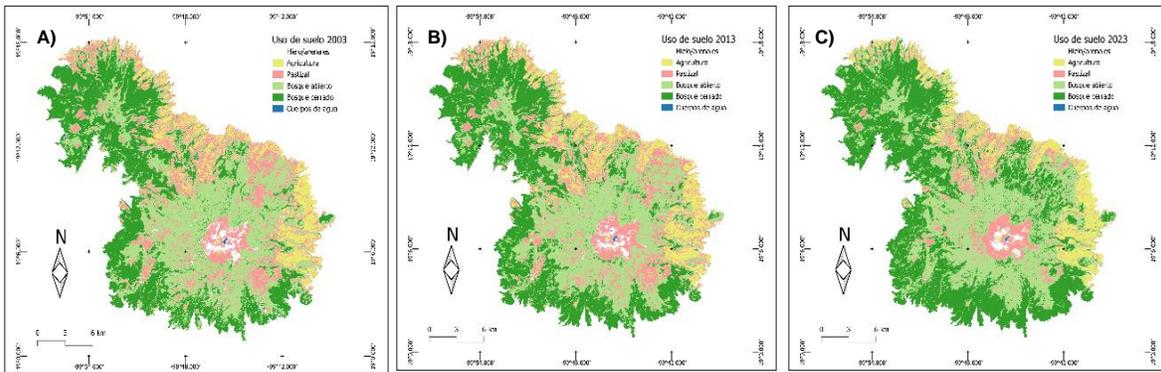


Figura 3. Mapas de uso de suelo y vegetación en el APFF Nevado de Toluca: A) 2003, B) 2013 y C) 2023

Tabla 1

Confiability de usuario y productor en porcentaje por clase y año en el APFF

Año	Precisión	Hielo/arenales	Agricultura	Pastizal	Bosque abierto	Bosque cerrado	Cuerpo de agua
2003	Usuario	1.00	1.00	0.67	0.85	1.00	1.00
	Productor	0.70	0.86	0.90	0.90	0.98	1.00
2013	Usuario	1.00	0.85	0.67	0.78	1.00	1.00
	Productor	0.90	0.88	0.84	0.72	0.85	1.00
2023	Usuario	0.85	0.88	0.86	0.92	0.82	1.00
	Productor	0.89	0.86	0.96	0.78	0.89	1.00

Las clases que mostraron pérdidas significativas fueron las áreas con hielo/arenales, teniendo una tasa anual del -4.6%, la segunda más importante para el periodo 2003-2023, los pastizales presentaron una mayor tasa negativa. Después de la incorporación de los aprovechamientos forestales (2013-2023) se registraron pérdidas significativas en las áreas con pastizales y zonas agrícolas, y recuperaciones importantes en los bosques abiertos y cerrados; a diferencia del periodo 2003-2013, donde la agricultura mostró tasas positivas importantes, mientras que el bosque abierto reducciones de superficies considerables.

Tabla 2
 Superficies y tasas de cambio de uso de uso de suelo para el periodo 2003-2023

USV	Superficie por año (ha)			Tasa anual de cambio (%)		
	2003	2013	2023	2003-2013	2013-2023	2003-2023
Hielo/arenales	678.3	429.6	373.8	-3.5	-1.1	-4.6
Agricultura	4,684.5	5,656.2	5,615.3	1.5	-0.1	1.4
Pastizal	9,845.7	9,366.5	4,837.0	-0.4	-5.1	-5.5
Bosque abierto	20,301.5	18,911.2	19,193.4	-0.6	0.1	-0.4
Bosque cerrado	18,059.3	19,205.7	23,554.4	0.5	1.6	2.0
Cuerpo de agua	19.0	20.7	16.0	0.7	-2.0	-1.3

Para el año 2023 los resultados sugieren que algunas áreas de pastizal se convirtieron en áreas agrícolas, pero también en bosques abiertos y cerrados. El bosque abierto presentó una tasa de cambio negativa en el periodo 2003-2023, cediendo lugar a aproximadamente 846 ha de pastizales, áreas agrícolas y arenales; sin embargo, un total de 6,551.78 ha pasaron de bosque abierto a bosque cerrado. El uso de suelo con la tasa de cambio positivo más alta fue el bosque cerrado, con una ganancia de 5,495.1 ha. El bosque cerrado también presentó pérdidas de superficies, la principal debido al cambio de bosque cerrado a bosque abierto en 1,839.45 ha. Mientras que el pastizal mostró un decremento de alrededor de 5,000 ha.

