

Transformación multitemporal de la vegetación y usos del suelo en el Nevado de Toluca (1970-2020)

Multi-temporal transformation of vegetation and land uses in Nevado de Toluca (1970-2020)

Parix Lunex Luna Palacios

Universidad Autónoma del Estado de México, México

proyecx@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-6035-7069>

Salvador Adame Martínez

Universidad Autónoma del Estado de México, México

sadamem@uaemex.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-4499-0099>

Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo

Universidad Autónoma del Estado de México, México

jggutierrezc@uaemex.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-0089-701X>

Recepción: 21 Agosto 2024

Aprobación: 02 Noviembre 2024



Acceso abierto diamante

Resumen

El objetivo de este estudio fue analizar e identificar los cambios en la cobertura forestal y el uso del suelo en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca entre 1970 y 2020. Donde se busca entender las transiciones y dinámicas del bosque en el área natural protegida, la cual cambió su estatus en 2014 al dejar de ser un Parque Nacional. Para el estudio se utilizó una matriz de cambios de vegetación y uso del suelo, analizando intervalos de 5 años y generando 11 periodos de información. Para este proceso se obtuvo la cartografía digital mediante el proceso de fotointerpretación de imágenes aéreas esto para el ciclo de 1970 a 1995; mientras que para el periodo de 2000 a 2020 se usaron imágenes multi espectrales de la plataforma Landsat y Sentinel, mediante el método de clasificación supervisada. En cada uno de estos tiempos se utilizó la metodología de Pontius, la cual permitió identificar incrementos y disminuciones en la densidad de las coberturas. Dando como resultado que la cobertura arbórea de coníferas aumentó un 6.67% en 50 años, equivalente a 3,577 ha, mientras que los asentamientos humanos crecieron un 0.28%, sumando 148.92 ha.

Palabras clave: Área natural protegida, Bosques de coníferas, Cambios de uso de suelo, Clasificación supervisada, Vegetación arbórea.

Abstract

The objective of this study was to analyze and identify changes in forest cover and land use in the Nevado de Toluca Flora and Fauna Protection Area between 1970 and 2020. Where we seek to understand the transitions and dynamics of the forest in the area. protected natural area, which changed its status in 2014 when it was no longer a National Park. For the study, a matrix of vegetation

Notas de autor

proyecx@gmail.com

and land use changes was used, analyzing 5-year intervals and generating 11 information periods. For this process, digital cartography was obtained through the process of photointerpretation of aerial images for the cycle from 1970 to 1995; while for the period from 2000 to 2020, multi-spectral images from the Landsat and Sentinel platform were used, using the supervised classification method. In each of these times, the Pontius methodology was used, which made it possible to identify increases and decreases in the density of the coverage. Resulting in coniferous tree cover increasing by 6.67% in 50 years, equivalent to 3,577 ha, while human settlements grew by 0.28%, totaling 148.92 ha.

Keywords: Protected natural area, Coniferous forests, Land use changes, Supervised classification, Tree vegetation.

Introducción

Las áreas de protección se crean para conservar especies a lo largo del tiempo y el espacio, con un enfoque social y organizativo que resalta el valor de sus componentes y de aquellos que evolucionan. Algunas de estas áreas dan lugar a paisajes sostenibles, mientras que otras enfrentan cambios importantes en su gestión. El Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT) es una de las zonas de conservación en el Estado de México, rodeada por localidades que enfrentan constantes dinámicas de crecimiento urbano, cambios en el uso del suelo y diversas modalidades de manejo forestal (CONAFOR, 2023). Este proceso se evidenció especialmente en 2014, cuando su categoría cambió de parque nacional a área de protección (Olvera García & Pichardo Pagaza, 2017). Evaluar el estado de conservación de esta zona permitirá identificar las dinámicas que ha experimentado a lo largo del período analizado.

La intervención humana es una de las principales causas de la disminución de la flora y fauna nativa, afectando tanto a las especies individuales como al equilibrio de los ecosistemas. La construcción de infraestructuras fragmenta el hábitat, interrumpiendo la conectividad entre poblaciones, lo que dificulta la migración, reproducción e intercambio genético. Esto lleva a una reducción de la diversidad biológica y aumenta la vulnerabilidad de las especies ante cambios ambientales. Además, la alteración del paisaje reduce los nichos ecológicos, limitando la supervivencia y adaptación de las especies nativas. La competencia por recursos escasos puede provocar un colapso poblacional y disminuir la riqueza biológica (CONANP, 2023). Comprender estas dinámicas es esencial para desarrollar estrategias de conservación efectivas.

La estimación y cartografía de la distribución de los bosques mediante sensores remotos producen índices de vegetación confiables, que son esenciales para evaluar la cobertura forestal (Foody et al., 2001; Lumbres & Lee, 2014). Por esta razón, es necesario estandarizar las coberturas para elaborar cartografía de diferentes fechas, lo que posibilita comparaciones objetivas sobre los cambios en la cobertura y uso del suelo a lo largo del tiempo, y facilita un análisis detallado de los procesos de transformación (Duarte et al., 2016). Evaluar los cambios y la condición actual de la cobertura forestal en un período específico es crucial para determinar si ha habido pérdidas o aumentos en las extensiones arbóreas y de vegetación. Este análisis proporciona información relevante sobre el estado de conservación de la zona, lo que permite identificar tendencias y patrones que pueden influir en la biodiversidad local y en la salud del ecosistema en general. Además, entender estos cambios ayuda a implementar medidas de gestión adecuadas y a priorizar acciones de conservación.

La conservación se ha convertido en una estrategia global, impulsada por la creciente preocupación por la degradación ambiental y la pérdida de biodiversidad. Este enfoque está claramente reflejado en el Objetivo de Desarrollo Sostenible 15.2, que promueve la gestión sostenible de todos los tipos de bosques, la erradicación de la deforestación y la recuperación de bosques degradados a nivel mundial (ONU, 2022). Al alinearse con estos objetivos globales, los esfuerzos de conservación local no solo contribuyen al bienestar de la región, sino que también se integran en un marco más amplio de sostenibilidad que busca preservar los recursos naturales para las futuras generaciones.

El APFFNT fue declarada Parque Nacional en 1936, lo que marcó un hito en la conservación de sus recursos naturales y la protección de su biodiversidad. Sin embargo, en 2014, se produjo un cambio de categoría que transformó su estatus, lo que ha tenido implicaciones significativas en las dinámicas ambientales y sociales de la región. Esta transición ha afectado no solo la gestión y el uso del territorio, sino también las interacciones entre las comunidades locales y el entorno natural. Esta área de conservación forma parte de las 97 Áreas Naturales Protegidas de la entidad, con una superficie total de 53,590.67 ha, actualmente administrada por la Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna (CEPANAF, 2022).

Dada esta nueva realidad, es fundamental llevar a cabo un análisis exhaustivo que evalúe el cumplimiento de las metas de protección y conservación establecidas dentro de los límites del APFFNT. Este análisis permitirá identificar los desafíos y oportunidades que surgen a partir del cambio de categoría, así como medir el impacto

de las políticas de conservación en la biodiversidad, la calidad del hábitat y el bienestar de las comunidades aledañas. Además, comprender estas dinámicas es crucial para adaptar las estrategias de manejo y garantizar que se cumplan los objetivos de conservación a largo plazo, promoviendo así un equilibrio entre la preservación del medio ambiente y el desarrollo sostenible de la región. El monitoreo de áreas protegidas es fundamental para apoyar el diseño e implementación de políticas públicas en el sector forestal, así como para guiar la toma de decisiones relacionadas con la conservación, protección, restauración y manejo sostenible de los ecosistemas forestales (CONAFOR, 2023).

Además, documentar los cambios históricos en el uso del suelo y la vegetación es fundamental, ya que proporciona un contexto temporal clave para los estudios ecológicos y la formulación de políticas de conservación (Duarte et al., 2016; Gordillo Ruiz & Castillo Santiago, 2016; Hernández Cavazos et al., 2023). Esta información histórica permite comprender cómo las prácticas humanas han influido en los ecosistemas a lo largo del tiempo y cómo estos han respondido a diferentes presiones ambientales. Al analizar estas transformaciones, los investigadores pueden identificar patrones y tendencias que ayudan a predecir futuras dinámicas en los ecosistemas.

Asimismo, contar con un registro detallado de estos cambios es crucial para el diseño de estrategias de conservación efectivas, ya que permite a los responsables de la formulación de políticas establecer prioridades y evaluar el impacto de intervenciones pasadas. Al integrar esta perspectiva histórica en el proceso de toma de decisiones, se pueden desarrollar políticas más informadas y adaptativas que consideren no sólo la situación actual, sino también la trayectoria de los ecosistemas en el tiempo (Duarte et al., 2016; Gordillo Ruiz & Castillo Santiago, 2016; Hernández Cavazos et al., 2023). Este enfoque integral es esencial para garantizar la sostenibilidad de los recursos naturales y la protección de la biodiversidad en el futuro.

El objetivo de este estudio fue analizar e identificar los cambios en la cobertura forestal y el uso del suelo en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca durante el período de 1970 a 2020, enfocándose en intervalos de cinco años para proporcionar un análisis detallado y riguroso. Este enfoque temporal permite establecer con mayor precisión las transiciones y dinámicas del bosque dentro de esta área natural protegida, facilitando una comprensión más profunda de los procesos que han influido en su evolución a lo largo del tiempo. A través del diagnóstico del proceso de cambio en el uso del suelo y la vegetación, se busca no solo identificar las tendencias de pérdida o expansión de la cobertura forestal, sino también comprender los factores socioeconómicos, políticos y ambientales que han contribuido a estos cambios. Este análisis es esencial para informar futuras estrategias de gestión y conservación, al ofrecer una base sólida sobre la que se pueden construir políticas efectivas que garanticen la sostenibilidad de los recursos naturales en el área.

Materiales y método

La metodología empleada para obtener información cartográfica sobre el uso del suelo y la vegetación se llevó a cabo mediante un enfoque de fotointerpretación y clasificación supervisada de imágenes aéreas, específicamente orientado a identificar cambios en las coberturas. Este proceso tomó como base la clasificación de las cartas de uso del suelo proporcionadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y el trabajo de Miranda y Hernández (Miranda & Hernández, 1963). Gracias a estas clasificaciones se pudo homologar la cartografía de los usos de suelo en diferentes momentos, lo que permitió establecer comparaciones consistentes a lo largo de los tiempos de estudio.

