

Cambio de uso del suelo y vegetación en el Parque Nacional Nevado de Toluca, México, en el periodo 1972-2000

Sergio Franco Maass*
Héctor Hugo Regil García**
Carlos González Esquivel*
Gabino Nava Bernal*

Recibido: 8 de diciembre de 2005
Aceptado en versión final: 10 de agosto de 2006

Resumen. Para conocer el estado de conservación del Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT), se analizaron los cambios en el uso del suelo y vegetación ocurridos entre 1972 y el 2000. Para ello fue preciso obtener cartografía digital mediante procesos de digitalización y fotointerpretación. Los mapas obtenidos se basaron en el sistema de clasificación del INEGI, serie 1. La aplicación de un sistema de información geográfica (SIG) permitió obtener la densidad de la cobertura forestal y analizar el cambio de uso de suelo y vegetación, identificando los procesos de disminución y/o incremento en la densidad de las zonas forestales. En el periodo estudiado, poco más de 9 700 ha de bosques de pino, latifoliadas u oyamel, sufrieron pérdidas de densidad, esto representó 20% de la superficie del área natural protegida. Las zonas boscosas que mostraron incrementos apenas alcanzaron 4 800 ha. El enfoque metodológico adoptado resultó especialmente válido para obtener información detallada y con un alto nivel de precisión. Dicha información constituye un punto de partida para estudios a profundidad del parque nacional.

Palabras clave: Uso de suelo y vegetación, Parque Nacional Nevado de Toluca, México.

Land use and vegetation changes in the Nevado de Toluca National Park, 1972-2000

Abstract. In order to know the conservation status of the Nevado de Toluca National Park, land use and vegetation changes were analyzed for the period 1972-2000. First, it was necessary to obtain digital cartography by means of digitalization and photo interpretation processes. The obtained maps were based in the INEGI classification system, series 1. The application of a Geographical Information System (GIS), allowed the calculation of the forest cover density and the analysis of land use and vegetation changes, identifying the processes of decrease and/or increase in forest area density. Within the studied period, over 9 700 ha of pine, deciduous or fir forest suffered density losses, this represented 20% of the protected natural area. Forest areas showing increases

*Centro de Investigación en Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de México (CICA-UAEMex), Instituto Literario No. 100, Colonia Centro, 50000, Toluca, México. E-mail: serfm@uaemex.mx
cge1@uaemex.mx; gnb@uaemex.mx

**Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Universidad Autónoma del Estado de México. E-mail: regil_hh@yahoo.com.mx

were just 4 800 ha. The methodological approach utilized resulted especially valid to obtain detailed and highly precise information, which constitutes a starting point for deeper studies of the National Park.

Key words: Land use and vegetation, Nevado de Toluca National Park, Mexico.

INTRODUCCIÓN

El Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT) es una de las zonas protegidas más importantes de México que, dada su cercanía con la zona metropolitana de la ciudad de Toluca, se encuentra sujeta a intensos procesos de deterioro y cambio de uso del suelo. Pese al creciente interés de la comunidad científica por estudiar esta región, no existen estudios suficientemente detallados y confiables que permitan conocer estas dinámicas.

En este contexto, se emprendió la generación de una base de datos con productos compatibles entre sí, que incluyera cartografía del uso del suelo y vegetación para diferentes fechas. Para ello fue preciso generar información detallada y confiable que pudiera ser utilizada para analizar los procesos de cambio. De esta manera, la generación de mapas de uso de suelo, bajo un mismo sistema de clasificación, estuvo orientada a su análisis comparativo.

ANTECEDENTES

Información cartográfica de base

Como primera etapa de la investigación, dado que se trataba de identificar y seleccionar alguna fuente de información cartográfica para fechas anteriores al 2000, se analizaron algunas de las principales fuentes disponibles. Dentro de dichos productos cartográficos con información del Parque Nacional Nevado de Toluca destacan (Cuadro 1).

A nivel estatal existen algunas otras fuentes de información cartográfica que, por su dudosa calidad, no fueron consideradas. Se trata, en general, de recortes de la cartografía del INEGI pero adaptadas a los requerimien-

tos específicos de los proyectos o instituciones que las elaboran.

Como es posible observar en el Cuadro 1, la UNAM ha realizado importantes contribuciones a la caracterización del uso del suelo y la vegetación, logrando un alto grado de confiabilidad. Esta información, sin embargo, no presentaba la escala requerida para cumplir con los requerimientos de la investigación. En este contexto, la fuente cartográfica más adecuada y confiable, con suficiente nivel de detalle y anterior al 2000, era la carta analógica de uso del suelo y vegetación del INEGI de 1972.

Adquisición de información de uso del suelo y vegetación

Tradicionalmente, la información sobre el uso del suelo y vegetación se obtiene mediante procedimientos de fotointerpretación de fotografías aéreas. En los últimos años, sin embargo, se ha vivido una importante revolución en este campo. El desarrollo de potentes sensores que permiten la adquisición de imágenes de satélite de gran resolución espacial y espectral, y la aparición de poderosos programas para el procesamiento digital de imágenes, han permitido la implementación de diversas metodologías de clasificación de imágenes: las modernas técnicas de clasificación, permiten obtener mapas de uso del suelo y vegetación de buena calidad, sobre todo cuando se manejan categorías generales de clasificación. Las imágenes Landsat ETM y Quickbird son muy adecuadas y confiables para generar cartografía de uso de suelo en una escala 1:125 000 o menor con una leyenda que no exceda 50 categorías (Ciampagna, 2003).

Sin embargo, pese a la innegable utilidad de las técnicas de análisis digital de imáge-

Cuadro 1. Principales fuentes de información cartográfica de uso del suelo y vegetación del PNNT