Tabla 3
 Matriz de cambios de uso de uso de suelo en el APFF para el periodo 2003-2023

USV	Superficie 2023 (ha)						
	Agricultura	Bosque abierto	Bosque cerrado	Cuerpo de agua	Hielo / arenales	Pastizal	Total
Agricultura	3,738.36	332.33	44.79	0	15.29	553.75	4,684.52
Bosque abierto	168.48	12,903.45	6,551.78	0	0.75	677.06	20,301.52
Bosque cerrado	11.54	1,839.45	16,173.80	0	0	34.50	18,059.30
Cuerpo de agua	0	0	0	14.93	3.68	0.36	18.97
Hielo/arenales	8.99	34.73	23.40	1.10	275.26	334.77	678.25
Pastizal	1,687.96	4,082.15	760.62	0	78.84	3,236.10	9,845.68
Total	5,615.34	19,192.12	23,554.39	16.03	373.82	4,836.54	53,588.24

El mapa de perturbación-recuperación contempla como perturbación a las áreas que pasaron de alguna categoría de bosque a otros usos, mientras que la categoría de recuperación considera áreas que pasaron de otros usos no forestales a bosque. Es

evidente que en el periodo se presenta una recuperación de áreas forestales, que principalmente fueron ocupadas en años anteriores por pastizales. Las zonas recuperadas del APFF representan un 23.7% del total, mientras que las perturbadas 8.4%, el 67.9% restante permaneció sin cambios.

Tabla 4 Matriz de cambios en el APFF para el periodo 2003-2023

Tipo de cambio	Superficie (Ha)	%
Perturbación	4,502.6	8.4
Recuperación	12,718.5	23.7
Sin cambio	36,367.1	67.9
Total	53,588.2	100.0

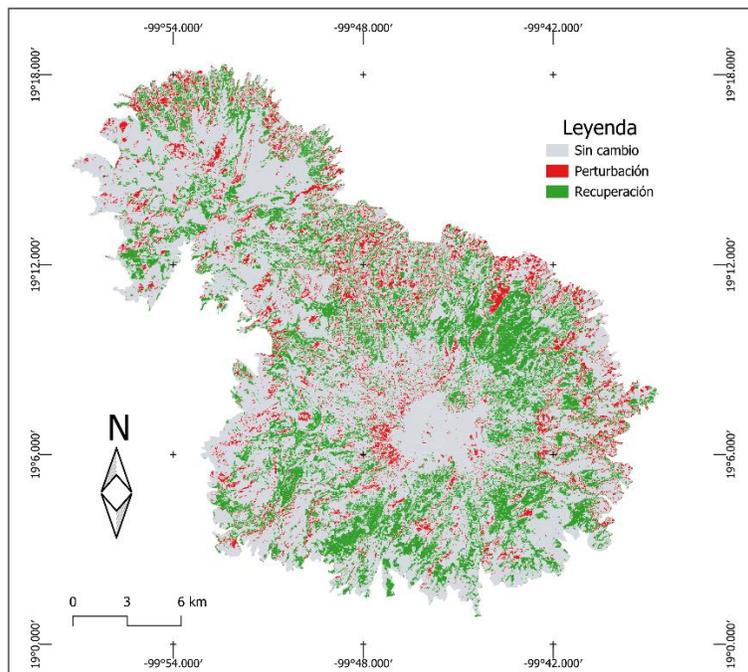


Figura 4. Mapa de perturbación y recuperación de los Usos de Suelo del APFF.

DISCUSIÓN

Cambios en el uso de suelo y vegetación

Debido a la recategorización de la zona de estudio de Parque Nacional a Área de Protección de Flora y Fauna en el Nevado de Toluca, se empezaron a realizar algunas actividades productivas, como el aprovechamiento forestal, que si bien contempla la