El procedimiento metodológico para la obtención de los archivos digitales y los análisis finales se llevó a cabo utilizando tecnología avanzada de sistemas de información geográfica (SIG). Esta tecnología facilita la visualización, análisis y manipulación de datos espaciales, lo que resulta esencial para una interpretación precisa de los cambios en el uso del suelo y la vegetación. El esquema metodológico seguido en este estudio, que se ilustra en la figura 1, detalla las etapas desde la captura de imágenes hasta el procesamiento y análisis de los datos, asegurando que cada fase del proceso esté bien documentada y estructurada.

Además, esta metodología no solo permite una evaluación cuantitativa de los cambios en la cobertura forestal, sino que también apoya un análisis cualitativo que puede revelar patrones y tendencias importantes. Así, los resultados obtenidos contribuyen significativamente a la comprensión de las dinámicas ecológicas en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, ofreciendo una base sólida para futuras investigaciones y decisiones de gestión en la región.

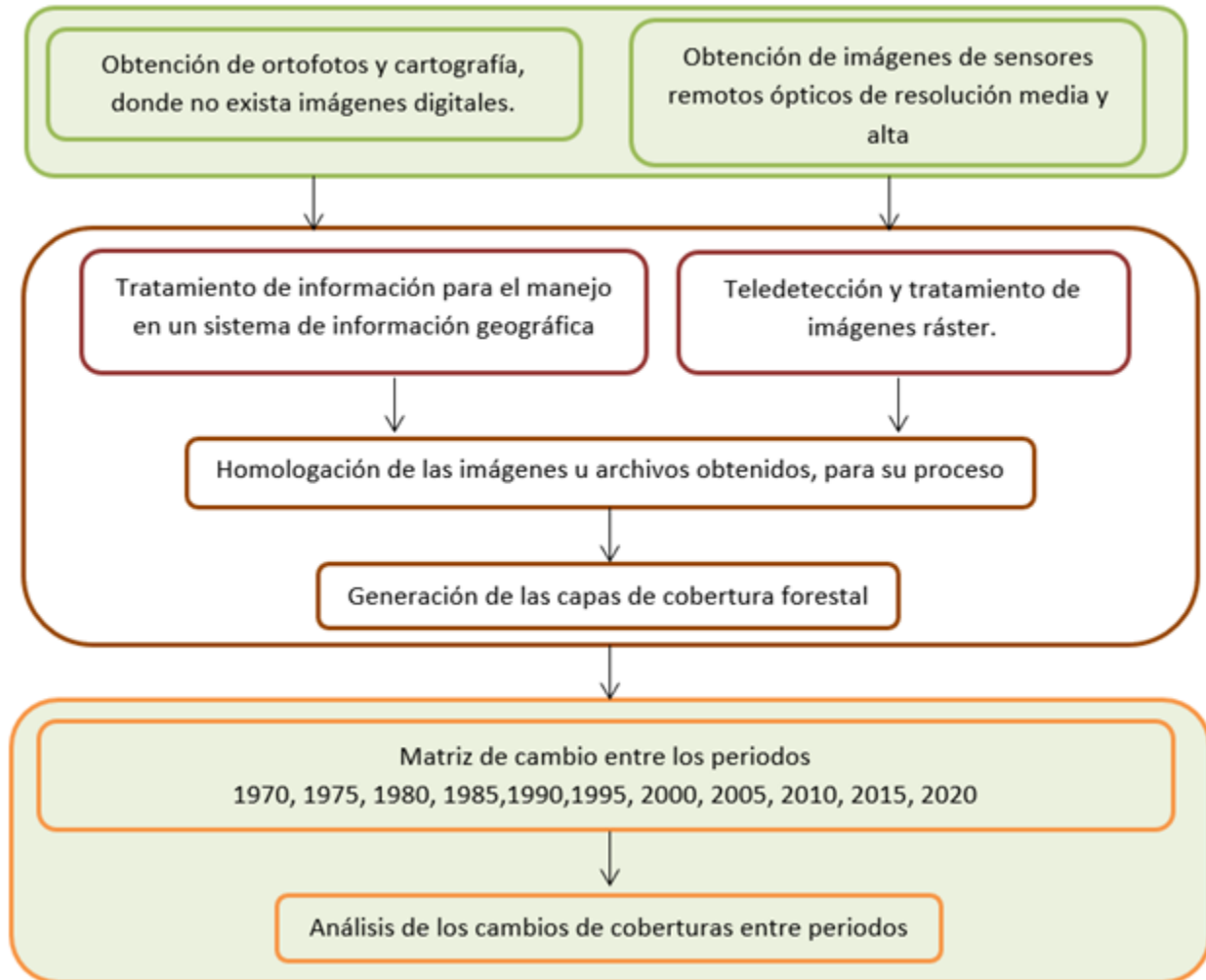


Figura 1.

Esquema metodológico aplicado en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia, 2024

La generación de cartografía homologada y estandarizada es un primer paso esencial para llevar a cabo un análisis comparativo multitemporal. Para lograrlo, se realizó una exhaustiva estandarización de la información, lo que llevó a la decisión de crear nueva cartografía para cada uno de los períodos de estudio. Estas nuevas clasificaciones se basan en imágenes satelitales y fotografías aéreas existentes de la zona, asegurando así una representación precisa y actualizada de las condiciones del uso del suelo y la vegetación en cada momento analizado. Algunos estudios previos han destacado la importancia de utilizar la clasificación de imágenes para la generación de nuevos insumos. Estos estudios indican que, si se realizan correctamente, las técnicas de fotointerpretación y análisis de imágenes pueden arrojar datos altamente precisos y fiables, siempre que estén alineadas con los objetivos específicos de investigación (He et al., 2021; Li et al., 2021; Wang et al., 2021). Este

enfoque no solo mejora la calidad de la cartografía generada, sino que también permite un análisis más robusto de las dinámicas de cambio en la región.

Al establecer una metodología rigurosa y estandarizada para la cartografía, se facilita la comparación de datos a lo largo del tiempo, lo que es crucial para identificar tendencias significativas en el uso del suelo y la cobertura forestal. Además, esta práctica contribuye a la creación de un banco de datos valioso que puede ser utilizado por investigadores y tomadores de decisiones para desarrollar estrategias de gestión y conservación más efectivas en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca y otras áreas similares.

En este estudio, se utilizaron intervalos de tiempo de 5 años, resultando en los siguientes años de análisis: 1970, 1975, 1980, 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 y 2020. Esto da como resultado 11 períodos distintos, cada uno con características específicas y agrupaciones bien definidas. Para los intervalos de tiempo del periodo 1970 a 1995, se generó la cartografía utilizando fotointerpretación de imágenes aéreas del INEGI (INEGI, 2023b). Para los períodos de 2000 a 2020, se descargaron imágenes de los satélites LandSat y Sentinel, que fueron procesadas con el software Erdas Image 2015 utilizando el método de clasificación supervisada.

La clasificación de coberturas para los períodos mencionados se fundamentó en el trabajo de Miranda y Hernández, así como en la carta de vegetación y uso de suelo del INEGI (Miranda & Hernández, 1963). Para llevar a cabo esta clasificación, se verificaron los tipos de coberturas que podían identificarse a partir de las imágenes disponibles, lo que permitió establecer un total de 9 clases distintas. Las categorías resultantes incluyen: cobertura agrícola, cuerpos de agua, bosque de coníferas (incluyendo oyamel, ayarín y cedro), bosque de coníferas (comprendiendo pino y táscate), áreas desprovistas de vegetación, minas de arena, pastizales, pastizales alpinos y asentamientos humanos (INEGI, 2023a). Esta clasificación no solo proporciona un marco claro para entender la distribución de los diferentes tipos de cobertura en el área de estudio, sino que también sirve como base para futuros análisis sobre las dinámicas de cambio en el uso del suelo y vegetación, facilitando una mejor gestión de los recursos naturales y la planificación del uso del suelo en el Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca.

Otro aspecto crucial del estudio fue la verificación de las coberturas existentes en cada intervalo de tiempo. Para llevar a cabo esta comprobación, se utilizaron puntos de muestreo de diferentes años e instituciones, lo que permitió contar con una amplia variedad de datos y referencias. Además, se realizó una consulta exhaustiva de bases de datos sobre especies vegetales, destacando las aportaciones de INEGI y de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

Este enfoque integrador incluyó también la realización de muestreos de campo, los cuales fueron esenciales para validar las coberturas identificadas a través de la fotointerpretación y el análisis de imágenes satelitales. Los muestreos de campo permitieron recoger datos directos sobre la vegetación y el uso del suelo, lo que contribuyó a una mayor precisión en la clasificación de coberturas y a una comprensión más profunda de las dinámicas ecológicas de la zona. Al combinar datos de diferentes fuentes y métodos, se logró crear un marco robusto para el análisis, garantizando la fiabilidad de los resultados y facilitando la identificación de tendencias significativas en el uso del suelo y la vegetación a lo largo del tiempo (Massé & Salas, 2020).

Posteriormente a este proceso, se perfeccionaron los resultados mediante la consulta de un servidor web de imágenes satelitales correspondientes a los años de interés. Esta etapa fue crucial para validar y enriquecer la información obtenida, ya que permitió acceder a datos actualizados y de alta resolución. El análisis se llevó a cabo utilizando el software QGIS (QGIS Development Team, 2023), una herramienta poderosa para el procesamiento y análisis de datos geoespaciales. En este entorno, se transformó la información recopilada a un archivo de tipo TIF, que es un formato ampliamente utilizado en sistemas de información geográfica debido a su capacidad para almacenar imágenes de alta calidad y metadatos asociados. La conversión se realizó con una escala de 1:10,000, lo que proporciona un nivel de detalle suficiente para el análisis cartográfico y permite una visualización precisa de las coberturas del suelo.

Este proceso no solo mejoró la precisión de los datos, sino que también facilitó la integración de la información en futuros análisis espaciales y comparativos. Al contar con una base de datos geoespacial bien

estructurada, se facilitará el seguimiento de las dinámicas en el uso del suelo y la vegetación a lo largo del tiempo, lo que es esencial para la toma de decisiones en materia de conservación y gestión de recursos naturales.

