



Revista Mexicana de Ciencias Forestales

ISSN: 2007-1132

ciencia.forestal2@inifap.gob.mx

Instituto Nacional de Investigaciones

Forestales, Agrícolas y Pecuarias

México

Regil García, Héctor Hugo; Franco Maass, Sergio; Ordóñez Díaz, José Antonio Benjamín;
Nava Bernal, Gabino Eufemio; Mallén Rivera, Carlos

PROCESOS DE DEFORESTACIÓN Y REDUCCIÓN DE DENSIDAD DEL ARBOLADO
DEL PARQUE NACIONAL NEVADO DE TOLUCA

Revista Mexicana de Ciencias Forestales, vol. 5, núm. 23, mayo-junio, 2014, pp. 43-63

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Distrito Federal, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63439007005>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto



ARTÍCULO / ARTICLE

PROCESOS DE DEFORESTACIÓN Y REDUCCIÓN DE DENSIDAD DEL ARBOLADO DEL PARQUE NACIONAL NEVADO DE TOLUCA

DEFORESTATION AND TREE DENSITY REDUCTION OF THE NEVADO DE TOLUCA NATIONAL PARK

Héctor Hugo Regil García¹, Sergio Franco Maass², José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz², Gabino Eufemio Nava Bernal² y Carlos Mallén Rivera²

RESUMEN

Históricamente las áreas naturales de alta montaña en México han sufrido de presión a sus recursos naturales provocados por diversos factores como la extracción de recursos maderables y las plagas y enfermedades. Los intentos de zonificación resultan muy generalistas y se hace imposible hacer una evaluación de las transiciones menores de 10 años, debido a que los procesos necesarios para su evaluación suponen una elevada inversión en tiempo para tener un producto detallado y funcional. Para el Parque Nacional Nevado de Toluca se elaboró un mapa de ocupación del suelo para 2009 con una imagen SPOT basado en la categorización Cetenal de uso de suelo y vegetación escala 1:50 000 para 1972 y se contrastó con la más reciente actualización para el año 2000 como referencia. Se realizó una sobreposición de los mapas de ocupación del suelo para los años 2000 y 2009 para hacer la interpretación interactiva por sectores de las transiciones en el periodo de estudio. Así se obtuvieron las áreas en donde se ha verificado deterioro en terrenos forestales. Las áreas con mayor dinámica negativa son los bosques de pino, por efectos de deforestación y de pérdida de densidad del arbolado. Se calculó una tasa general de 35 ha año⁻¹, contra solo 3 ha año⁻¹ de bosques recuperados. Se concluye que el área natural protegida está sujeta a intensos procesos de tala selectiva de manera ilegal o por saneamiento.

Palabras clave: Deforestación, densidad del arbolado, fotointerpretación, ocupación del suelo, parque nacional, Sistemas de Información Geográfica.

ABSTRACT

Historically, the natural resources of the high mountain areas of Mexico have undergone pressures due to various factors such as timber extraction, pests and diseases. Zoning attempts have been very general, and it is impossible to assess the transitions that occur in periods of less than 10 years, because adequate assessment requires processes that involve a high time investment in order to obtain a highly detailed and functional product. A land cover map of the *Nevado de Toluca* National Park (PNNT) was made in 2009 with a SPOT image based on the land use categorization by Cetenal and on vegetation charts with a 1:50 000 scale for the year 1972. As a reference, this map was contrasted with the most recent update of this image, produced in the year 2000. The land cover maps for the years 2000 and 2009 were superimposed in order to carry out an interactive interpretation by sectors of the transitions that took place during the study period. This made it possible to estimate the areas in which the forest cover has suffered damaging processes. The areas with the most dynamic degradation were found to be the pine forests, where the damages were due to deforestation and loss of tree density. There is an overall deforestation rate of 35 ha year⁻¹, versus a mere 3 ha year⁻¹ of recovered forests. It was concluded that the protected area is subject to intense selective logging processes that occur illegally or for sanitation purposes.