extracción de productos maderables de los bosques, también promueve la recuperación de áreas degradadas mediante acciones de reforestación y ejecución de obras de conservación de suelos (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas 2013). De acuerdo con los resultados, el cambio de categoría del APFF y la incorporación de los planes de manejo forestal al área trajeron consigo cambios importantes en algunos usos de suelo, por ejemplo, aumentos en las áreas arboladas tanto de los bosques abiertos, como de los bosques cerrados registrados a partir del año 2013. Existen evidencias reportadas donde se muestra que los aprovechamientos forestales ayudan a la conservación de las masas forestales, como el estudio realizado en los bosques templados de Durango, donde se concluye que estos mantienen la diversidad y mezcla de las especies (Silva-González et al. 2022). Otro trabajo realizado en rodales mixtos en la Sierra Madre de Oaxaca documenta que los aprovechamientos forestales generan mayor densidad arbórea generada por la regeneración natural favorable, además de un sistema maduro en crecimiento (Ramírez-Santiago, et al., 2019). Los cambios positivos en las áreas arboladas del área de estudio también pueden explicarse debido al incremento de apoyos Federales y Estatales para recuperar áreas degradadas en la zona, esto mediante programas de reforestación y la implementación de plantaciones forestales comerciales, establecidas principalmente en las áreas de pastizales, lo cual concuerda con la reducción importante de la superficie en las zonas de pastizal del 17.5% al 9.0% en el periodo 2013-2023.

Nuestros resultados en cuanto a ganancia de superficie en áreas arboladas y la reducción de las zonas agrícolas, coinciden con lo reportado en la dinámica de la cobertura del suelo en el Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz, donde se reflejan ganancias en la cobertura forestal de todo el parque debido a la efectividad del Ejido en el manejo de recursos naturales (Pineda-López, et al., 2017). Los resultados contrastan con los hallazgos en la comunidad de Progreso Hidalgo, Estado de México, donde se evidencian pérdidas en las áreas arboladas, aunque estas son mínimas (tasa anual de cambio de -0.006%) (Camacho-Sanabria, et al., 2017). A pesar de ser una disminución leve, se interpreta como una señal de alerta sobre la reducción de la masa forestal en esa región. Más que atribuir las reducciones únicamente al aprovechamiento forestal, estas se deben principalmente al incremento en la producción agrícola en invernaderos ubicados en la zona, siendo este fenómeno menos evidente en el Área de Protección de Flora y Fauna (APFFyF) del Nevado de Toluca.

Es importante resaltar la considerable reducción de la superficie que corresponde a hielos y arenales de este estudio en todo el periodo evaluado (2003-2023), obtuvimos una tasa de

cambio anual del -4.6%, mismo caso con los cuerpos de agua con una tasa anual de cambio del -1.3%. Una pequeña porción del uso de suelo hielo y arenales fue cubierto por el bosque abierto, esto refleja que las condiciones de temperatura a gradientes altitudinales más elevados han permitido a especies de pino migrar hacia ellos. Otra razón por la cual se dan estos cambios es por las fechas en las que se tomaron las imágenes Landsat y sus variaciones de temperatura de acuerdo con el mes.

Por otra parte, las ANP de la región central de la Sierra Madre Oriental de México han presentado un cambio de uso de suelo en 35,603 hectáreas (42.6%) de su superficie de selvas, bosques y matorrales entre 1989 y 2005, donde las selvas fueron transformadas principalmente en pastizales, los bosques en tierras dedicadas a la agricultura y los matorrales en usos diversos, incluidos los desarrollos urbanos, según lo reportado por Sahagún-Sánchez y Reyes-Hernández (2018). Varios estudios (Pérez-Hernández, et al.; 2021; Zarazua-Rodríguez y Salgado-Vega, 2021) sugieren la necesidad de elaborar un programa de manejo forestal particular de especies maderables y no maderables, que permitan realizar un aprovechamiento sustentable de los recursos forestales, ya sean zonas dentro o fuera de las ANP o implementar acciones que reviertan las tendencias de degradación mediante el fortalecimiento de capacidades institucionales y locales para el aprovechamiento sustentable de los recursos asociados a las cubiertas vegetales.

Los cambios en los usos de suelo dentro del APFF Nevado de Toluca desde el 2013 se dieron principalmente de agricultura a bosque abierto y pastizal, de bosque abierto a bosque cerrado, de pastizal a bosque abierto y a agricultura, de cuerpos de agua a hielo/arenales y de hielo/arenales a pastizal. Estos cambios en su mayoría reflejan mejoras positivas en el sitio, además de que las mayores superficies conservadas son los bosques cerrados y los bosques abiertos. Aunque los cambios negativos fueron pocos, también existen en el área, como, por ejemplo, superficie de bosques, tanto abiertos como cerrados, que se convirtieron en zonas agrícolas o en pastizales, pero principalmente pastizales que fueron convertidos en zonas agrícolas. Estos cambios de un uso de la tierra a otro proporcionan información clave sobre los principales impulsores de las pérdidas y ganancias de hábitat. Estos resultados no se observan comúnmente en áreas protegidas de México, ya que la mayoría de ellas presenta cambios de uso de suelo abruptos, donde la mayor parte de las áreas arboladas son convertidas a zonas agrícolas y ganaderas, son afectadas por el crecimiento demográfico, la tala ilegal y los incendios forestales (Sahagún-Sánchez y Reyes-Hernández, 2018; Pérez-Hernández, et al., 2021).