Todos los períodos analizados recibieron tratamientos específicos en función de su complejidad y del origen de la información disponible. Este enfoque personalizado fue particularmente relevante para los intervalos de 1970 a 1995, donde la calidad de los datos era un factor determinante en el proceso de análisis. Durante este periodo, se utilizó tanto fotografía aérea como ortomosaicos que ya habían sido rectificados, lo que garantiza una mayor precisión geográfica. Toda esta información pasó por un riguroso proceso de limpieza topológica, diseñado para eliminar errores de digitalización y resolver problemas de superposición con otras coberturas digitalizadas (Cooper et al., 2021; He et al., 2021; Li et al., 2021). Este paso fue esencial para garantizar la integridad y la precisión de los datos geoespaciales, ya que cualquier error en la digitalización podría afectar negativamente los resultados del análisis posterior.

Durante la limpieza topológica, se identificaron y corrigieron inconsistencias, como líneas no conectadas, polígonos solapados y otras anomalías que podrían distorsionar la representación del uso del suelo y la vegetación. Esta atención al detalle no solo mejoró la calidad de los datos, sino que también facilitó una integración más fluida de las diferentes capas de información en el sistema de información geográfica (SIG). Una vez finalizado este proceso de limpieza, se generaron los archivos TIF, que son un formato estándar requerido para las siguientes etapas de tratamiento y análisis. Estos archivos TIF permiten una visualización y análisis más efectivos, así como la posibilidad de realizar superposiciones con otros conjuntos de datos geoespaciales. Al contar con archivos bien estructurados y precisos, se sientan las bases para realizar un análisis detallado y fiable de las dinámicas de cambio en el uso del suelo y vegetación en el área de estudio.

La homologación de archivos fue un paso fundamental para llevar a cabo un análisis de superposición de los diferentes períodos. Este proceso se realizó utilizando el software TERRSET, que permite la comparación de dos imágenes mediante el módulo "Land Change Modeler". A través de esta herramienta, se efectuó una comparación exhaustiva entre los distintos lapsos de tiempo, lo que facilitó la identificación y visualización de cambios en la cobertura del suelo a lo largo de los años. Además, se elaboró un cruce de datos (cross-tab) que incorporó toda la información de los 11 períodos estudiados. Esta matriz de cambios de uso del suelo fue desarrollada siguiendo la metodología propuesta por Pontius, que es reconocida por su capacidad para representar de manera clara y estructurada los cambios en el uso del suelo. La matriz permite una tabulación cruzada de datos que, mediante fórmulas específicas, facilita la identificación de pérdidas, ganancias, intercambios, así como el cambio total y el cambio neto en la cobertura del suelo.

Este enfoque no solo proporciona una visión cuantitativa de los cambios, sino que también permite calcular la tasa de transformación, lo que ofrece una perspectiva más detallada sobre la dinámica de uso del suelo en el área de estudio (Pontius et al., 2004). Al contar con estos datos, se puede realizar un análisis más profundo de las tendencias y patrones de cambio. El análisis del cambio en la cobertura y uso del suelo es una metodología utilizada para evaluar los cambios que ocurren en períodos específicos. Este tipo de análisis se ha empleado para investigar procesos como la deforestación, la degradación ambiental, las modificaciones en la biodiversidad terrestre y las alteraciones en el ciclo hidrológico, entre otros aspectos (R. Pontius & Petrova, 2010; Wang et al., 2021). Su relevancia radica en la capacidad de cuantificar estos cambios y realizar proyecciones futuras basadas en registros históricos, lo que resulta fundamental para la planificación y gestión ambiental (Sánchez-Reyes et al., 2017).

Es importante destacar que la cobertura y el uso del suelo son conceptos distintos que permiten una comprensión más precisa de la configuración de la superficie terrestre. La "cobertura" se refiere a la cubierta vegetal observada sobre la superficie, mientras que el "uso del suelo" se caracteriza por las actividades que las personas llevan a cabo sobre dicha cobertura, lo que puede implicar su transformación o conservación. Estos procesos son regulados por impulsores de cambio, que pueden ser directos (como la urbanización) o indirectos (como cambios en políticas ambientales) (Hernández Cavazos et al., 2023; Pineda Jaimes et al., 2009; Sandoval-García et al., 2021).

La tasa de cambio es un indicador crucial que permite evaluar la magnitud y velocidad de estos procesos. Su análisis es esencial para entender la dinámica del cambio y sus efectos sobre el medio ambiente (Velázquez et al., 2002). Para cuantificar estos cambios, se lleva a cabo un análisis de la dinámica de la cubierta vegetal en relación con el espacio y el tiempo. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) sugiere una fórmula que expresa el cambio en porcentaje de la superficie en comparación con el año inicial (FAO PNUMA, 2020). Este enfoque proporciona una base sólida para tomar decisiones informadas sobre la gestión y conservación de los recursos naturales, contribuyendo a un uso sostenible del territorio.

$$tc = (((S2/S1) (1/t))) * 100) - 100$$

Donde:

tc = tasa de cambio (en %)

S1 = superficie en la fecha inicial

S2 = superficie en la fecha final

t = diferencia de años entre fecha inicial y final

Tradicionalmente, la localización y cuantificación de los cambios en la ocupación del suelo se llevan a cabo mediante la superposición cartográfica y la elaboración de matrices de transición. Este enfoque genera mapas y datos que permiten identificar tanto la magnitud como la distribución espacial de la dinámica del cambio. Pontius et al. (2004) propusieron un método que se basa en estas matrices de transición (ver tabla 1). Este método proporciona un marco informativo que va desde un análisis general hasta un examen detallado de los cambios en el entorno. Los resultados se expresan en términos de ganancias, pérdidas, intercambios, persistencias, cambio neto y cambio total de las coberturas existentes. El objetivo es comparar los cambios observados y evaluar el grado de persistencia de cada tipo de cobertura.

Además, el análisis permite investigar el proceso aleatorio de ganancia y pérdida mediante el cálculo de la diferencia porcentual respecto al área total y el cociente de magnitud. Si la diferencia entre el porcentaje observado y el esperado es positiva, indica que las categorías del tiempo 1 (t1) han perdido más de lo que se anticipa en un proceso aleatorio de ganancia. Por el contrario, si la diferencia es negativa, significa que estas categorías han perdido menos de lo esperado (ver tabla 1) (Pontius et al., 2004).

Tabla 1.
Matriz de transición de coberturas de Pountius.

	Tiempo 2				Total tiempo 1	Pérdidas
	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4		
Tiempo 1	Categoría 1	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	$P_{1+} - P_{11}$
	Categoría 2	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{24}	$P_{2+} - P_{22}$
	Categoría 3	P_{31}	P_{32}	P_{33}	P_{34}	$P_{3+} - P_{33}$
	Categoría 4	P_{41}	P_{42}	P_{43}	P_{44}	$P_{4+} - P_{44}$
	Total tiempo 2	P_{+1}	P_{+2}	P_{+3}	P_{+4}	
	Ganancias	$P_{+1} - P_{11}$	$P_{+2} - P_{22}$	$P_{+3} - P_{33}$	$P_{+4} - P_{44}$	

Fuente: Elaboración propia con datos de Pontius et al. (2004).

La "ganancia" (G_{ij}) mide la proporción del paisaje que ha incrementado su cobertura o uso del suelo entre dos fechas. Se calcula de la siguiente manera:

Diferencia Total: Se determina el total de la cobertura en la fecha final (t_2), que incluye todas las áreas ocupadas.

Persistencia: Se evalúa la parte del paisaje que ha permanecido constante en la misma categoría entre t_1 y t_2 .

Cálculo de Ganancia: La ganancia se obtiene restando la persistencia del total en t_2 , lo que revela cuánta área ha cambiado a una nueva cobertura.

En resumen, G_{ij} indica el aumento en la proporción del paisaje que ha cambiado entre los dos períodos, reflejando las transformaciones en el uso del suelo.

$$G_{ij} = P_{+j} - P_{jj} \quad [\text{Ecuación 1}]$$

La pérdida (L_{ij}), que representa la proporción del paisaje que decrece entre ambas fechas, se obtienen calculando la diferencia entre la fila del total del tiempo 1 (P_{j+}) y la persistencia (P_{jj}). (Pontius et al., 2004)

$$L_{ij} = P_{j+} - P_{jj} \quad [\text{Ecuación 2}]$$

El intercambio (S_j) entre categorías es un concepto que abarca simultáneamente tanto la ganancia como la pérdida de una categoría de ocupación en relación con una cobertura. Este intercambio ocurre cuando la localización de una categoría de ocupación varía entre dos fechas, aunque su superficie total se mantenga constante. En este sentido, por cada unidad de ganancia en una categoría, hay una cantidad equivalente de pérdida en otra. Este valor se calcula como el doble del valor mínimo entre las ganancias y las pérdidas (Pontius et al., 2004).

$$S_j = 2 \times \text{MIN} (P_{j+} - P_{jj}, P_{+j} - P_{jj}) \quad [\text{Ecuación 3}]$$

La persistencia se refiere a la cantidad de superficie de las diferentes clases que se mantuvieron estables a lo largo de los períodos estudiados, y puede ser obtenida de la diagonal principal de la matriz. Por otro lado, el cambio total (DTj) se define como la suma de todas las proporciones del paisaje que han experimentado cambios. El cambio neto, en contraste, representa un cambio definitivo en el paisaje, ya que se calcula como la diferencia entre el cambio total y el intercambio, expresada en valores absolutos (Pontius et al., 2004).

$$DTj = (Gij + Lij) \quad [\text{Ecuación 4}]$$

$$Dj = |DTj - Sj| \quad [\text{Ecuación 5}]$$

Resultados y discusión

La matriz de transición proporciona una representación numérica de los cambios ocurridos durante el período estudiado, expresándose en valores relativos que reflejan el porcentaje de cada categoría y su relación de cambio con otras categorías. Este análisis se realiza comparando la superficie original de la primera fecha con la superficie correspondiente a la nueva fecha, teniendo en cuenta las transiciones respectivas, tal como lo indican Bocco et al. (2001).

Los resultados obtenidos fueron generados para 11 períodos, cada uno clasificado en 9 categorías para el APFFNT del periodo 1970-2020 (ver figuras 2 y 3); esto ha sido realizado por lo reportado por Hernández Pérez (2022) en su trabajo de cambio de uso de suelo ubicado en Veracruz en donde solo usan 2 tiempos.