Producto cartográfico	Escala	Fuente	Características	Observaciones
Carta de Uso de Suelo y Vegetación del INEGI (Serie I)	1 : 250 000	Interpretación de fotografías aéreas tomadas entre 1968 y 1986.	Sistema de clasificación con más de 300 clases de cobertura, basadas en criterios de fisonomía, florística, fenología y estado de conservación.	Producto complejo, difícil de compatibilizar con cartografía de uso del suelo más reciente, de aplicabilidad regional (Bocco <i>et al.</i> , 2001).
La Carta de Uso de Suelo y Vegetación del INEGI (Serie II)	1 : 250 000	interpretación visual de espacio-mapas derivados de imágenes Landsat TM (composición de color).	Sistema de clasificación que incluye cerca de 600 clases.	Elaborada entre 1993 y 1996 como estrategia de actualización de la serie I, presenta errores en la identificación de algunos tipos de cobertura, principalmente en zonas boscosas.
Inventario Nacional Forestal de la UNAM, 1994	1 : 250 000	Análisis visual de imágenes Landsat TM.	Sistema de clasificación derivado del sistema de la FAO que comprende 29 tipos de vegetación (SARH, 1994).	Actualización parcial, de la serie I del INEGI que generó cartografía híbrida de información forestal.
Inventario Nacional Forestal de la UNAM, 2000	1 : 125 000	Interpretación visual de composiciones a color de imágenes Landsat ETM+.	Comprende 75 categorías organizadas en forma jerárquica en cuatro niveles (Formación, tipo, comunidad y subcomunidad; Palacio <i>et al.</i> , 2000).	Actualización de la información digital de la serie II de INEGI. Presenta una confiabilidad de 75% a nivel comunitario.
Atlas Estatal de Uso de suelo INIFAP-SAGARPA, 2003	1: 50 000	Interpretación de imágenes del satélite Landsat ETM de 2001 y 2002.	Consta de 27 categorías temáticas orientadas a la identificación de las diferentes coberturas agrícolas en el Estado de México (INIFAP-SAGARPA, 2003).	Cartografía que enfatiza la clasificación de tipos de cultivo y que demostró importantes inconsistencias en la clasificación de coberturas forestales.
Carta de Uso de Suelo y Vegetación INEGI, 1972	1 : 50 000	Fotointerpretación de fotografías aéreas 1:25 000 de 1972.	Incluyen 51 categorías principales, que se combinan en función de la predominancia en cobertura, para lograr un mapa muy detallado con más de 120 categorías (INEGI, 1972).	Dada su fecha de elaboración han perdido su actualidad pero resultan muy útiles para la comparación de los cambios ocurridos.

nes, se optó por un procedimiento más tradicional de fotointerpretación en función de diversas razones técnicas y económicas: se pretendía obtener, para el 2000, un mapa con el mismo esquema de clasificación de la carta del INEGI de 1972; se contaba con material fotográfico reciente en formato digital, escala 1:37 500; se contaba con un sistema de visualización interactiva en 3D que facilitaba la fotointerpretación. En definitiva, la elección de la metodología a utilizar se basó en la necesidad de lograr el máximo detalle, con el mayor número de categorías de la leyenda posible y a bajo costo.

La obtención de los mapas de uso de suelo y vegetación implicó dos procesos distintos: la conversión a formato digital del mapa de Uso de Suelo y Vegetación, escala 1:50 000, publicado por el INEGI en 1972; y la elaboración en ambiente digital del mapa de Uso de Suelo y Vegetación del 2000 mediante procedimientos de fotointerpretación de fotografías aéreas digitales, escala 1:37 500, y el uso de ortofotos digitales del Instituto de Información e Investigación Geográfica Estadística y Catastral del Estado de México (IIIGECM), escala 1:20 000.

OBJETIVO

Identificar la dinámica de cambio de uso del suelo en el PNNT, entre 1972 y 2000, bajo un enfoque basado en el cambio de densidad del arbolado, mediante la aplicación de técnicas de fotointerpretación y SIG.

METODOLOGÍA

Con la finalidad de lograr el objetivo, fue preciso cumplir con una serie de procedimientos metodológicos para la obtención y análisis de los mapas digitales de uso del suelo y vegetación mediante la aplicación de SIG (IDRISI Kilimanjaro y ArcView 3.2). La Figura 1 permite observar el esquema general de la investigación:

Para la elaboración del mapa de Uso de Suelo y Vegetación de 1972, se utilizaron las siguientes fuentes de información:

- Curvas de Nivel Digitales derivadas de las cartas topográficas del INEGI, escala 1:50 000 (con equidistancia de 20 metros), claves E14-A37, E14-A47 y E14-A48.
- Cartas en formato analógico de Uso de Suelo y Vegetación 1:50 000 INEGI, publicadas en 1972, claves E14-A37, E14-A47 y E14-A48.

Para la conversión a formato digital de las cartas impresas en papel, fue necesario realizar un proceso de digitalización interactiva, de acuerdo con los siguientes procedimientos:

- Rasterización de las tres cartas analógicas para la obtención de imágenes en formato TIF. Para ello se utilizó un escáner de gran formato y el programa Oi/GFS.
- Inserción de los mapas como imágenes raster en un ambiente de dibujo de un programa de dibujo asistido por computadora (CAD).
- Escalado de los mapas.
- Ajuste ortogonal de la imagen.
- Geoposicionamiento de imágenes.
- Inserción de curvas de nivel digitales del PNNT claves E14-A37, E14-A47 y E14-A48.

La digitalización de rodales de uso de suelo y vegetación se realizó directamente en pantalla; para ello se generó una capa de trabajo y se utilizaron los comandos del programa CAD para el dibujo de los límites entre rodales y la introducción de las claves de dichos rodales.

Dado que las imágenes raster presentaban ciertas deformaciones, y con la finalidad de lograr la mayor precisión posible, fue necesario sobreponer las curvas de nivel en formato

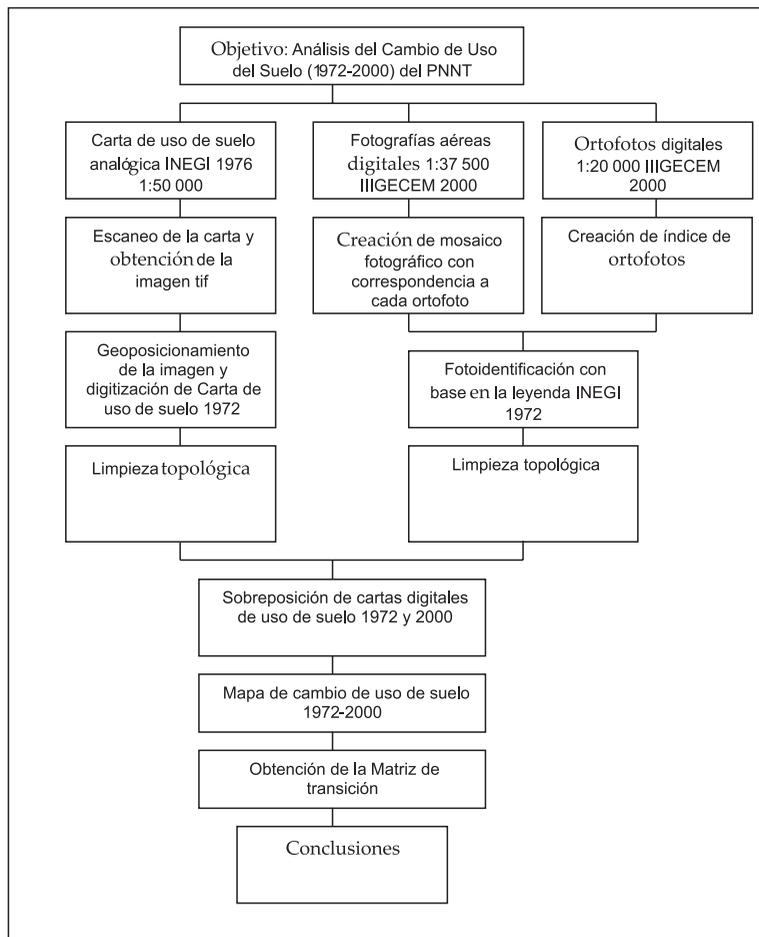


Figura 1. Esquema metodológico.

vectorial derivadas de las cartas topográficas digitales del INEGI. De esta manera fue posible corregir los pequeños desplazamientos de la imagen.