Otros estudios han reportado que además de la conservación de las áreas arboladas, los aprovechamientos forestales también ayudan a mantener o aumentar el carbono almacenado dentro de los rodales forestales (Palacios-Cruz, et al., 2020), a conservar la densidad y estructura dentro del bosque (Silva-González et al. 2022), así como la densidad arbórea (Cortés, et al., 2020) y la conservación de fauna (Espinoza-Medinilla, et al., 2018).

Validación de mapas

En la evaluación de la confiabilidad de los datos, los resultados derivados de la confiabilidad del usuario desempeñaron un papel crucial para asegurar la generación de valores fidedignos. Esto resulta especialmente significativo debido a la naturaleza a veces difusa de los insumos utilizados en cartografía, lo cual puede dificultar la obtención de una representación cartográfica completamente exenta de errores o ambigüedades (François-Mas, et al., 2003). La confiabilidad de los mapas también se relaciona con los métodos usados para la generación de los cambios de uso de suelo. El enfoque más plausible es generar información sobre cada uno de los factores utilizando métodos de teledetección, análisis estándar basados en laboratorio, investigaciones de campo, depósitos de datos auxiliares y modelos geoespaciales que luego pueden integrarse en un entorno GIS para proporcionar una imagen de los cambios en los usos de suelo (Rashid, et al., 2023). El uso de imágenes Landsat de alta resolución, como las empleadas en este estudio, permiten una mejor subdivisión de clases del uso de suelo y vegetación, proporcionando una comprensión más confiable de los procesos que tienen lugar en paisajes altamente dinámicos asociados a ecosistemas forestales en tendencias históricas del uso de la tierra (Cornejo-Denman, et al., 2020).

Por otro lado, la plataforma de geomática en la nube de Google Earth Engine (GEE) es un recurso sumamente eficaz para aumentar la eficiencia del procesamiento de las imágenes Landsat, lo que permitió la adquisición de datos anuales de uso de la tierra para cumplir con los requisitos de precisión de manera oportuna, que además permite trabajar con grandes volúmenes de imágenes, controlando el porcentaje de nubes y el período de tiempo de las imágenes (Yang y Song, 2023), sumando mayor confiabilidad a los resultados..

CONCLUSIONES

Los resultados presentados en la investigación muestran un panorama alentador, en cuanto a las mejoras en la cobertura vegetal arbolada a partir de la implementación de los programas de manejo forestal, por lo tanto, la hipótesis de que dichos programas aumentan

las coberturas vegetales en estas áreas se acepta. Con el objetivo de la investigación cumplido, a continuación, se resumen los principales aportes encontrados.

La mayor parte de la superficie del APPF Nevado de Toluca al año 2023 está ocupada principalmente por bosques cerrados con 44.0%, seguidos de bosques abiertos 35.8%, mientras que la superficie de los hielos/arenales y cuerpos de agua ocupan la menor proporción de suelo con 0.7 y 0.03 %, respectivamente. Los cambios de uso de suelo en el APPF Nevado de Toluca en el periodo 2003-2023 evidencian de manera general mejoras importantes de acuerdo con las tasas de cambios reportadas. La diferenciación entre los periodos 2003-2013 y 2013-2023, que evidencia la incorporación de los planes de manejo forestal, son notables en cuanto a recuperación de bosques cerrados y bosques abiertos y la reducción de zonas agrícolas y pastizales.

El uso de herramientas modernas, como GGE, proporcionan resultados confiables y permiten mejorar el procesamiento de las imágenes de satélite de alta definición, como Landsat, en México no han sido utilizadas ampliamente, por lo que se recomienda su uso para este tipo de investigaciones. La información obtenida es clave para valorar los procesos de transformación del uso del suelo y su relación con las poblaciones humana, así como los intercambios entre sus interacciones.

La mayoría de las ANP no cuentan con un programa de manejo forestal, los resultados obtenidos sugieren que un plan adecuado es una alternativa viable para estructurar la conservación y los servicios ecosistémicos para las poblaciones cercanas, de igual manera de los derivados de manera indirecta, además de la reducción de incendios forestales, la pérdida de biodiversidad y la degradación ecológica de los sistemas naturales asociados. Sin embargo, el desarrollo de estos planes requiere de un soporte institucional adecuado y la valoración de sus limitaciones y alcances, de manera que no ocurran los procesos de degradación.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CONACYT por la beca otorgada en el programa de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, como parte del financiamiento de este estudio. Así mismo, a los revisores anónimos cuyos comentarios ayudaron a mejorar el manuscrito.