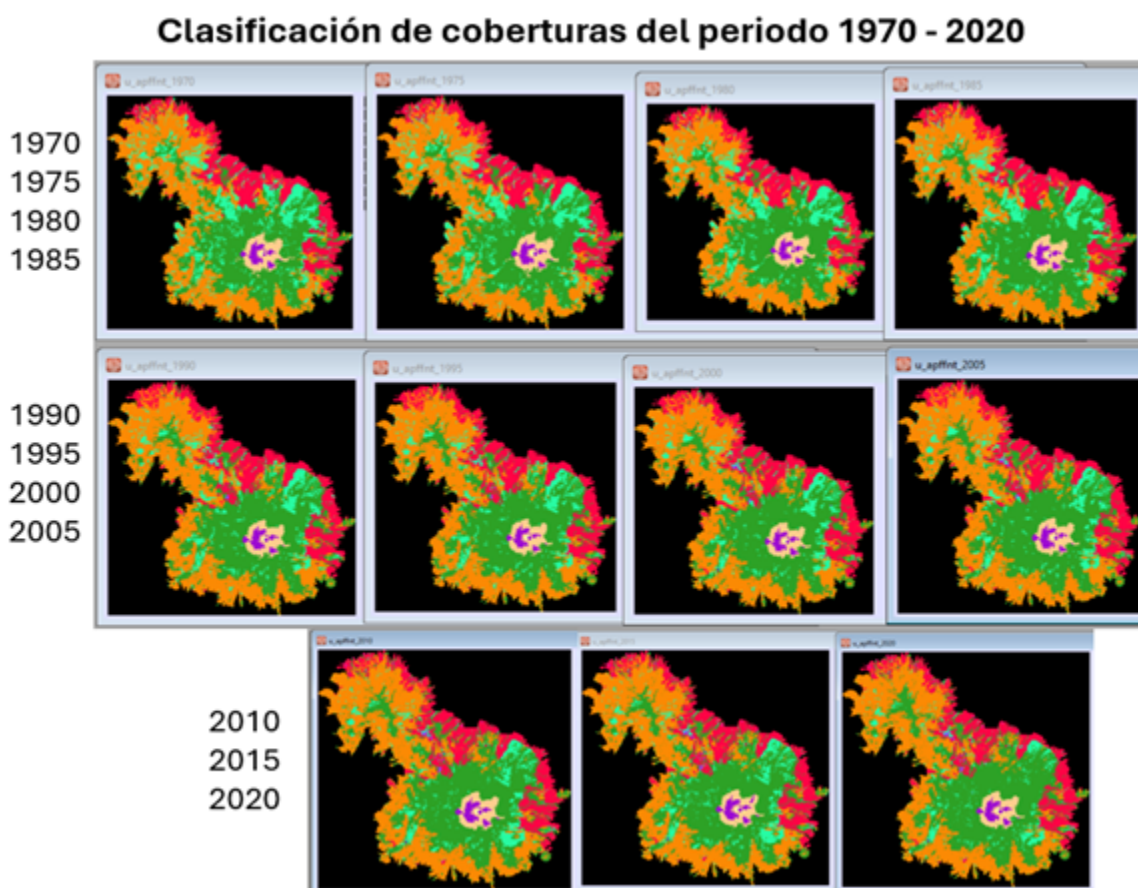


Figura 2.
Resultados de los 11 tiempos generados del APFFNT
Fuente: Elaboración propia.

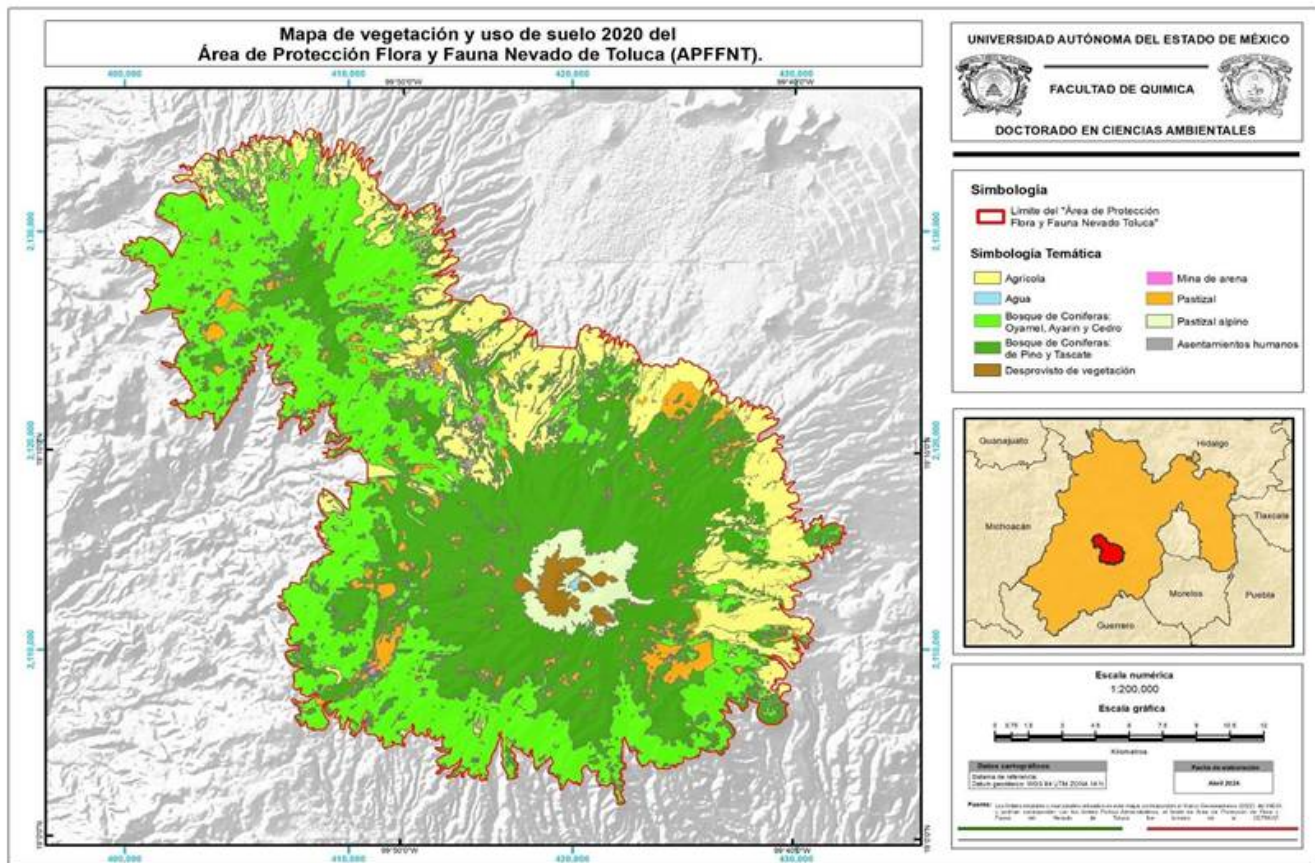


Figura 3.

Ejemplo de uno de los mapas finales de los 11 tiempos generados.

Fuente: Elaboración propia.

Con todos los mapas anteriores se obtuvo la tabla de las coberturas de uso de suelo del periodo estudiado, ver tabla 2 y 3.

Tabla 2.

Cantidad de cobertura de uso de suelo del periodo 1970-1995 del Área de Protección Flora y Fauna Nevado de Toluca.

Cobertura	APFFNT (ha)					
	1970	1975	1980	1985	1990	1995
Agrícola	9,094.50	9,082.14	9,072.22	9,112.02	9,279.10	9,329.62
Agua	25.84	25.84	25.84	25.84	25.72	25.72
Bosque de Coníferas: Pino y Táscate	16,946.22	17,476.74	17,707.97	18,030.89	18,387.57	18,569.81
Bosque de Coníferas: Oyamel, Ayarín y Cedro	18,009.33	18,170.89	18,425.65	18,477.29	19,483.08	19,505.36
Desprovisto de vegetación	589.07	590.59	589.07	590.59	589.07	589.07
Pastizal	7,463.64	6,798.29	6,343.05	5,930.74	4,477.63	4,222.60
Pastizal alpino	1,451.98	1,436.10	1,416.79	1,413.23	1,309.43	1,309.43
Asentamientos humanos	9.28	9.28	9.28	9.28	38.28	38.28
Mina de arena	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla 3.

Cantidad de cobertura de uso de suelo del periodo 2000-2020 del Área de Protección Flora y Fauna Nevado de Toluca.

Cobertura	APFFNT (ha)				
	2000	2005	2010	2015	2020
Agrícola	9,277.78	9,262.58	8,931.87	8,945.35	8,840.39
Agua	25.96	25.96	26.24	26.64	25.28
Bosque de Coníferas: Pino y Táscate	18,828.92	18,788.88	19,307.24	18,940.60	20,522.46
Bosque de Coníferas: Oyamel, Ayarín y Cedro	19,582.19	19,613.23	19,559.79	19,594.91	19,388.40
Desprovisto de vegetación	589.07	589.07	589.07	589.07	587.91
Pastizal	3,894.48	3,907.44	3,709.92	4,020.76	2,762.01
Pastizal alpino	1,301.23	1,301.23	1,294.43	1,299.87	1,280.43
Asentamientos humanos	72.84	84.08	149.36	147.60	158.20
Mina de arena	17.40	17.40	21.96	25.08	24.80

Fuente: Elaboración propia, 2024

Después de obtener las coberturas del área de estudio, se elaboraron las matrices de transición para analizar las tendencias de intercambio. Cada periodo presenta una dinámica específica, lo que es relevante para el estudio (FAO PNUMA, 2020). Estos comportamientos han sido documentados en investigaciones de

Mangaza (2022) en la República del Congo y Coskuner (2022) en la Región Mediterránea. También se observó la tasa de cambio de cada cobertura: algunos usos son similares, pero otros, como los pastizales, muestran una tendencia a la baja, mientras que las áreas de bosques de coníferas aumentan, como indica Hernández (2021).

Tabla 4.

Tasa de cambio de las coberturas del Área de Protección Flora y Fauna Nevado de Toluca.