Terminada la digitalización y previo a la integración del mapa al SIG, fue preciso realizar una limpieza topológica para eliminar los errores de digitalización y convertir polilíneas a polígonos con una base de datos propia. Finalmente, se creó la topología del mapa.

La leyenda primaria con claves INEGI quedó de la siguiente manera (Cuadro 2).

Una vez concluida la limpieza topológica fue posible integrar el mapa dentro del am-

biente del SIG ArcView 3.2 (Figura 2). Para la elaboración del mapa de Uso de Suelo y Vegetación del año 2000, se utilizaron las siguientes fuentes de información (Cuadro 3).

Con estos insumos se realizó un proceso de fotointerpretación en dos etapas fundamentales: la de preparación y la de interpretación propiamente dicha.

La interpretación interactiva de imágenes ortofotográficas en el ambiente digital implicaba la generación de un ambiente de trabajo con todos los elementos necesarios en el proceso:

Cuadro 2. Leyenda primaria de las cartas de uso del suelo y vegetación del INEGI, 1972

CLAVE	USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN
FBC(A)	Forestal Bosque de Coníferas (Oyamel)
FBC(P)	Forestal Bosque de Coníferas (Pino)
FBC(Cu)	Forestal Bosque de Coníferas (Cedro)
FBL(AI)	Forestal Bosque de Latifoliadas (Aile)
FBL(Q)	Forestal Bosque de Latifoliadas (Encino)
AtpA	Agrícola Temporal Anual
Agua	Agua
Pi	Pastizal Inducido
Pa	Pastizal Alpino
S(Mi)	Vegetación secundaria (Matorral inerme)
Ehm	Erosión hídrica moderada
Ehf	Erosión hídrica fuerte
Eom	Erosión eólica moderada
Er	Eriales

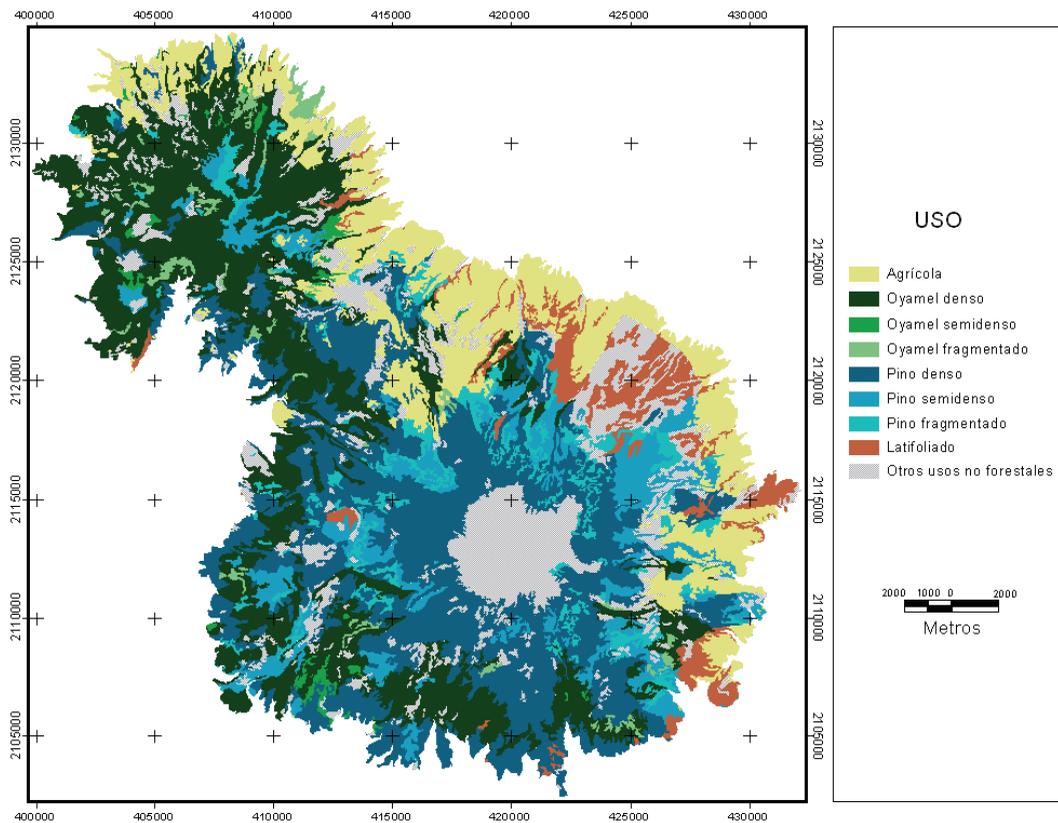


Figura 2. Mapa de uso de suelo y vegetación PNNT, 1972.

Cuadro 3. Fuentes de información para la elaboración del mapa de uso del suelo y vegetación del PNNT del 2000

Tipo	Fuente	Escala	Año	Descripción
Fotografías aéreas digitales	IIIGCEM	1 : 37 500	2000	bloque 4, líneas 12 y 13; bloque 5, líneas 1,2,3,4 y 5; bloque 7 líneas 2,3,4,5,5A, 6, 6A,7 y 8
Ortofotos digitales	IIIGCEM	1 : 10 000	2000	hojas: 198, 199, 200, 201, 223, 224, 225, 226, 227, 256, 257, 258, 259, 260, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 331, 332 y 333
Carta digital de uso del suelo y vegetación	INEGI	1 : 50 000	1972	Obtenida a partir de la digitalización de las cartas E14-a37, E14-a47 y E14-a48

- Creación del mosaico correspondiente al área del PNNT con las ortofotos digitales del IIIGCEM del 2000.
- Inserción como bloque de mapa digital de uso de suelo como apoyo en la fotointerpretación.
- Cargado de las fotografías aéreas correspondientes a cada parte del mosaico (un archivo por ortofoto).

Para la definición de las coberturas vegetales se utilizaron las mismas categorías de la leyenda que las publicadas en las cartas de Uso de Suelo y Vegetación del INEGI de 1972. Los criterios que permitieron reconocer los diversos tipos de cobertura fueron tamaño, forma, tono, textura y patrón (Verstappen, 1977). Una vez identificados los rodales de uso del suelo y vegetación en las fotografías aéreas, fue posible transferirlos a las ortofotos digitales. Una de las principales ventajas del procedimiento utilizado fue la posibilidad de realizar acercamientos (Zoom) y desplazamientos (Pan) en las zonas de difícil interpretación. Dados los importantes requerimientos para la gestión digital de imágenes tan grandes, el procedimiento se realizó de forma independiente para cada ortofoto del mosaico.