Key words: Deforestation, tree density, photointerpretation, land use, National Park, Geographic Information Systems.

Fecha de recepción/date of receipt: 21 de marzo de 2013; Fecha de aceptación/date of acceptance: 10 de noviembre de 2013.

¹ Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Universidad Autónoma del Estado de México. Correo-e: regil_hh@yahoo.com.mx

² Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales, Universidad Autónoma del Estado de México.

³ Pronatura México A. C.

⁴ Dirección de Producción y Divulgación. INIFAP.

INTRODUCCIÓN

Mucho se ha discutido sobre la diferencia entre el término uso de suelo y el de la ocupación del suelo. Mientras la segunda se refiere a la naturaleza física de la superficie del terreno que puede ser identificada visualmente en campo o a través de medios de percepción remota; el “uso del suelo” expresa el aprovechamiento o los fines económicos de esas cubiertas (Meyer y Turner, 1994). Bocco *et al.* (2001) define como ocupación a la descripción de los objetos que se distribuyen sobre un territorio determinado. El uso, por su parte, se refiere a la actividad socioeconómica que se desarrolla (o desarrolló) en una ocupación. Este estudio se dirigió hacia el análisis de los cambios de ocupación del suelo, para lo cual es importante el entendimiento de dos conceptos básicos: el deterioro y la recuperación.

El deterioro es el conjunto de cambios en la constitución de la vegetación natural producidos por agentes destructores, y se clasifica en deforestación, que es la eliminación total de la vegetación y su reemplazo por otras formas de ocupación no forestales; la fragmentación o reducción de densidad, que se verifica cuando una parte de la vegetación original de una zona se retira; el disturbio, alteración que directa o indirectamente se ha provocado en la vegetación, además de por actividades humanas también por fenómenos naturales como incendios y plagas, entre otros factores (Semarnat, 2005).

La recuperación, por otro lado, es el conjunto de procesos mediante los cuales la cubierta vegetal tiene un cierto crecimiento en área o densidad. Incluye a la reforestación, introducción de la masa forestal con influencia antrópica en un terreno que ya poseía una ocupación forestal distinta, pero de manera natural; la regeneración es el proceso dinámico por el que nuevos individuos se incorporan a la población reproductora a medida que otros desaparecen, como consecuencia de la mortalidad natural o inducida.

El Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT) (Figura 1) es una de las áreas naturales protegidas (ANP) más significativas del Estado de México, pues es un reservorio valioso de elementos ecológicos. El aprovechamiento de los recursos forestales por parte de la población local, la extracción ilegal de madera y la proliferación y expansión de plagas y enfermedades han afectado mucho las condiciones del arbolado, lo que ha generado una falta total de arbolado o una severa reducción en la densidad de los bosques. Pese a la importancia del parque nacional como proveedor de servicios ambientales (Rodríguez y Franco, 2003), aún no existen trabajos que permitan dimensionar de manera detallada las implicaciones inherentes al detrimento en la calidad de los recursos forestales de la región, y puntualmente lo relativo a la pérdida de densidad del arbolado.

INTRODUCTION

There has been much discussion regarding the difference between the terms “soil use” and “soil occupation”. While “soil occupation” refers to the physical nature of the surface of the land that can be visually identified in field or using remote sensing, “soil use” designates the exploitation or the economic ends of these vegetation covers (Meyer and Turner, 1994). Bocco *et al.* (2001) define occupation as the description of objects distributed throughout a certain territory. On the other hand, use refers to the socioeconomic activity that is (or has been) developed in an occupation. The present study focuses on the analysis of the changes in soil occupation, for which purpose it is essential to understand two basic concepts: degradation and recovery.

Degradation is the combination of changes produced in the makeup of the natural vegetation by destructive agents. It is divided into the categories of deforestation, i.e. the total elimination of the vegetation and its replacement with other, non-forest forms of occupation; fragmentation or density reduction, which occurs when the natural vegetation of an area is removed, and disturbances, i.e. the alterations produced directly or indirectly on the vegetation by human activities or by natural phenomena such as fires and pests, among other factors (Semarnat, 2005).