Categorías	Total 1970	Total 2020	Tasa cambio del periodo
Agrícola	9,094.50	8,841.43	0.06 %
Agua	25.84	25.28	0.04 %
Bosque de coníferas: pino y táscate	16,946.2 2	20,523.3 4	-0.42 %
Bosque de coníferas: oyamel, ayarín y cedro	18,007.8 1	19,388.4 0	-0.15 %
Desprovisto de vegetación	590.59	587.91	0.01 %
Pastizal	7,463.64	2,768.97	1.26 %
Pastizal alpino	1,451.98	1,280.43	0.24 %
			-32.09
Asentamientos humanos	9.28	158.20	%
			-31.84
Mina de arena	0.00	15.92	%

Fuente: Elaboración propia, 2024

En la tabla 4 se evidencia un crecimiento en los bosques de coníferas, con una tasa de cambio del 0.57%, equivalente a 4,957.71 ha, lo que sugiere que las medidas de protección han sido efectivas. Sin embargo, el pastizal ha perdido un 1.26% de su cobertura inicial. Este fenómeno también fue señalado por Pineda López (2017) en su estudio sobre el uso del suelo en Hidalgo, donde comenta que es la zona de intercambio de otras coberturas. Además, los usos de suelo urbano y de extracción de arena han crecido más del 30%, alcanzando aproximadamente 160 ha, lo que es preocupante en una zona de conservación. Para analizar los cambios en las coberturas, se utilizaron los índices de cambio de Pontius et al. (2004) y se generó una matriz de transición para cada uno de los tiempos, como lo recomiendan Pineda Jaimes et al. (2009), Sandoval-García et al. (2021) y Hernández et al. (2023). Estos resultados se presentan gráficamente en la tabla 5 y 6.

Tabla 5.

Ejemplo de una de las Matrices de pérdidas y ganancias de cobertura del periodo 1970 – 2020 del Área de Protección Flora y Fauna Nevado de Toluca

	Total 1970	%	Total 2020	%	Pérdidas	%	Ganancias	%
Agrícola	9,094.50	16.97	8,841.43	16.50	1,534.74	16.96	1,281.67	14.16
Agua	25.84	0.05	25.28	0.05	1.56	0.02	1.00	0.01
Bosque de coníferas: pino y táscate	16,946.22	31.62	20,523.34	38.30	1,179.47	13.03	4,756.59	52.55
Bosque de coníferas: oyamel, ayarín y cedro	18,007.81	33.60	19,388.40	36.18	548.19	6.06	1,928.78	21.31
Desprovisto de vegetación	590.59	1.10	587.91	1.10	4.04	0.04	1.36	0.02
Pastizal	7,463.64	13.93	2,768.97	5.17	5,607.18	61.95	912.51	10.08
Pastizal alpino	1,451.98	2.71	1,280.43	2.39	175.68	1.94	4.12	0.05
Asentamientos humanos	9.28	0.02	158.20	0.30	0.84	0.01	149.76	1.65
Mina de arena	0.00	0.00	15.92	0.03	0.00	0.00	15.92	0.18
Total, ha.	53,589.88	100.00	53,589.88	100.00	9,051.71	100.00	9,051.71	100.00

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla 6.

Ejemplo de una de las Matrices de intercambio, cambio total y cambio neto de coberturas del periodo 1970 – 2020 del Área de Protección Flora y Fauna Nevado de Toluca

	Total 1970	%	Total 2020	%	Intercambio	%	Cambio Total	%	Cambio Neto	%
Agrícola	9,094.50	16.97	8,841.43	16.50	2,563.33	4.78	1,408.21	2.63	126.54	0.24
Agua	25.84	0.05	25.28	0.05	2.00	0.00	1.28	0.00	0.28	0.00
Bosque de coníferas: pino y táscate	16,946.22	31.62	20,523.34	38.30	2,358.94	4.40	2,968.03	5.54	1,788.56	3.33
Bosque de coníferas: oyamel, ayarín y cedro	18,007.81	33.60	19,388.40	36.18	1,096.39	2.05	1,238.49	2.31	690.29	1.27
Desprovisto de vegetación	590.59	1.10	587.91	1.10	2.72	0.01	2.70	0.01	1.34	0.00
Pastizal	7,463.64	13.93	2,768.97	5.17	1,825.02	3.41	3,259.85	6.08	2,347.34	4.33
Pastizal alpino	1,451.98	2.71	1,280.43	2.39	8.24	0.02	89.90	0.17	85.78	0.16
Asentamientos humanos	9.28	0.02	158.20	0.30	1.68	0.00	75.30	0.14	74.46	0.14
Mina de arena	0.00	0.00	15.92	0.03	0.00	0.00	7.96	0.01	7.96	0.01
Total, ha.	53,589.88	100.00	53,589.88	100.00	7,858.32	14.66	9,051.71	16.89	5,122.55	9.56

Fuente: Elaboración propia, 2024

En la matriz de transición (ver tablas 5 y 6) se analizan los cambios en las coberturas de suelo desde 1970 hasta el 2020. Se destaca que el bosque de coníferas, compuesto por especies como pino, táscate, oyamel, ayarín y cedro, representa el 74.48% de la extensión total. Por otro lado, las actividades antrópicas, que incluyen la agricultura, la extracción de minerales y los asentamientos humanos, representan el 16.83%. Esta información se puede observar con mayor claridad en la tabla 6. Las variaciones en las pérdidas y ganancias de coberturas reflejan tendencias significativas. Aunque se pueden identificar estos movimientos a través del cambio total y el cambio neto, se observa que los bosques de coníferas experimentan un mayor impacto, con un cambio del 7.84% del área total, tal como señala Cruz Huerta (2015) en su investigación sobre modelaje y uso del suelo.

El pastizal, por su parte, muestra una dinámica de cambio considerable, con un porcentaje del 6.08%. Junto con el bosque de coníferas, estos cambios suman un total del 16.89% en variaciones de área. Sin embargo, el cambio neto se reduce al 9.56%, lo que indica que, aunque algunas zonas han sido perdidas, otras han experimentado una expansión, reflejando la compleja dinámica del entorno. Entre 1970 y 2020, la principal tendencia observada fue el crecimiento significativo de los bosques de coníferas, que aumentaron en un 6.67%, lo que equivale aproximadamente a 3,577 ha. Este incremento se atribuye en parte a la pérdida de áreas de pastizal, como señala Pineda Jaimes et al. (2009), que indica que el aumento en la cobertura forestal se debe a la conversión de pastizales. Este crecimiento ha sido impulsado por varios programas de reforestación implementados a lo largo del periodo estudiado, lo que demuestra un esfuerzo consciente por restaurar y conservar las áreas forestales.

Los cambios en la cobertura del suelo son más evidentes al compararlos a lo largo del tiempo mediante análisis gráficos, lo que permite identificar fenómenos que afectan su crecimiento o disminución. Estas visualizaciones revelan patrones y tendencias influenciadas por factores naturales y humanos, facilitando la comprensión de la evolución del paisaje y las causas subyacentes de los cambios. Aunque la agricultura ha experimentado transformaciones, sus pérdidas y ganancias son similares, lo que resulta en un cambio total pequeño, según Camacho (2015). Al comparar los tiempos se observa que el comportamiento no es igual en cada uno de los lapsos por lo que saber la tendencia de cada uno de estos años indica un comportamiento diferente. En los gráficos siguientes se observa mejor la dinámica de cada una de estas coberturas.

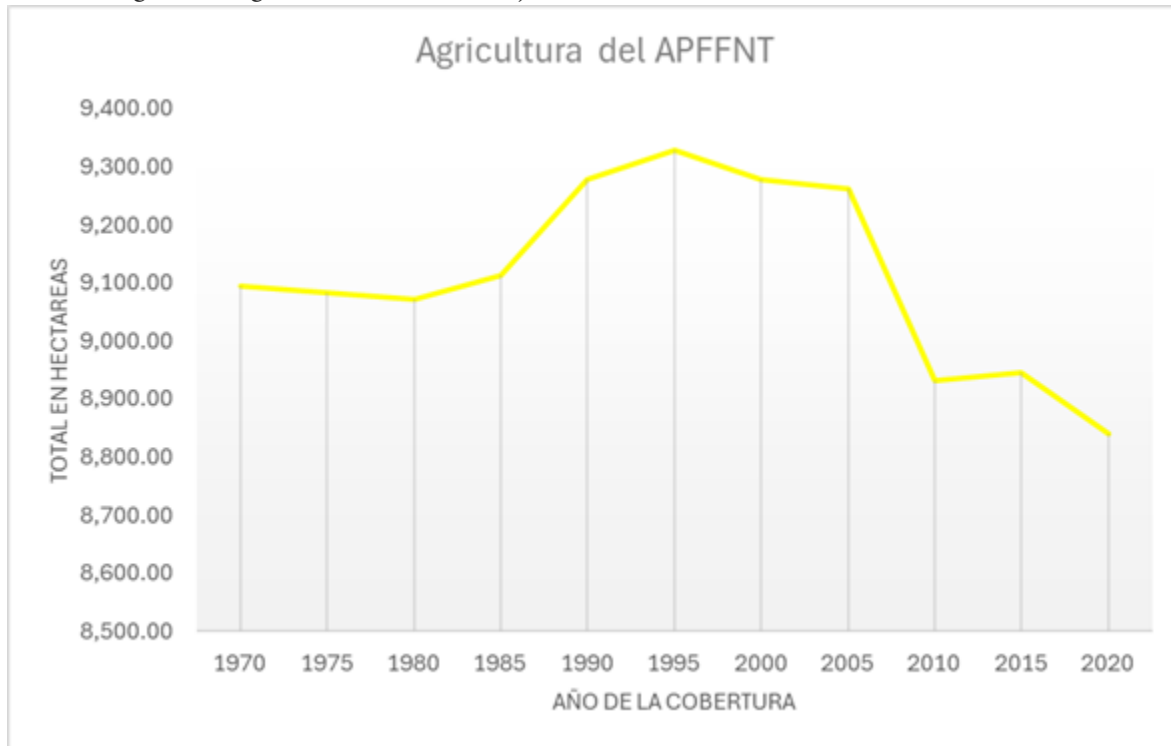


Figura 4.