Terminada la fotointerpretación fue necesario, previo a su integración en el SIG, realizar una limpieza topológica para eliminar los errores de digitalización y convertir polilíneas

a polígonos con una base de datos propia. Este proceso se realizó en el ambiente del Autodesk Map 2004 y siguiendo la misma metodología descrita para la limpieza topológica del mapa de Uso del Suelo y Vegetación de 1972 (Supra). Posterior a la limpieza topológica, se procedió a elaborar el mapa propiamente dicho dándole sus características definitivas en el ambiente de ArcView 3.2 (Figura 3).

Un aspecto fundamental en todo proceso de fotointerpretación consiste en la verificación de los resultados obtenidos. Para ello se aplicó la siguiente metodología de verificación del mapa creado con la fotointerpretación:

1. Determinación del tamaño de la muestra:

Para determinar el tamaño de la muestra, se aplicó la ecuación descrita por Chuvieco (2002):

$$n = (z^2 s^2) / ((L^2 + (s^2 z^2 / N)))$$

Donde n es el tamaño de la muestra, L es el intervalo de error tolerable, z la abscisa de la curva normal para un valor determinado de probabilidad, s^2 la varianza muestral y N el tamaño de la población. Para muestras grandes ($n > 30$) puede prescindirse del último término $((N - n) / N)$ que se conoce como corrección para poblaciones finitas. Para calcular el tamaño de la muestra es necesario fijar un

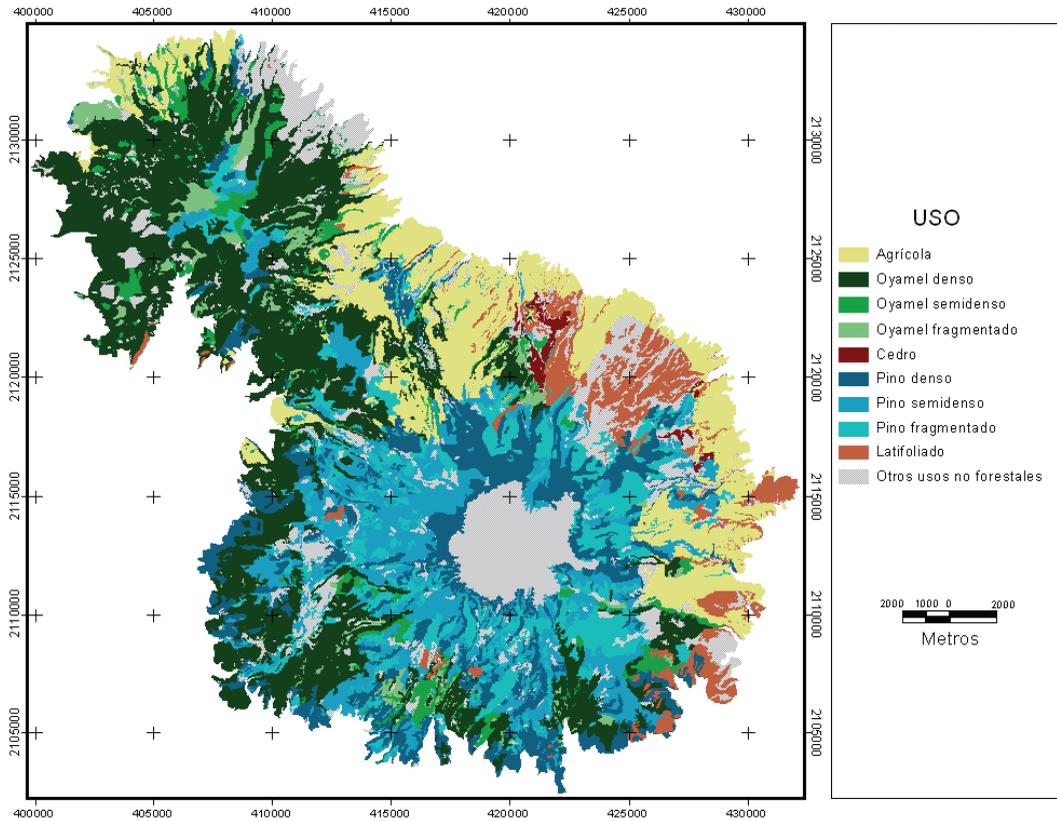


Figura 3. Mapa de uso de suelo y vegetación PNNT, 2000.

margen de error permitido (L), un rango de probabilidad (que fija el valor z) y estimar, de alguna manera, la varianza muestral (s^2).

Así, considerando que se quiere estimar, con el 95% de probabilidad, el error del mapa, suponiendo que los aciertos son del 85%, y el máximo de error permitido es de $\pm 5\%$, el número mínimo de muestras debía ser de 196.

2. Trabajo de campo:

Consistió en el registro de la cobertura en 279 puntos de verificación (Figura 4). Para cada punto fue preciso registrar tanto la categoría de uso del suelo como la posición en coordenadas UTM (NAD 27) con un navegador GPS (Sistema Global de Posicionamiento). Es importante destacar que, con la finalidad de re-

ducir al máximo el margen de error por la diferencia entre la realidad y la escala del mapa, fue preciso tomar los puntos de muestreo lo más alejado posible de los límites de rodal.

3. Matriz de confusión:

Para evaluar la precisión en la identificación de clases temáticas, se confrontaron los datos de campo con los rodales interpretados. De esta manera se elaboró una matriz de confusión que recoge los conflictos que se presentan entre categorías. Se trata de una matriz bidimensional, en donde las filas se ocupan por las clases de referencia, y las columnas por las categorías deducidas de la interpretación, lógicamente ambas tendrán el mismo

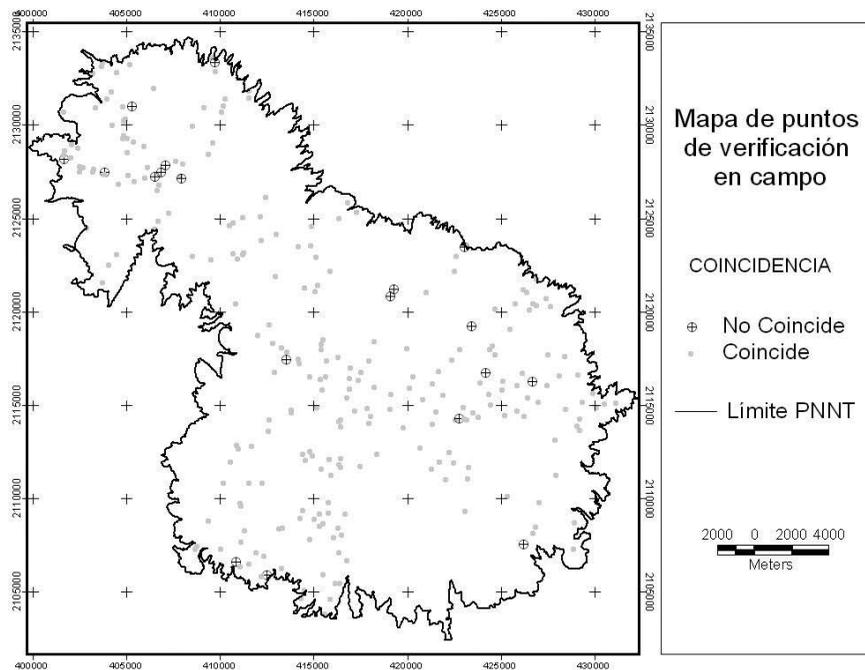


Figura 4. Mapa de puntos de verificación en campo.