Recovery, on the other hand, is the set of processes that allow the vegetation cover to grow in area and/or density. It includes reforestation, i.e. the introduction of the forest mass, by anthropic influence, in a land that has naturally had a different forest occupation in the past. Regeneration is a dynamic process whereby new individuals become incorporated to the reproductive population as others disappear as a consequence of natural or induced mortality.

The *Nevado de Toluca* National Park (PNNT by its Spanish acronym) (Figure 1) is one of the most significant Protected Natural Areas (PNAs) in the *Estado de México*, as it is a valuable reservoir of ecological elements. The exploitation of the forests by the local population, the illegal extraction of wood and the proliferation and expansion of pests and diseases has seriously affected the conditions of the trees, resulting in total loss or in a severe reduction of tree density. Despite the importance of the national park as a provider of environmental services (Rodríguez and Franco, 2003), no work has been carried out yet to allow a relevant, detailed estimate of the inherent implications to the detriment of the quality of the region's forest resources or the loss of tree density.

In this respect, Franco *et al.* (2006) carried out the closest analysis of the disturbance-recovery dynamics in the area of interest, based on the classification by Cetenal (1976), and then superimposed the soil occupation maps of the *Nevado*



Estados Unidos de América = United States of America; México = Mexico; Océano Pacífico = Pacific Ocean; Golfo de México = Gulf of Mexico; PNNT = Nevado de Toluca National Park; División estatal = State division; Centroamérica = Central America; Regiones Colindantes = Adjacent regions.

Figura 1. Localización del Parque Nacional Nevado de Toluca.

Figure 1. Location of the *Nevado de Toluca* National Park

A este respecto, Franco *et al.* (2006) elaboraron, a la fecha, el análisis más cercano de la dinámica de disturbio-recuperación en el área de interés, basado en la clasificación Cetenal (1976), para finalizar con la sobreposición de los mapas de ocupación del suelo del Parque Nacional Nevado de Toluca de 1972 y 2000. Dichos autores observaron que los bosques de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham.) son los que se mantienen en buen estado de equilibrio y que los bosques de pino (*Pinus* spp.) presentan evidentes procesos de extracción selectiva, además de que la tasa general de deforestación durante el periodo 1972-2000 fue de 0.48 % anual. Sin embargo, en esta investigación se advirtieron algunas inconsistencias que pudieron sesgar los resultados, tales como la falta de control para detectar las áreas residuales inherentes al proceso de digitalización, reclasificación y sobreposición, que pudieron sobreestimar o subestimar las áreas con transición; otro ejemplo, fue el hecho de que, si bien se determinó la tasa de deforestación, el indicador más relevante para señalar algún tipo de dinámica interna significativa en los bosques es la pérdida o recuperación de densidad del arbolado, la cual no se estableció.

de Toluca National Park for the years 1972 and 2000 (Franco *et al.*, 2006). These authors observed that the sacred fir (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham.) forests maintained a good balance; that the pine (*Pinus* spp.) forests showed evident processes of selective extraction, and that the general deforestation rate was 0.48% per year during the period 1972-2000. However, in the course of this research, some inconsistencies were observed that may have biased the results, including the absence of a control to detect the residual areas inherent to the digitalization, reclassification and superimposition processes, which may have resulted in over- or underestimation of the areas where transitions occur; another example is the fact that, although the deforestation rate was determined, the loss or recovery of tree density -the most relevant indicator of any type of significant internal dynamics in the forests- was not established.

The objectives of this research were, on one hand, to increase the level of accuracy in the determination of changes of soil occupation and in the generation of a soil occupation map, as well as to recommend a rigorous, agile procedure that may allow the easy replication of the study for subsequent periods.



Los objetivos de este trabajo fueron, por una parte, mejorar la precisión en la generación de la cartografía de ocupación de suelo y en la determinación del cambio de la misma, así como recomendar un procedimiento ágil y preciso que permita la fácil replicación del estudio para subsecuentes periodos.