Gráfica de comportamiento de la agricultura en el Área de Protección flora y fauna Nevado de Toluca en el periodo de 1970 - 2020

Fuente: Elaboración propia, 2024

En la figura 4 se puede apreciar el comportamiento de las coberturas de suelo desde 1970 hasta 1985, período durante el cual se presenta una tendencia estable en la extensión de las diferentes coberturas. Sin embargo, a partir de 1985 y hasta 1995, se observa un crecimiento aproximado de 200 hectáreas, que se mantiene hasta 2005. Este crecimiento puede atribuirse a diversas iniciativas de conservación y a un aumento en las actividades de reforestación en la región. A partir de 2005, la tendencia cambia notablemente, mostrando una disminución en las áreas dedicadas a la agricultura. Esta reducción puede ser el resultado de políticas enfocadas en la conservación del medio ambiente y la promoción de prácticas sostenibles, así como de la reforestación en áreas previamente destinadas a la agricultura. Además, la escasa afluencia de actividades antrópicas en el área, probablemente debido a restricciones o a un cambio en las prioridades económicas locales, también ha contribuido a este fenómeno. Este análisis temporal revela la compleja interacción entre las prácticas humanas y las iniciativas de conservación, así como su impacto en la dinámica de las coberturas de suelo.

En lo que respecta a la cobertura de bosques de coníferas, específicamente de pino y táscate, se ha documentado un comportamiento de crecimiento constante a lo largo del tiempo, con un aumento

aproximado de 1,000 hectáreas entre 1970 y 2020. Este crecimiento sostenido puede atribuirse en gran medida a la ubicación de estas áreas dentro del polígono de protección del Flora y Fauna Nevado de Toluca. La designación de esta región como área protegida ha promovido la implementación de diversas medidas de conservación, que incluyen la restricción de actividades destructivas y la promoción de iniciativas de reforestación, como se observa en la figura 5.

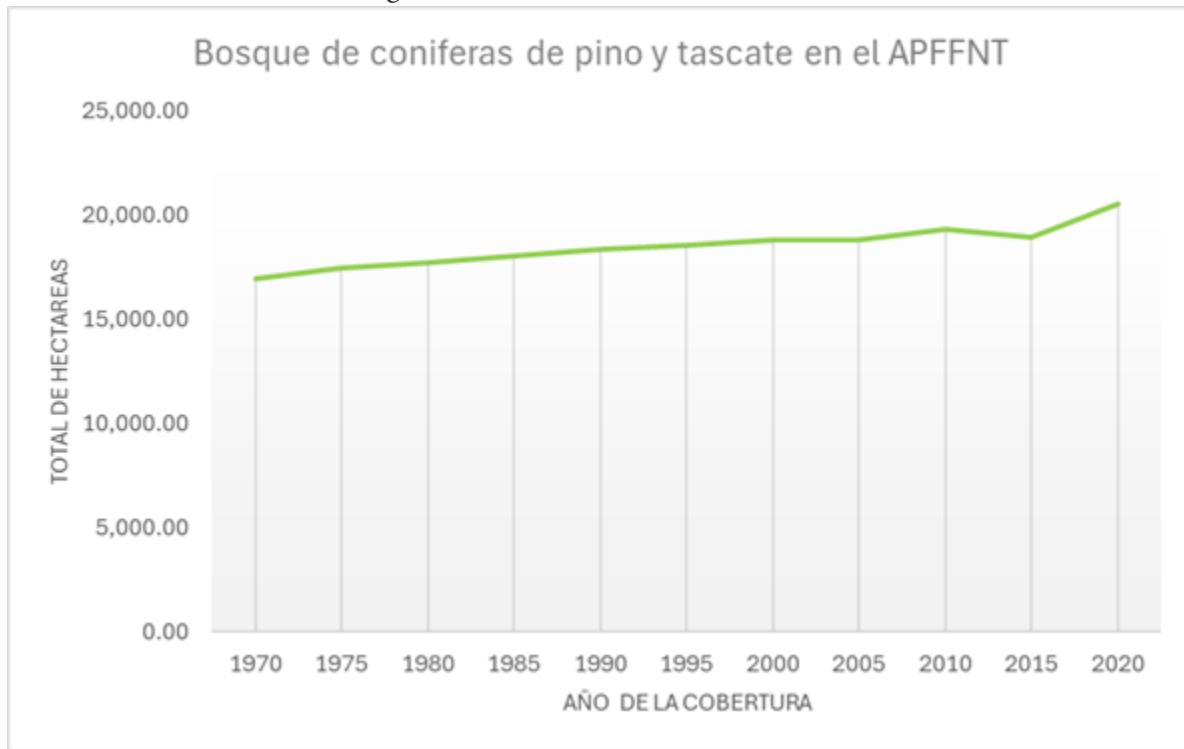


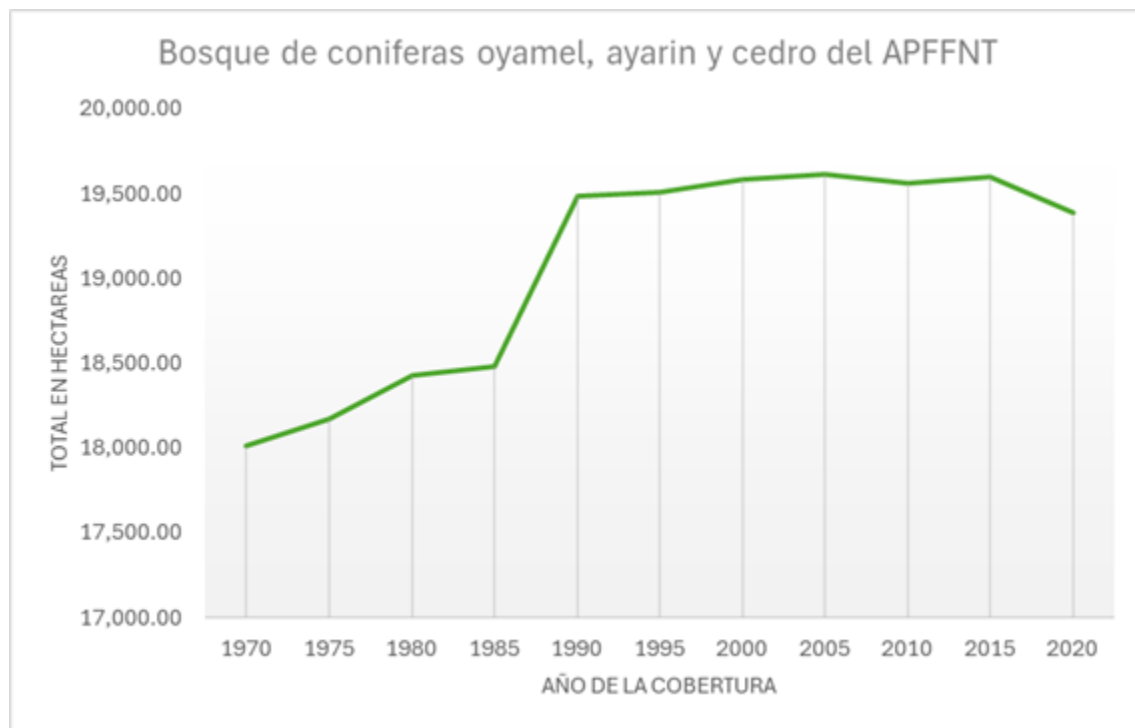
Figura 5.

Gráfica de comportamiento del Bosque de coníferas de pino y tascate en el Área de Protección flora y fauna Nevado de Toluca en el periodo de 1970 - 2020

Fuente: Elaboración propia, 2024

La cobertura de bosques de coníferas de oyamel ayarín y cedro, ha mostrado una dinámica de crecimiento significativa a lo largo de las décadas. Este crecimiento alcanzó su punto álgido entre 1970 y 1990, durante el cual la superficie forestal aumentó en aproximadamente 1,500 hectáreas. Este auge se puede atribuir a una serie de factores, como la implementación de políticas de reforestación y conservación que promovieron la protección de estas especies y su hábitat.

Desde 1990 hasta 2015, la cobertura de estos bosques se mantuvo relativamente estable, indicando un equilibrio en el ecosistema. Este período de estabilidad fue crucial, ya que permitió que la biodiversidad floreciera y se conservaran los servicios ecosistémicos esenciales que los bosques ofrecen, como la regulación del ciclo del agua y el almacenamiento de carbono. Sin embargo, a partir de 2015, se comenzó a observar un decremento en la cobertura, tal como se ilustra en la figura 6. Este descenso puede estar relacionado con diversos factores, incluidos el aumento de actividades humanas, como la agricultura y la urbanización, que han llevado a la fragmentación del hábitat y a la reducción del área forestal. También es posible que cambios climáticos, como sequías o enfermedades, estén afectando negativamente la salud de estas especies arbóreas.

**Figura 6.**

Gráfica de comportamiento del Bosque de coníferas de oyamel, ayarín y cedro en el Área de Protección flora y fauna Nevado de Toluca en el periodo de 1970 - 2020

Fuente: Elaboración propia, 2024

En lo que respecta al pastizal, esta cobertura ha mostrado una tendencia a la disminución, un fenómeno que se puede atribuir en gran medida al crecimiento de la cobertura forestal de bosques de coníferas. Este aumento en la extensión de los bosques se ha visto favorecido tanto por programas de reforestación como por el crecimiento natural que ocurre en los gaps o huecos que se presentan dentro del mismo bosque, esto se puede observar mejor en la figura 7.