número y significado; en resumen es una matriz cuadrada $n \times n$, donde n indica el número de categorías. La diagonal de dicha matriz expresa el número de puntos de verificación en donde se produce acuerdo entre las dos fuentes (fotointerpretación y realidad), mientras los marginales suponen errores de asignación. La relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total expresa la fiabilidad global del mapa. Los residuales en las filas indican tipos de cubierta real que no se incluyeron en el mapa, mientras los residuales en columnas implican cubiertas del mapa que no se ajustan a la realidad. De esta manera, representan errores de omisión y de comisión, respectivamente (USDA, 1995).

De esta manera, del total de 279 puntos de muestreo, 260 coinciden con la leyenda del mapa y 19 pertenecen a una categoría diferente. El mapa en cuestión presenta una confiabilidad del 93.19%, lo cual excede el nivel mínimo de validación cartográfica que es

del 80%. En este sentido, es posible afirmar que el mapa fue debidamente validado.

Análisis del cambio de uso de suelo 1972-2000

Como siguiente proceso, se tiene el análisis del cambio de uso de suelo para el periodo 1972-2000, llevado a cabo en parte, bajo el procedimiento propuesto por Bocco *et al.* (2001). Previo a la determinación y análisis del cambio en el uso de suelo y vegetación para las fechas mencionadas, fue necesario reclasificar los dos mapas generados con antelación, dado que presentaban un alto grado de complejidad. Para ello se siguió el siguiente procedimiento.

a) Análisis de la capacidad del sistema

La capacidad del SIG utilizado es determinante al momento de realizar la tabulación cru-

zada. En el programa ArcView 3.2 es posible realizar este procedimiento mediante el comando "union", el cual genera un mapa en formato vector, el cual combina los atributos de ambos mapas formando nuevos polígonos con su nueva asignación combinada.

A pesar de la flexibilidad que presenta este programa, el mapa resultante es demasiado complejo para ser interpretado, por lo que los mapas de origen debían ser reclasificados para obtener resultados más claros e interpretables, y en ArcView sólo es posible con la edición de las tablas de atributos, que es un proceso que, dada la cantidad de categorías para cada mapa, resulta poco práctico. Por ese motivo, se decidió cambiar los mapas al programa basado en el modelo de datos raster IDRISI Kilimanjaro, con el cual, después de transformar los mapas a formato raster, es posible realizar una reclasificación de manera más versátil por medio de intervalos de valores, con lo cual se reduce el tiempo en el proceso.

Otra ventaja que ofrece este programa es que el proceso de tabulación cruzada permite generar una matriz de transición (Ordoñez y Martínez, 2003), como insumo principal para analizar el cambio de uso de suelo (Dirzo y Maser, 1996).

Como limitante para este proceso, se encontró que el programa IDRISI Kilimanjaro sólo puede procesar 256 combinaciones, es decir, un par de mapas cuyas leyendas homogeneizadas sumen un número no mayor de 16 para cada año, con lo cual las categorías se limitaron sólo a 14, según el enfoque de la investigación.

b) Análisis comparativo de leyendas

Algo imprescindible para lograr el análisis del cambio de uso de suelo y vegetación, es que las leyendas de los mapas fuente sean compatibles. Esto fue posible ya que ambos mapas fueron obtenidos con el mismo sistema de clasificación, es decir, el de la carta del

INEGI de 1972. Pese a esto, el número de categorías de la leyenda en el mapa del 2000 es mayor. Esto se debe a que, a lo largo de casi 30 años, se han realizado programas de reforestación con cedro.

c) Definición de los criterios de reclasificación

Dada la dificultad de procesar e interpretar la tabulación cruzada de dos mapas con una gran cantidad de categorías temáticas, fue preciso reclasificarlos. Para ello se tomó en cuenta, como criterio principal de reclasificación, el objetivo central de la investigación: la determinación de la perturbación sufrida en la cobertura forestal en cuanto a su pérdida, ganancia y cambios de densidad del arbolado.

De esta manera se procedió a reclasificar ambos mapas teniendo en cuenta la densidad del arbolado en función de las características de cada especie forestal. Para ello se utilizó el esquema de reclasificación propuesto por Ramírez (2001), que parte de dividir a los boques como densos, semidensos (o semiabiertos) y fragmentados. Como información adicional se incluyeron las categorías de uso agrícola y otros usos no forestales. La reclasificación final quedó con 14 categorías (Cuadro 4).

Dado que el proceso de reclasificación y cruce tabular, necesario para crear el mapa de cambio de uso de suelo, únicamente se puede realizar con mapas en formato raster, fue necesario, previo a la reclasificación, convertir a retícula los mapas vectoriales de ArcView. Así, el procedimiento de rasterización se realizó en el Software IDRISI Kilimanjaro, quedando los mapas preparados para el procedimiento de reclasificación. Teniendo los mapas de Uso de Suelo y Vegetación rasterizados, se realizó la reclasificación de los mismos con los criterios ya señalados.

Cuadro 4. Tabla de reclasificación de mapas de uso del suelo y vegetación

Condición	Categoría modificada
Si la categoría Agricultura no tiene otra asociación.	Agrícola
Si la categoría Cedro no tiene otra asociación, o bien, si tiene sólo otra asociación forestal no predominante.	Cedro denso
Si la predominancia es de las categorías Matorral, Pastizal o Agrícola y la categoría Cedro está asociada en menor grado.	Cedro fragmentado
Si la predominancia es de la categoría Cedro y las categorías Matorral, Pastizal o Agrícola están asociadas en menor grado.	Cedro semidenso
Si la categoría Latifoliado no tiene otra asociación, o bien, si tiene sólo otra asociación forestal no predominante.	Latifoliado denso
Si la predominancia es de las categorías Matorral, Pastizal o Agrícola y la categoría Latifoliado está asociada en menor grado.	Latifoliado fragmentado
Si la predominancia es de la categoría Latifoliado y las categorías Matorral, Pastizal o Agrícola están asociadas en menor grado.	Latifoliado semidenso
Si la categoría Oyamel no tiene otra asociación, o bien, si tiene sólo otra asociación forestal no predominante.	Oyamel denso
Si la predominancia es de las categorías Matorral, Pastizal o Agrícola y la categoría Oyamel está asociada en menor grado.	Oyamel fragmentado
Si la predominancia es de la categoría Oyamel y las categorías Matorral, Pastizal o Agrícola están asociadas en menor grado.	Oyamel semidenso
Si la categoría Pino no tiene otra asociación, o bien, si tiene sólo otra asociación forestal no predominante	Pino denso
Si la predominancia es de las categorías Matorral, Pastizal o Agrícola y la categoría Pino está asociada en menor grado.	Pino fragmentado
Si la predominancia es de la categoría Pino y las categorías Matorral, Pastizal o Agrícola están asociadas en menor grado.	Pino semidenso
Incluyen las categorías Pastizal, Matorral, Agua y	Otros usos no forestales