Los autores declaran no tener conflicto de intereses relacionados con el estudio o la zona del estudio.

REFERENCIAS

- Camacho-Sanabria, Raúl, José Manuel Camacho-Sanabria, Miguel Ángel Balderas-Plata, and Marcela Sánchez-López. 2017. "Cambios de Cobertura y Uso de Suelo: Estudio de Caso En Progreso Hidalgo, Estado de México." *Madera Bosques* 23(3):39–60. doi: 10.21829/myb.2017.2331516.
- CEPANAF. 2023. "Áreas Naturales Protegidas." https://cepanaf.edomex.gob.mx/areas_naturales_protegidas
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2013. "Estudio Previo Justificativo Para La Modificación de La Declaratoria Del Parque Nacional Nevado de Toluca, Ubicada En El Estado de México, México."
- CONAFOR. 2023. "Aprovechar El Bosque Con Equilibrio." <https://www.gob.mx/conafor/articulos/aprovechar-el-bosque-con-equilibrio>
- CONAFOR. 2023. "Datos abiertos." <https://snif.cnf.gob.mx/datos-abiertos/>.
- Cornejo-Denman, Lara, José Raúl Romo-León, Kyle Hartfield, Willem JD van Leeuwen, Guillermo E. Ponce-Campos, and Alejandro Castellanos-Villegas. 2020. "Dinámica Del Paisaje En Una Cuenca Hidrográfica Icónica Del Noroeste de México: Información Sobre La Condición de La Vegetación Utilizando Datos de Landsat y PlanetScope." *Remote Sensign*.
- Cortés, Efraín Aguirre, Griselda Escalona Segura, Pedro Antonio Macario Mendoza, Jorge Leonel León Cortés, Luis Candelario Sánchez Pérez, and Birgit Schmook. 2020. "Timber Forestry and Tree Diversity at Six Ejidos in Quintana Roo." *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11(60). doi: 10.29298/rmcf.v11i60.701.
- Espinoza-Medinilla, Eduardo E., Erik J. Torres-Romero, and L. Antonio Tarango-Arámbula. 2018. "Additional Records of Wild Mammals in the Forest Management Area: Los Ocotones, Chiapas, Mexico." *Agrociencia* 52(4):553 – 562.
- François Mas, Jean, José Reyes Díaz-Gallegos, and Azucena Pérez Vega. 2003. "Evaluación de La Confiabilidad Temática de Mapas o de Imágenes Clasificadas : Una Revisión." *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía, UNAM* 53–72.
- Gorelick, Noel, Matt Hancher, Mike Dixon, Simon Ilyushchenko, David Thau, and Rebecca Moore. 2017. "Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone." *Remote Sensing of Environment* 202:18–27. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- INEGI. 2003. "Uso de Suelo y Vegetación."
- Leal Villamíl, Julián, Mauricio Alejandro Perea Ardila, and Jaime López Carvajal. 2020.

"Índices de Vegetación Para La Clasificación de Coberturas Del Terreno: Cuenca Del Río Combeima, Colombia." *Revista Geográfica Venezolana* 61(2):396–411.