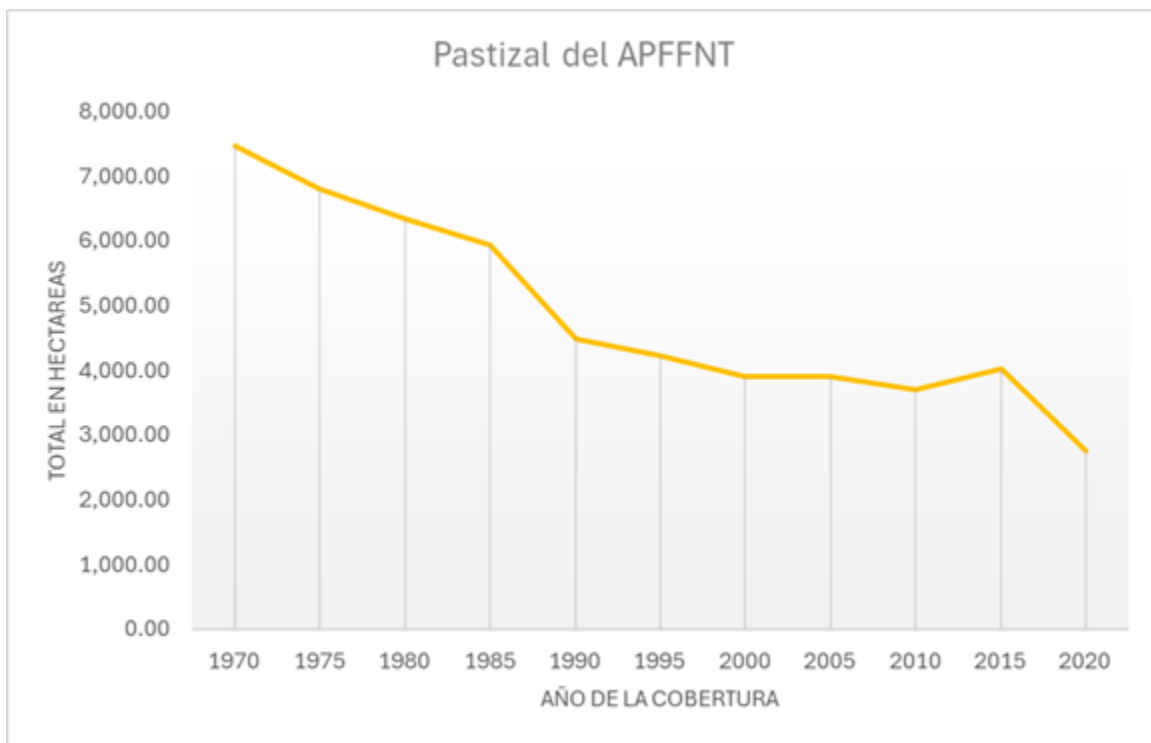


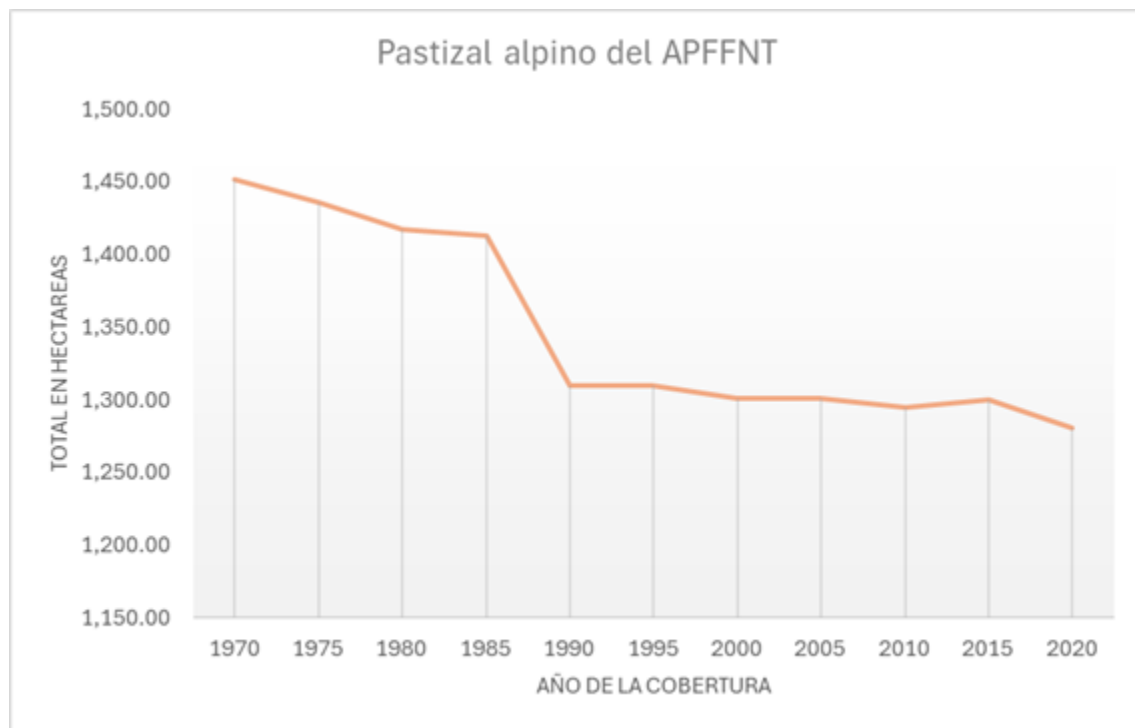
Figura 7.

Gráfica de comportamiento del pastizal en el Área de Protección flora y fauna Nevado de Toluca en el periodo de 1970 - 2020

Fuente: Elaboración propia, 2024

El pastizal alpino se distingue como una de las coberturas que ha experimentado un impacto relativamente menor en comparación con otras coberturas debido a la altitud a la que se desarrolla. Esta ubicación elevada proporciona ciertas condiciones que limitan la expansión de actividades humanas y la presión antrópica, lo que ha permitido que el pastizal mantenga su integridad en gran medida, ver figura 8. Sin embargo, los cambios que ha experimentado esta cobertura se han concentrado principalmente en las zonas de interfaz con el bosque de coníferas, donde el crecimiento natural de estas especies ha generado interacciones significativas. También la agricultura ha tomado parte de esta cobertura para su crecimiento con aproximadamente 700 ha; Camacho Sanabria (2015) reporta un comportamiento similar en una zona aledaña al Nevado de Toluca.

Este fenómeno se intensifica en el contexto del cambio climático, que ha alterado las condiciones ambientales en las zonas de alta montaña. Con el aumento de las temperaturas y la variabilidad en los patrones de precipitación, el ecosistema del pastizal alpino ha comenzado a experimentar cambios en su composición y estructura.

**Figura 8.**

Gráfica de comportamiento del pastizal alpino en el Área de Protección flora y fauna Nevado de Toluca en el periodo de 1970 - 2020

Fuente: Elaboración propia, 2024

En lo que respecta a la cobertura de asentamientos humanos, se observa que entre 1970 y 1985 no se registraron crecimientos significativos. Sin embargo, a partir de ese punto, y especialmente hasta 2010, se produjo un aumento relativamente alto en la extensión de estas áreas urbanas, un fenómeno que se ilustra claramente en la figura 9. Este crecimiento puede atribuirse a diversos factores, incluidos el desarrollo urbano, el aumento de la población y la expansión de actividades económicas que requieren espacio, lo que ha llevado a una mayor conversión de tierras para asentamientos.

Desde 2010 hasta la fecha, el crecimiento de los asentamientos humanos ha continuado, pero de manera más moderada. A pesar de esta desaceleración, la dinámica sigue mostrando un patrón de expansión que no parece tener retroceso, lo que indica una tendencia persistente en la ocupación del suelo. Esta situación plantea preocupaciones sobre el impacto que la urbanización descontrolada puede tener en el medio ambiente local, incluyendo la fragmentación de ecosistemas, la pérdida de biodiversidad y la alteración de los ciclos hídricos.

Ante esta realidad, es crucial evaluar e implementar políticas de conservación que aborden específicamente el fenómeno del crecimiento de asentamientos. Estas políticas podrían incluir la planificación urbana sostenible, la promoción de espacios verdes, y la regulación del uso del suelo para limitar la expansión desmedida. Además, es importante considerar estrategias de desarrollo que integren la conservación de la biodiversidad y el bienestar de las comunidades locales, fomentando un equilibrio entre el crecimiento urbano y la protección de los recursos naturales.