d) Sobreposición

Para analizar el cambio de uso de suelo y vegetación fue necesario realizar un proceso de sobreposición llamado cruce de tablas o Crosstab. Este comando de IDRISI permite generar tanto el mapa de cambios como una matriz de transición que muestra, numéricamente, los cambios sufridos en el periodo.

Como se ha mencionado previamente, el proceso de tabulación cruzada permite la generación de un mapa de cruce y la generación de una matriz de transición.

De esta manera es posible obtener la matriz de probabilidad de transición, la cual señala en términos relativos (%) la posibilidad que tiene una categoría de uso de suelo y vegetación de mantener su condición o de cambiar a otra categoría. Esto se logra comparando la superficie original de la primera fecha con la obtenida para la nueva fecha con sus respectivas transiciones (Bocco *et al.* 2001).

Su expresión matemática es: $P_{ij} = S_{ij} / S_j$ (1972's) / S_j (2000's). Donde P_{ij} es la probabilidad de transición, S_{ij} es la superficie del elemento ij de la matriz de transición de uso de suelo en el 2000 y S_j la superficie de la clase de cobertura/uso de suelo j en el año de 1972. Así, para cada categoría de Uso de Suelo j , $\sum P_{ij} = 1$.

Después de obtener el mapa de cruce, se procedió a eliminar las categorías de la leyenda que fueran iguales, es decir, las que sugieren que no hubo cambio de uso de suelo en las áreas que representan. Con esto se obtuvo formalmente el mapa de cambio de uso de suelo y vegetación en el PNNT 1972-2000.

RESULTADOS

Sobre el uso de suelo y vegetación 1972 y 2000

Se obtuvo una leyenda con 14 categorías para ambos mapas, haciendo énfasis en la densidad del arbolado para cada especie bajo el

principio de la presencia o no de asociaciones secundarias de vegetación (Cuadro 5): los bosques en cuyas leyendas no hay otra asociación vegetal, fueron considerados como *bosques densos*; los bosques que presentaban alguna asociación vegetal secundaria, agricultura o simplemente sin vegetación, fueron considerados como *bosques semidensos*; cualquiera de las leyendas de asociaciones vegetales, agricultura o desprovista de vegetación en cuyas asociaciones secundarias aparece alguna cobertura forestal, fueron considerados como *bosques fragmentados*; cualquier leyenda en la que se incluyera un bosque mixto, fue simplificada hacia el bosque dominante; los bosques de aile y encino se agruparon para formar simplemente el bosque de latifoliadas; las categorías de agricultura de cualquier tipo, sin otra asociación vegetal, fueron agrupadas como *agricultura* y, finalmente, las categorías de pastizal, matorral inerme, desprovisto de vegetación e incluso agua, fueron consideradas como *otros usos no forestales*, sabiendo que la predominancia es de pastizales inducidos.

a) Análisis comparativo de las coberturas de uso de suelo de ambas fechas

Se puede decir que la agricultura está perdiendo fuerza como principal actividad productiva (Cuadro 6). Esa pérdida de superficie no ha significado una recuperación sustancial del bosque, sino que ha favorecido la apertura de pastizales y matorrales. Todo parece indicar que se trata de una transición hacia el desarrollo de actividades pecuarias extensivas. Los bosques de oyamel, en general, han mostrado una importante recuperación, a pesar de que el bosque denso mostró una ligera disminución. Dentro de las explicaciones tentativas a este fenómeno se cuentan: la mayor capacidad de regeneración de este tipo de bosques, la menor calidad y valor comercial del abeto que desincentiva su aprovechamiento y el hecho de que este tipo de cobertura tiende

Cuadro 5. Reclasificación de la leyenda de uso de suelo y vegetación

Leyenda INEGI	Leyenda Modificada
Agrícola	
Agrícola con cualquier asociación forestal	Agrícola
Agrícola con pastizal	
Agrícola con matorral	
Cualquier cobertura forestal sin asociación	Bosque denso + especie forestal dominante
Pastizal con cualquier asociación forestal	
Matorral con cualquier asociación forestal	Bosque fragmentado + especie forestal dominante
Erosión con cualquier asociación forestal	
Cualquier cobertura forestal con cualquier asociación vegetal no forestal	Bosque semidenso + especie forestal dominante
Cualquier cobertura forestal con erosión	
Cualquier cobertura forestal con agricultura	
Agua	
Erosión	
Erosión con pastizal	
Erosión con agricultura	
Erosión con matorral	
Pastizal	Otros usos no forestales
Pastizal con agricultura	
Matorral	
Matorral con agricultura	
Matorral con pastizal	
Matorral con erosión	

Cuadro 6. Comparativo de los usos del suelo 1972-2000

Categoría	1972 (ha)	%	2000 (ha)	%	Incremento	%
Agrícola	8 346.34	15.85	8 023.16	15.23	-323.18	-3.87
Forestal oyamel denso	13 301.44	25.25	13 040.22	24.76	-261.22	-1.96
Forestal oyamel semidenso	1 098.72	2.09	1 776.36	3.37	677.64	61.68
Forestal oyamel fragmentado	1 048.28	1.99	1 347.64	2.56	299.36	28.56
Forestal cedro denso	0.00	0.00	140.92	0.27	140.92	100.00
Forestal cedro semidenso	0.00	0.00	118.80	0.23	118.80	100.00
Forestal cedro fragmentado	0.00	0.00	37.56	0.07	37.56	100.00
Forestal pino denso	13 279.24	25.21	7 814.52	14.84	-5 464.72	-41.15
Forestal pino semidenso	3 676.08	6.98	5 667.32	10.76	1 991.24	54.17
Forestal pino fragmentado	2 339.00	4.44	4 691.48	8.91	2 352.48	100.58
Forestal latifoliado denso	859.64	1.63	1 060.52	2.01	200.88	23.37
Forestal latifoliado semidenso	1 175.12	2.23	963.24	1.83	-211.88	-18.03
Forestal latifoliado fragmentado	519.12	0.99	5 74.92	1.09	55.80	10.75
Otros usos no forestales	7 028.28	13.34	74 14.60	14.08	386.32	5.50

a presentarse en zonas de más difícil acceso. Los bosques densos de pino, por su parte, presentaron un dramático decremento, dando paso a la apertura de bosques semidensos y fragmentados. Esto nos permite deducir un proceso de tala sistemática y selectiva con miras al aprovechamiento de los mejores ejemplares del bosque.