Adicionalmente, se zonificó la dinámica de la ocupación forestal del PNNT como base para definir las acciones tendientes a tener un mejor control, gestión y manejo del ANP.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el área de estudio, se elaboró un mapa de ocupación del suelo para 2009 a partir del mapa de 2000 elaborado por Franco *et al.* (2006), que reúne 125 categorías en formato vectorial y cuya área mínima cartografiable es de 800 m². De la misma manera, se utilizó el mosaico de ortofotos 1:20 000 del Instituto de Investigación e Información Geográfica Estadística y Catastral del Estado de México (IIIGCEM, 2002) que dio origen al mapa del año 2000.

Con respecto a 2009, al no tener ortofotos actualizadas para la fecha que se requería cubrir, se optó por utilizar imágenes Spot 5, cuyas características de resolución espacial y claridad fueron compatibles para ser comparadas con las ortofotos de IIIGCEM.

Interpretación de cambios de ocupación

Para el presente estudio se elaboró el mapa de cambio de ocupación a partir de las transiciones detectadas al superponerse las ortofotos digitales y la imagen Spot, la edición se realizó sobre el mapa vectorial de ocupación del suelo 2000 en el programa Arc Gis mediante el siguiente procedimiento:

Sobreposición de materiales y edición. Se cargaron en el software Arcgis® versión 9.3 (ESRI, 2008) tanto el mosaico de ortofotos para 2000 como el corte SPOT 2009, así como el mapa vectorial de ocupación del suelo 2000. Posteriormente, se habilitó una visualización de transparencia para los dos insumos de imagen, a fin de evidenciar las zonas en las que hubo una modificación en una fecha con respecto a otra; el área mínima cartografiable quedó delimitada 400 m².

Así, el área de estudio se dividió en 17 sectores, y se verificó la continuidad de cada uno de los 3 986 polígonos que componen el mapa vectorial 2000. En el momento en el que se observaba un cambio de una imagen con respecto a otra, se seccionaba el polígono en el área en que se identificaba la transición; de esta forma se creaba un nuevo polígono cuya asignación en tabla se registró en una columna denominada "cambio"; después de un proceso de reclasificación, se daría origen al mapa de cambio de ocupación del suelo 2000-2009, y también, por

Furthermore, the dynamics of the forest occupation within the PNNT was divided into zones to provide a base upon which to define actions tending to improve the control and management of the PNA.

MATERIALS AND METHODS

For the study area, a soil occupation map was produced for 2009 based on the 2000 map made by Franco *et al.* (2006), which brings together 125 categories in a vectorial format and in which the minimum mappable area is 800 m². The mosaic of orthophotos 1:20 000 of the Institute of Geographical, Statistical and Cadastral Research and Information of the *Estado de México* (IIIGCEM, 2002, which originated the 2000 map, was also utilized.

Since there were no updated orthophotos for the year 2009, the decision was made to utilize Spot 5 images, whose characteristics of spatial resolution and sharpness were compatible and comparable to the IIIGCEM orthophotos.

Interpretation of occupation changes

The occupation change map created for the present study is based on the transitions detected by superimposing the digital orthophotos and the Spot image, and editing upon the vectorial soil occupation map for the year 2000 with the Arc Gis software and using the following procedure:

Superimposition of materials and edition. The mosaic of orthophotos for the year 2000 and the 2009 SPOT image cut, on one hand, and the soil occupation vectorial map for the year 2000, on the other, were uploaded to the software Arcgis® version 9.3 (ESRI, 2008). Subsequently, slide visualization was activated for the two image inputs in order to evidence the areas where a modification had occurred between the two dates; the minimum mappable area was determined as 400 m².

Thus, the study area was divided into 17 sectors, and the continuity of each of the 3 986 zones that make up the 2000 vectorial map was verified. Whenever a change in the image was observed, the zone in the area in which the transition was identified was selected; in this manner, a new zone was created whose allocation in the table was recorded in the column labeled "change". After a reclassification process, this process originated the 2000-2009 soil occupation change map. Also, the 2000 soil occupation map was created using an additional recategorization.