- Luo, Xiaobo, Wenya Zhao, Shiqiang Wei, and Qinghua Fu. 2015. "Study on Urban Remote Sensing Classification Based on Improved RBF Network and Normalized Difference Indexes." *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition* 8(10):257–70. doi: 10.14257/ijsp.2015.8.10.27.
- Maass, Sergio Franco, Héctor Hugo Regil García, Carlos González Esquivel, and Gabino Nava Bernal. 2006. "Cambio de Uso Del Suelo y Vegetación En El Parque Nacional Nevado de Toluca, México, En El Periodo 1972-2000." *Investigaciones Geográficas* 61(100):38–50.
- Olofsson, Pontus, Giles M. Foody, Martin Herold, Stephen V Stehman, Curtis E. Woodcock, and Michael A. Wulder. 2014. "Good Practices for Estimating Area and Assessing Accuracy of Land Change." *Remote Sensing of Environment* 148:42–57. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>.
- Palacios-Cruz, Dorian J., Héctor M. los Santos-Posadas, Gregorio Ángeles-Pérez, Aurelio M. Fierros-González, and Wenceslao Santiago-García. 2020. "Growth and Yield System to Evaluate Carbon Sinks in Managed Pinus Patula Schiede Ex Schltdl. et Cham. Forests; [Sistema de Crecimiento y Rendimiento Para Evaluar Sumideros de Carbono En Bosques de Pinus Patula Schiede Ex Schltdl. et Cham. Bajo Aprovechami." *Agrociencia* 54(2):241 – 257.
- Pérez Hernández, María Jesús, Elizabeth Hernández Acosta, Rosa Sánchez Jiménez, Catalina González Gervacio, and Susana Madrigal Reyes. 2021. "Dinámica de Cambios de Uso de Suelo y Vegetación Por Actividades Antropogénicas En Zaachila, Oaxaca." *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12(66).
- Pineda-López, María del Rosario, Ernesto Ruelas Inzunza, Lázaro R. Sánchez-Velásquez, Marco A. EspinozaGuzmán, Alberto Rojo Alboreca, and Suria G. Vásquez-Morales. 2017. "Dynamics of Land Use and Land Cover in a Mexican National Park." *Madera y Bosques* 23:87–99. doi: 10.21829/myb.2017.2331492.
- Ramírez Santiago, Rosario, Gregorio Ángeles Pérez, Patricia Hernández de La Rosa, Víctor Manuel Cetina Alcalá, Ofelia Plascencia Escalante, and Ricardo Clark-Tapia. 2019. "Efectos Del Aprovechamiento Forestal En La Estructura, Diversidad y Dinámica de Rodales Mixtos En La Sierra Juárez de Oaxaca, México." *Madera y Bosques* 25(3). doi: 10.21829/myb.2019.2531818.
- Rashid, Irfan, Sheikh Aneaus, Shahid Ahmad Dar, Ovaïd Javed, Shabir Ahmad Khanday, and Sami Ullah Bhat. 2023. "A Novel GIS-Based Multicriteria Analysis

Approach for Ascertaining the Catchment-Scale Degradation of a Himalayan Wetland." *Environmental Research* 229. doi: 10.1016/j.envres.2023.115967.

- Rujoiu-Mare, Marina-Ramona, and Bogdan-Andrei Mihai. 2016. "Mapping Land Cover Using Remote Sensing Data and GIS Techniques: A Case Study of Prahova Subcarpathians." *Procedia Environmental Sciences* 32:244–55. doi: 10.1016/j.proenv.2016.03.029.
- Sahagún-sánchez, Francisco Javier, and Humberto Reyes-hernández. 2018. "Impactos Por Cambio de Uso de Suelo En Las Áreas Naturales Protegidas de La Región Central de La Sierra Madre Oriental." *Biología y Química* 12(2):6–21.
- Silva-González, Edgar, Oscar Alberto Aguirre-Calderón, Eduardo Alanís- Rodríguez, Marco Aurelio González-Tagle, Eduardo Javier Treviño-Garza, and José Javier Corral-Rivas. 2022. "Structure of a Temperate Forest in the State of Durango Introducción En El Manejo Sustentable de Bosques Mixtos , Es Primordial Conservar La Biodiversidad." *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 13(71). doi: 10.29298/rmcf.v13i71.1017.
- U.S Geological Survey. 2003. "LANDSAT DATA USERS HANDBOOK." <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>.
- Villavicencio Gorda, Raymundo, Ana Luisa Santiago Pérez, José de Jesús Godínez Herrera, José María Chávez Anaya, and Sandra Luz Toledo González. 2019. "Efecto De La Fragmentación Sobre La Regeneración Natural En La Sierra De Quila, Jalisco." *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(11):9–24. doi: 10.29298/rmcf.v3i11.514.
- Yang, Dazhi, and Wei Song. 2023. "Tracking Land Use Trajectory to Map Abandoned Farmland in Mountainous Area." *Ecological Informatics* 75:102103. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102103>.
- Zarazua Rodríguez, Alfredo David, and María del Carmen Salgado Vega. 2021. "Estrategia Sustentable En Las Áreas Naturales Protegidas Del Estado de México Para La Adaptación Al Cambio Climático Frente Al 2021." 1–18.
- Zhao, Jingbo, Benny Thörnberg, Yan Shi, and Ashkan Hashemi. 2012. "Color Segmentation on FPGA Using Minimum Distance Classifier for Automatic Road Sign Detection." *IST 2012 - 2012 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques, Proceedings* 516–21. doi: 10.1109/IST.2012.6295528.