Del mismo modo, las coberturas con mayor incremento en porcentaje fueron el bosque fragmentado de pino (+100.58%), el bosque semidenso de oyamel (+61.68%) y el bosque semidenso de pino (+54.17%). Del mismo modo, las coberturas que presentaron los principales decrementos fueron el bosque denso de pino (-41.15%), el bosque semidenso de latifoliadas (-18.03%) y las zonas agrícolas (-3.87%).

Cambio de uso del suelo y vegetación 1972 y 2000

Como se pudo apreciar, el mapa de cambio de uso de suelo resulta muy complejo debido a la presencia de 67 categorías distintas de la leyenda. Así, con la finalidad de facilitar el análisis, se optó por estudiar por separado las transiciones sufridas para los bosques de pino, abeto y latifoliadas (a excepción del Bosque de Cedro que es producto de acciones de reforestación).

a) Análisis de cambios en los bosques de oyamel

Los bosques de oyamel tienden a distribuirse en las zonas relativamente bajas del parque nacional y en particular en la región conocida como Peña Ahumada (al noreste del parque) y en las laderas del suroeste del área protegida. Se detectaron 18 tipos de transición relacionados con este tipo de cobertura. Dichas transiciones ocuparon las siguientes superficies (Cuadro 7).

b) Análisis de cambios en los bosques de pino

Como es posible observar, los procesos de cambio en el bosque de pino tienden a presentarse en las partes más elevadas, en particular en torno al cráter del volcán Nevado de Toluca. Si bien es cierto que, a lo largo de casi 40 años, se presentaron algunos procesos de recuperación del bosque, la mayor parte de las transiciones fueron hacia el deterioro. Así, las principales afectaciones se dieron en la pérdida de densidad de bosques densos y semidensos, que, en términos generales, superó las 8 000 ha. Se trata, en definitiva, del tipo de bosque con mayor superficie deteriorada en el Parque Nacional Nevado de Toluca (Cuadro 8).

c) Análisis de cambios en bosques de latifoliadas

Se trata de una cobertura vegetal mucho más localizada en las partes bajas del área natural protegida, en particular en las laderas oriental y nororiental del volcán, y tuvo las siguientes transiciones (Cuadro 9). De manera general, la dinámica de todas las transiciones se presenta resumida en la matriz de transición ya mencionada (Cuadro 10).

Derivada de la matriz de transición, se presenta la matriz de probabilidad de transición para determinar la posibilidad que presenta cada tipo de cobertura para mantener su estado actual, según la dinámica resultante en la matriz de confusión para el periodo 1972-2000 (Cuadro 11). Como se puede apreciar en el cuadro anterior, las coberturas que mayor estabilidad presentaron fueron la agricultura, con un 74.2% de probabilidad de mantener su cobertura original y, el bosque denso de oyamel con un 82.36%.

En la mayoría de las categorías, la probabilidad de mantener su cobertura original oscila entre 30 y 60%, por lo que podría esperarse una importante dinámica de transición para estos usos de suelo y vegetación. Finalmente, existen tres categorías con muy alta

Cuadro 7. Transiciones en bosques de oyamel

Transición	Hectáreas
De oyamel denso a agrícola	93.92
De oyamel semidenso a agrícola	22.44
De oyamel fragmentado a agrícola	14.16
De agrícola a oyamel denso	216.76
De oyamel semidenso a oyamel denso	715.52
De oyamel fragmentado a oyamel denso	502.32
De otros a oyamel denso	650.68
De agrícola a oyamel semidenso	157.64
De oyamel denso a oyamel semidenso	1 139.92
De oyamel fragmentado a oyamel semidenso	167.64
De otros a oyamel semidenso	183.72
De agrícola a oyamel fragmentado	85.44
De oyamel denso a oyamel fragmentado	790.96
De oyamel semidenso a oyamel fragmentado	195.64
De otros a oyamel fragmentado	141.64
De oyamel denso a otros	319.32
De oyamel semidenso a otros	13.32
De oyamel fragmentado a otros	230.20

Cuadro 8. Transiciones en bosques de pino

Transición	Hectáreas
De pino denso a agrícola	202.2
De pino semidenso a agrícola	166.4
De pino fragmentado a agrícola	293.12
De agrícola a pino denso	39.44
De pino semidenso a pino denso	809.24
De pino fragmentado a pino denso	407.8
De otros a pino denso	220.04
De agrícola a pino semidenso	47.8
De pino denso a pino semidenso	4 294.52
De pino fragmentado a pino semidenso	412.84
De otros a pino semidenso	248.16
De agrícola a pino fragmentado	34.16
De pino denso a pino fragmentado	2 625.72
De pino semidenso a pino fragmentado	1 285.04
De otros a pino fragmentado	225.68
De pino denso a otros	526.8
De pino semidenso a otros	261.84
De pino fragmentado a otros	393.04

Cuadro 9. Transiciones en bosques de latifoliadas

Transición	Hectáreas
De latifoliado denso a agrícola	53.60
De latifoliado semidenso a agrícola	48.80
De latifoliado fragmentado a agrícola	69.52
De agrícola a latifoliado denso	121.88
De latifoliado semidenso a latifoliado denso	290.56
De latifoliado fragmentado a latifoliado el denso	162.76
De otros a latifoliado denso	58.48
De agrícola a latifoliado semidenso	98.32
De latifoliado denso a latifoliado semidenso	244.48
De latifoliado fragmentado a latifoliado semidenso	99.00
De otros a latifoliado semidenso	97.04
De agrícola a latifoliado fragmentado	60.80
De latifoliado denso a latifoliado fragmentado	82.32
De latifoliado semidenso a latifoliado fragmentado	224.04
De otros a latifoliado fragmentado	125.60
De latifoliado denso a otros	45.68
De latifoliado semidenso a otros	157.04
De latifoliado fragmentado a otros	88.08

probabilidad de sufrir algún cambio de cobertura: el bosque semidenso de oyamel, con una probabilidad del 11.6% de mantener su categoría y con una probabilidad mucho más elevada (65.12%) de transición hacia bosque denso de oyamel; el bosque fragmentado oyamel, por su parte, tiene una probabilidad del 12.78% de mantener su categoría, habiendo una mayor probabilidad de cambio hacia el bosque denso de oyamel (47.92%); finalmente, el bosque fragmentado de latifoliadas, tiene un 15.83% de probabilidad de mantenerse como tal, pero presenta una probabilidad de 31.35% hacia la recuperación del bosque denso de latifoliadas. Como se puede observar, se trata de una tendencia positiva hacia la recuperación forestal.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Derivado del análisis del uso de suelo, se obtuvieron datos muy importantes: en 1972, los

bosques densos y semidensos de oyamel representaban más del 50% de la superficie total del parque. Aunque la agricultura ocupaba poco más del 15%, el grado de conservación del área protegida era significativamente mayor al encontrado en el 2000. Para esta segunda fecha se presentó una disminución superior al 40% del bosque denso de pino. Un aspecto interesante es que las zonas agrícolas han venido disminuyendo, lo que indica que las actividades primarias han entrado en un paulatino estado de recesión. En este contexto, la disminución del arbolado se explica por procesos de extracción intensiva y semi intensiva con fines comerciales. La pérdida de coberturas forestales densas ha dado paso a un incremento en otros usos y en cubiertas forestales de menor densidad.