Validation of the soil occupation map

Soil occupation changes generally require two validations, one for each date of the study; the images are then superimposed

otra recategorización, se generaría el mapa de ocupación del suelo 2000.

Validación del mapa de ocupación del suelo

Por lo general para los trabajos de cambio de ocupación del suelo es necesario realizar dos validaciones, una por cada fecha de estudio, para después pasar a una sobreposición a fin de obtener finalmente el mapa de cambio; sin embargo, para el presente trabajo el mapa creado fue el de transiciones entre dos fechas, y, en el entendido de que el mapa vectorial para el año 2000 había sido validado en el estudio de Franco *et al.* (2006), la validación ahora correspondía exclusivamente a lo detectado para cambios.

Como en el mapa 2000, el tamaño de muestra fue determinado según lo que señala Chuvieco (2002) con la siguiente ecuación:

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

Donde:

- n = Tamaño de la muestra
- L = Intervalo de error tolerable
- z = Abscisa de la curva normal para un valor determinado de probabilidad
- s^2 = Varianza muestral
- N = Tamaño de la población

Para calcular el tamaño de la muestra es necesario fijar un margen de error permitido (L), un intervalo de probabilidad (que define el valor z) y estimar la varianza muestral (s^2). Así, al considerar que se quería estimar el error del mapa con una probabilidad de 95 %, y que los aciertos fueran de 85 %, y el máximo de error permitido se estableciera en un intervalo de ± 5 %, el número mínimo de muestras debía ser de 196.

Una vez determinado el tamaño de muestra, fue necesario precisar que los sitios en campo no correspondieran a ocupaciones, como tradicionalmente se hace para rectificar mapas de esta índole, sino que se buscarían las evidencias de transición que validaran la interpretación interactiva entre las dos fechas consideradas. Se muestreó un total de 198 polígonos de transición, de los cuales 189 fueron coincidentes y nueve no coincidieron con la transición registrada por percepción remota; uno en la zona norte del área conocida como Peña Ahumada, correspondiente a un informe de pérdida de densidad forestal; otro en la zona que divide la estructura de Peña Ahumada con el volcán, cercano a la comunidad de Buenavista, en donde se registra una pérdida total de arbolado, que se confirmó como inexistente al corroborar la información en campo; dos en la zona poniente de la estructura volcánica, correspondiente por pérdida de densidad en bosque de pino, sin encontrar evidencia de ésta dinámica en campo; otro en

in order to obtain a map of the changes. However for this study, the map thus created showed the transitions between two dates, and since the vectorial map for the year 2000 had been validated in the study by Franco *et al.* (2006), the new validation was exclusively for the changes that were detected.

As in the case of the 2000 map, according to Chuvieco (2002) the sample size was determined using this equation:

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

Where:

- n = Sample size
- L = Tolerable error interval
- z = Abscissa of the normal curve for a particular probability value
- s^2 = Sample variance
- N = Population size

In order to calculate the sample size, it is necessary to establish an allowed error margin (L) and a probability interval (defining the z value), and to estimate the sample variance (s^2). Thus, if we estimate the error of the map with a 95 % probability, having 85 % correct values and establishing the maximum error allowed within an interval of ± 5 %, the minimum number of samples should be 196.

Once the sample size were determined, it was necessary to specify that the in-field samples were not to be occupations as is usual in the rectification of this kind of maps, but, instead, evidences of transition validating the interactive interpretation between the two studied dates would be sought. A total of 198 transition zones were included, of which 189 were coincident and nine did not correspond to the transition recorded with remote sensing, one at the north of the area known as Peña Ahumada, reported as a loss of forest density; another area that divides the Peña Ahumada structure with the volcano, near the community of Buenavista, where a total loss of woodland was reported and that it was confirmed as nonexistent when the field was reviewed; two on the west side of the volcanic structure, corresponding to loss of density in pine forest, finding no evidence of this dynamic in the field; another in the south-west of the volcanic structure area where a recovered density area in fir forest is found, without finding evidence to corroborate this fact in the field; two on the northeastern part of the volcanic structure, where deforestation occurred in alder forests, without having been confirmed in the field as well and another two at the southeast where changing pine forests to agricultural areas can be seen without having confirmed in the field the existence of processes of expansion of economic activities in order to obtain a confidence interval of 95.4 %; this surpassed the minimum value for map validation, which is 80 %. An assessment was made of the status of those areas where