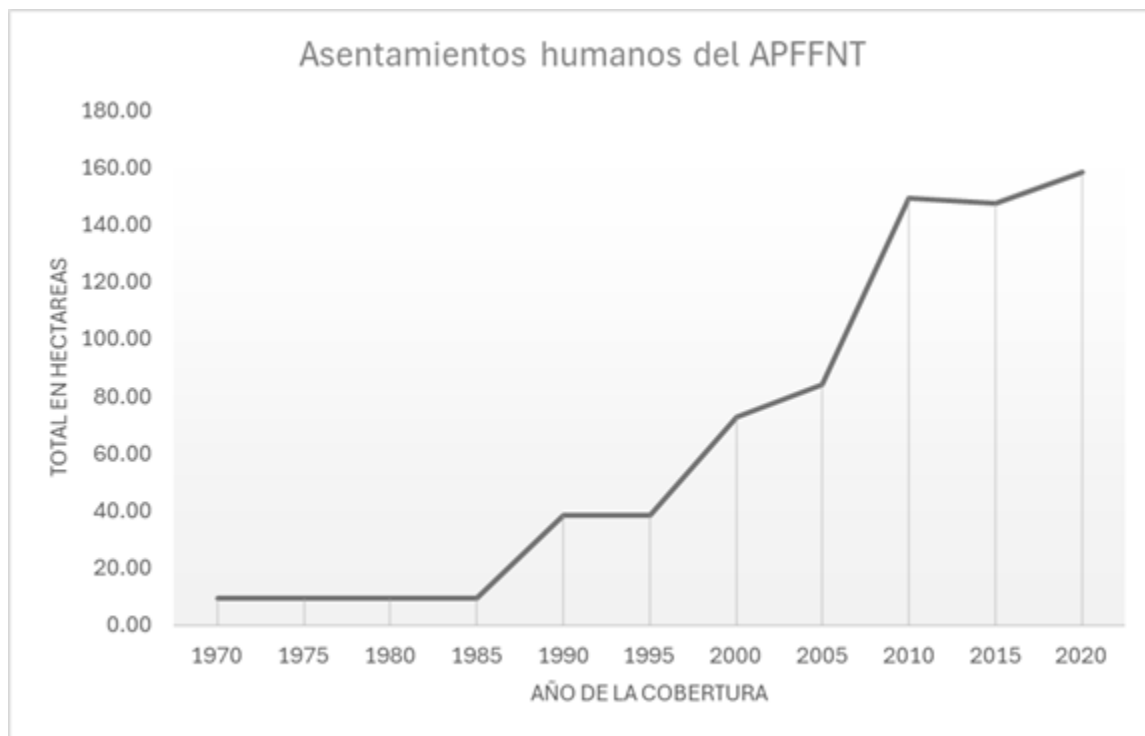


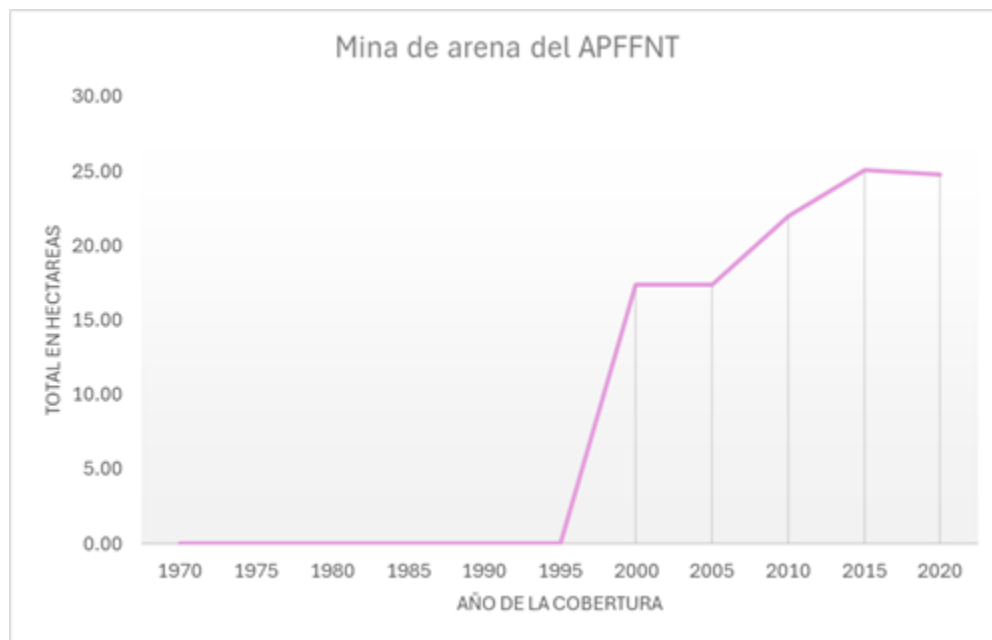
Figura 9.

Gráfica de comportamiento de los asentamientos humanos del Área de Protección flora y fauna Nevado de Toluca en el periodo de 1970 - 2020

Fuente: Elaboración propia, 2024

Una de las coberturas que mayor impacto tiene en el área de conservación es la de mina de arena, un fenómeno que comenzó a notarse aproximadamente en el año 2000. En ese momento, se detectó un área de extracción de arena que abarcaba aproximadamente 14 hectáreas, situada dentro del bosque, la cual no existía cuando fue declarada área natural protegida. Este desarrollo puede ser atribuible a la situación económica precaria de los poblados cercanos a la mina, donde la explotación de recursos naturales se convierte en una de las pocas opciones para generar ingresos.

A pesar de que la actividad minera ha mostrado cierta disminución en su área de operación, las consecuencias sobre el entorno ecológico continúan siendo preocupantes. La extracción de arena no solo altera la estructura del suelo y la vegetación circundante, sino que también puede impactar al ecosistema, provocando erosión y afectando la biodiversidad local. Este fenómeno es particularmente relevante en un área de conservación, donde la integridad ecológica es esencial para preservar los hábitats y las especies que dependen de ellos. Como se puede observar en la figura 10, el impacto de la mina de arena es evidente, y su presencia en un área protegida plantea desafíos significativos para la gestión y conservación del entorno. Es crucial considerar la implementación de políticas que regulen esta actividad, buscando un equilibrio entre las necesidades económicas de las comunidades locales y la conservación de los recursos naturales.

**Figura 10.**

Gráfica de comportamiento de cobertura de mina de arena del Área de Protección flora y fauna Nevado de Toluca en el periodo de 1970 - 2020

Fuente: Elaboración propia, 2024

Los estudios sobre los cambios en el uso del suelo son fundamentales, ya que ofrecen una base para analizar las tendencias y comportamientos de cada tipo de cobertura en una zona de estudio. Estos cambios están influenciados por diversos factores, que incluyen aspectos físicos, sociales y, en muchos casos, económicos (Brovelli et al., 2020). Comprender la magnitud y la tendencia de cada cobertura es esencial, por lo que se ha llevado a cabo una clasificación de las tendencias y del impacto en el área de estudio. Esto permitirá una evaluación más precisa de los efectos que estos cambios tienen sobre el ecosistema. Es importante destacar que las Áreas Naturales Protegidas (ANP) son herramientas clave para la planificación y regulación de las actividades de manejo y administración del entorno. El uso de tecnologías avanzadas en este contexto puede facilitar la toma de decisiones informadas en el desarrollo de estrategias específicas de manejo. Estas estrategias deben ser adaptadas a las características particulares de cada zona, dado que cada área presenta condiciones y necesidades únicas que requieren un enfoque personalizado en su gestión.

Conclusiones

El Área de Protección presenta resultados positivos en términos de crecimiento de las coberturas forestales, que abarcan aproximadamente el 74% de su superficie total. Sin embargo, es preocupante la presencia de actividades antrópicas, como la agricultura y la urbanización, que ocupan casi el 17% de la zona. Estas intervenciones humanas podrían afectar la integridad del ecosistema y la biodiversidad, lo que resalta la necesidad de implementar estrategias de manejo que mitiguen su impacto y promuevan la conservación del área.

Los resultados del análisis del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca (APFFNT) revelan los cambios significativos ocurridos en los últimos 50 años, abarcando el periodo de 1970 a 2020. Aunque el análisis muestra que no ha habido cambios drásticos que impacten el área de manera extrema, sí se observan tendencias claras de transformación en el uso del suelo. Uno de los hallazgos más relevantes es la notable pérdida de pastizal, que representa aproximadamente un 8.76 %, lo que equivale a cerca de 4,957 hectáreas.

Este cambio ha resultado principalmente en la conversión de estas áreas a coberturas arbóreas de pino y táscate, que han aumentado considerablemente en un 6.67 %. Este cambio sugiere un proceso de regeneración natural, aunque también plantea interrogantes sobre las causas subyacentes de la pérdida de pastizales.

Además, las áreas urbanas y construidas han mostrado un crecimiento gradual, incrementándose en un 0.28 % del territorio, lo que corresponde a 148.92 hectáreas. Este aumento es indicativo de la presión urbana y el desarrollo que está afectando a la región, lo que podría tener implicaciones para la biodiversidad y la sostenibilidad de los ecosistemas locales. Un hallazgo impactante es la presencia de una mina dentro de esta área protegida, que abarca aproximadamente 15 hectáreas. Esta mina no existía al momento de la creación del parque nacional en 1936, lo que subraya las tensiones entre la conservación y las actividades extractivas. Este cambio resalta la necesidad de reevaluar las políticas de manejo y protección del área, considerando las presiones externas que amenazan la integridad del ecosistema. En conjunto, estos resultados subrayan la importancia de un monitoreo continuo y un manejo adaptativo para garantizar la conservación de la biodiversidad en el APFFNT.

Agradecimientos

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

Referencias bibliográficas

- 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. (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, ISSN 2007-3828, <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.10.049>
- CEPANAF. (2022). *Áreas Naturales Protegidas*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. http://cepanaf.edomex.gob.mx/areas_naturales_protegidas
- 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>
- CONANP. (2023). *Áreas Naturales Protegidas*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. <https://www.gob.mx/conanp/acciones-y-programas/areas-naturales-protegidas-decretadas>
- 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, ISSN 0304-8799, <https://doi.org/10.4067/S0717-92002022000200157>
- Cruz Huerta, C. (2015). Modeling land-use change and future deforestation in two spatial scales. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 21(2), 137-156, ISSN 2007-3828, <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>
- FAO PNUMA. (2020, mayo 22). El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) o para el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)*. <https://doi.org/10.4060/ca8642es>
- Foody, G. M., Cutler, M. E., McMorro, J., Pelz, D., Tangki, H., Boyd, D. S., & Douglas, I. (2001). Mapping the biomass of Bornean tropical rain forest from remotely sensed data. *Global Ecology and Biogeography*, 10(4), 379–387. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2001.00248.x>
- 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*, 1–14. <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3743>
- Hernández Pérez, E. (2022). Land-use change and landscape fragmentation in central Veracruz, Mexico (1989–2015). *Madera y Bosques*, 28(1), ISSN 1405-0471, <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812294>
- Hernández, M.J.P. (2021). Dynamics of changes in land use and vegetation due to anthropogenic activities in Zaachila, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(66), ISSN 2007-1132, <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.894>
- INEGI. (2023a). *Diccionario de datos de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463908364>
- INEGI. (2023b). *Ortoimágenes*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <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>
- Massé, M.V.M. and Salas, R.A. (2020) El estado en la relación turismo, ambiente y sustentabilidad en México, <http://revistacopala.net/index.php/ojs/issue/view/9>. Available at: <https://app.box.com/s/jggbs3q26mf4kir02smthearewfl88iy> (Accessed: 2024). DOI: 10.35600.25008870.2020.9.00156.
- 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, ISSN 0006-579X, <https://doi.org/10.19182/bft2022.353.a36836>
- Miranda, F., & Hernández X, E. (1963). *Los tipos de Vegetación de México y su clasificación*. Bol. Soc. Bot. Méx. <https://doi.org/https://doi.org/10.17129/botsci.1084>
- Olvera García, J., & Pichardo Pagaza, I. (2017). *Área Protección Flora Fauna Nevado Toluca. Retos y oportunidades* (1a ed.). Universidad Autónoma del estado de México.
- ONU. (2022). *Objetivos de desarrollo sostenible*. Organización de la Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/biodiversity/>
- 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, ISSN 1405-0471, <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). <https://doi.org/10.3390/rs9070712>
- Sandoval-García, R., Jiménez-Pérez, J., Yereña-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>



Disponible en:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=668180142008>

Cómo citar el artículo

Número completo

Más información del artículo

Página de la revista en redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de revistas científicas de Acceso Abierto diamante
Infraestructura abierta no comercial propiedad de la
academia

Parix Lunex Luna Palacios, Salvador Adame Martínez,
Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo

**ransformación multitemporal de la vegetación y usos del
suelo en el Nevado de Toluca (1970-2020)**

**Multi-temporal transformation of vegetation and land
uses in Nevado de Toluca (1970-2020)**

Revista CoPaLa. Construyendo Paz Latinoamericana
vol. 10, núm. 21, p. 1 - 18, 2025

Red Construyendo Paz Latinoamericana, Colombia
investigacion@revistacopala.net

ISSN-E: 2500-8870

DOI: <https://doi.org/10.35600/25008870.2025.21.0366.1>



CC BY-NC-SA 4.0 LEGAL CODE

**Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-
CompartirIgual 4.0 Internacional.**