Como resultado del proceso de tabulación cruzada entre los mapas de 1972 y 2000, se obtuvo el mapa de las transiciones de las principales coberturas del suelo, así como la ma-

Cuadro 10. Matriz de transición

		2000										Pérdida de superficie en la cobertura original						
1972	Agrícola	6192.92	216.78	157.64	85.44	45.28	28.12	21.12	36.44	47.80	34.16	121.88	98.32	60.80	1199.64	8346.34	2153.42	
	Oyamel denso	93.92	10954.92	1139.92	790.96	0.00	2.28	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	319.32	13301.44	2346.52	
	Oyamel semidenso	22.44	715.52	127.44	195.64	0.00	24.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.32	1098.72	971.28	
	Oyamel fragmentado	14.16	502.32	167.64	133.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	230.20	1048.28	914.32	
	Cedro denso	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Cedro semidenso	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Cedro fragmentado	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Pino denso	202.20	0.00	0.00	0.00	34.44	0.00	3.56	6493.60	3749.76	2268.88	0.00	0.00	0.00	0.00	526.80	13279.24	6785.64
	Pino semidenso	166.40	0.00	0.00	0.00	0.12	12.76	0.00	741.00	1252.52	1241.44	0.00	0.00	0.00	0.00	261.84	3676.08	2423.56
	Pino fragmentado	293.12	0.00	0.00	0.00	16.96	16.80	5.24	323.44	369.08	921.32	0.00	0.00	0.00	0.00	393.04	2339.00	1417.68
	Latifoliadas denso	53.60	0.00	0.00	0.00	5.92	0.40	0.40	0.00	0.00	0.00	426.84	244.48	82.32	45.68	859.64	432.80	
	Latifoliadas semidenso	48.80	0.00	0.00	0.00	23.28	2.52	4.48	0.00	0.00	0.00	290.56	424.40	224.04	157.04	1175.12	750.72	
	Latifoliadas fragmentado	69.52	0.00	0.00	0.00	3.20	12.80	1.60	0.00	0.00	0.00	162.76	99.00	82.16	88.08	519.12	436.96	
	Otros usos	866.08	650.68	183.72	141.64	11.72	18.76	1.04	220.04	248.16	225.68	58.48	97.04	125.60	4179.64	7028.28	2848.64	
	Incremento de superficie en otras coberturas de 1972	1830.24	2085.30	1648.92	1213.68	140.92	118.80	37.56	1320.92	4414.80	3770.16	633.68	538.84	492.76	3234.96	52671.26		

triz de transición correspondiente. Dentro de las transiciones más importantes destacan aquéllas que implicaron un cierto deterioro de la vegetación natural: la pérdida de densidad de los bosques de oyamel (1 930.88 ha); la pérdida de densidad de los bosques de pino (7 205.28 ha); la pérdida de densidad de bosques de latifoliadas (625.56 ha). Como se observa, se trata de más de 9 mil hectáreas de bosques afectados.

Es importante reconocer, sin embargo, que hubo transiciones que implican una cierta recuperación de los bosques: los de oyamel se recuperaron en cerca de 2 100 ha; los de latifoliadas tuvieron un cambio positivo de 290 ha.

A pesar de que, por las características específicas del mapa deseado y por las limitaciones de presupuesto del proyecto del cual este trabajo de investigación formó parte, no se utilizaron imágenes de satélite, éstas son un insumo imprescindible para la generación de cartografía de uso de suelo, y más, para el análisis de cambio de uso de suelo, ya que su periodicidad permite un monitoreo cuidadoso de la dinámica sucedida en la cobertura territorial, lo cual puede ser una herramienta importante para el manejo de los recursos naturales.

AGRADECIMIENTOS

Los resultados presentados en este trabajo forman parte del proyecto de investigación "Estimación de la Captura de Carbono en el Parque Nacional Nevado de Toluca", financiado por CONACYT, Cve. 37022-V. Asimismo, se contó con el decidido apoyo del Centro de Investigación en Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de México.

REFERENCIAS

Bocco, G., M. Mendoza y O. Masera (2001), "La dinámica del cambio de uso de suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación",

Investigaciones Geográficas, Boletín, núm, 44, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 18-38.

Ciampagna, G. (2003), "Aplicaciones de percepción remota y sistemas de información geográfica a la identificación de cultivos y su monitoreo utilizando imágenes de alta resolución", *Memorias de la X Conferencia Latinoamericana de usuarios SIG*, [http://www.gdsig.com.ar/xconferenciasig/X%20Conferencia%20Latinoamericana%20de%20usuarios%20SIG-103.html: octubre 2005].

Chuvieco, E. (2002), *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*, Ariel, España.

Dirzo, R. y O. Masera (1996), *Clasificación y dinámica de la vegetación en México*, Centro de Ecología, UNAM, México.

INEGI (1972), *Guía de Interpretación: Carta de Uso del Suelo*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

INIFAP-SAGARPA (2003), *Atlas Estatal de Uso de Suelo, Cartas E14 A37, E14-A47 y E14 A48*, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México.

Ordóñez, C. y A. Martínez (2003), *Sistemas de información geográfica: aplicaciones prácticas con Idrisi32 al análisis de riesgos naturales y problemáticas medioambientales*, Alfaomega-Ra-Ma, España.

Palacio, J. L., G. Bocco, A. Velázquez, J. F. Mas, F. Takaki, A. Victoria, L. Luna, G. Gómez, J. López, M. Palma, I. Trejo, A. Peralta, J. Prado, A. Rodríguez, R. Mayorga y F. González (2000), "La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Forestal Nacional 2000", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm, 43, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 183-202.

Ramírez, I. (2001), "Cambios en las cubiertas del suelo en la Sierra de Angangueo, Michoacán y Estado de México, 1971-1994-2000", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm, 45, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 39-55.

SARH (1994), *Inventario Forestal Nacional Periódico*, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

licos, Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre, México.

USDA (1995), *Guidelines for the use of digital imagery for vegetation mapping*, United States Department of Agriculture, USA.

Verstappen, H. (1977), *The use of aerial photographs in geomorphological mapping*, ITC Text Book VII-5, Enschede, The Netherlands.