la zona sur-poniente de la estructura volcánica, en donde se registra la recuperación de densidad en bosque de oyamel, sin haber identificado en campo evidencia que corroborara éste hecho; dos en la zona nororiental de la estructura volcánica, en donde se verifican procesos de deforestación en bosques de aile, sin haberlo podido confirmar en campo tampoco y otro dos al sureste donde se advierte el cambio de bosques de pino a zonas agrícolas, sin haber corroborado también en campo la existencia de procesos de expansión de actividades económicas para obtener una confiabilidad de 95.4 %, lo cual excede el nivel mínimo de validación cartográfica de 80 %. Cabe mencionar que durante el trabajo de validación, se evaluó el estado de los territorios que suponían un proceso de transición, que, si se trataba de una sucesión natural propia de una dinámica normal del bosque sin inferir con esto un proceso de deterioro; por lo tanto, se desestimó ésta área de estudio como parte de la fenomenología buscada.

Matriz de transiciones

Después de agrupar las transiciones registradas en grupos que evidenciaran el estado de deterioro o conservación del área de interés, la manera más ágil de interpretar los resultados era vaciar la información generada en una matriz de transiciones.

Las matrices de transición se utilizan para analizar detalladamente la dinámica de cambio en la ocupación del suelo. Se describen como tablas con arreglos simétricos que contienen en uno de los ejes, las categorías de ocupación del suelo en el año base y en el otro eje, estas mismas categorías para el segundo tiempo (tiempo 0 y tiempo 1). Así, cada una de las celdas de la diagonal principal de la matriz representa la superficie (en ha) de cada categoría de ocupación del suelo que permaneció sin cambio alguno en el periodo considerado, mientras que el resto de las celdas estiman la superficie de una determinada ocupación del suelo que pasó a otra categoría (Dirzo y Masera, 1996).

Como resultado de la matriz de transición se obtiene la de probabilidad de transición, la cual señala en términos relativos (%) la posibilidad que tiene una categoría para mantener su ocupación o de tener un proceso de cambio al comparar la superficie original de la primera fecha con la producida para la nueva fecha con sus respectivas transiciones (Bocco *et al.*, 2001).

Su expresión matemática es la siguiente:

$$P_{ij} = \frac{S_{ij}(f_1)}{S_j(f_2)}$$

transition processes occurred, and whenever a transition was found to be a natural succession typical of a standard dynamic of the forest, not interfering with the degradation process, it was excluded from the sought phenomena.

Transition matrix

Once the recorded transitions were classified in groups that evidenced the degradation or preservation status of the area of interest, the most agile way to interpret the results was to copy out the collected information using a transition matrix.

Transition matrices are used for analyzing the dynamics of soil use changes in detail. They are described as tables with symmetric arrangements showing on one of the axes the soil occupation categories during the baseline date, and on the other axis, the same categories for the second date (date 0 and date 1). Thus, each one of the cells of the main diagonal of the matrix represents the surface (in has) of each soil occupation category -which remained unchanged during the studied period-, while the rest of the cells estimate the surface of a particular soil occupation that transitioned to a different category (Dirzo and Masera, 1996).

A product of the transition matrix is the transition probability matrix, which indicates in relative terms (%) the likelihood that a particular category will preserve its occupation or that it will undergo a transition, by comparing the baseline surface on the first date to the surface calculated for the new date, along with its respective transitions (Bocco *et al.*, 2001).

Its mathematical expression is as follows:

$$P_{ij} = \frac{S_{ij}(f_1)}{S_j(f_2)}$$

Where:

P_{ij} = Transition probability

S_{ij} = Surface of the "ij" element of the soil use transition matrix on date 1 (d_1)

S_j = Surface of the "j" class of soil occupation on date 2 (d_2)

Thus, for each "j" soil occupation category, $\sum P_{ij} = 1$

Reclassification of the soil occupation change map

After the transition areas were assigned, the produced soil use change map was reclassified according to the recommendations of Ordóñez and Martínez (2003), in order to delimit the transition groups that represented a degradation or recovery process.

Donde:

P_{ij} = Probabilidad de transición

S_{ij} = Superficie del elemento "ij" de la matriz de transición de uso de suelo en la fecha 1 (f_1)

S_j = Superficie de la clase de ocupación de Suelo "j" en la fecha 2 (f_2)

Así, para cada categoría de ocupación de suelo

"i", $\sum P_{ij} = 1$

Reclasificación del mapa de cambio de ocupación del suelo

Después de haber realizado el proceso de asignación de zonas de transición, se procedió a reclasificar el mapa generado de cambio de uso de suelo según lo recomendado por Ordóñez y Martínez (2003), con el fin de delimitar los grupos de transiciones que representaban un proceso de deterioro o de recuperación.

De un total de 125 categorías por fecha, se redujeron a solo 36, en las cuales las clases forestales eran la prioridad, y se destacaron elementos como especie y densidad del arbolado, además de las correspondientes a pastizales, vegetación secundaria y desprovista de vegetación. La reclasificación se basó en el índice de abundancia-dominancia de Braun-Blanquet (Cetenal, 1976), que indica el grado de importancia de las especies que conforman una categoría y la determinan de manera estimativa en función del porcentaje de ocupación. Para aquellas que involucran cubierta forestal, las opciones de distribución consistieron en lo siguiente:

1. Bosque denso: aquellas superficies en las cuales el arbolado ocupa entre 80 y 100 %.
2. Bosque semidenso: aquellas superficies en las cuales el arbolado ocupa entre 50 y 80 %, y el resto de la proporción tenía una ocupación no forestal (pastizal, agrícola, matorrales, desprovista de vegetación).
3. Bosque mono específico fragmentado: Aquellas superficies en las que el arbolado tiene una ocupación secundaria de entre 20 y 50 %; aquí la mayor proporción de superficie es ocupada por una categoría no forestal (pastizal, agrícola, matorrales, suelo desnudo, antrópico).

Adicionalmente se tomaron en cuenta categorías complementarias como especies agrícolas, cuerpos de agua e intervención antrópica. El listado de categorías reclasificadas se presenta en el Cuadro 1.



A total of 125 categories per date were reduced to 36, of which the forest classes were priority, emphasizing such elements as the tree species and density, as well as those corresponding to grasslands, secondary vegetation and areas devoid of vegetation. The reclassification was made based on the Braun-Blanquet index of abundance-dominance (Cetenal, 1976), indicating the degree of importance of those species which constitute a particular category and determine it approximatively in terms of the occupation percentage. For the categories involving a forest cover, the distribution options were as follows:

1. Dense forest: a surface of which 80 to 100 % is occupied by trees.
2. Semi-dense forest: a surface of which 50 to 80 % is occupied by trees and the rest has a non-forest occupation (grasslands, agricultural, shrubs, areas devoid of vegetation).
3. Monospecific fragmented forest: a surface with a 20 to 50 % secondary tree occupation; the largest proportion of the surface is occupied by a non-forest category (grasslands, agricultural lands, shrubs, naked soil, and anthropic intervention).

Additionally, complementary categories including agricultural lands, water bodies and anthropic intervention were taken into account. Table 1 shows a list of the reclassified categories.

Determination of the degradation of recovery level

Once a more manageable map was obtained, the main transitions during which a change in the forest structure occurred became evident; what remained was to evaluate the degree of disturbance or recovery observed during the study period, using the criteria proposed by Franco *et al.* (2006).

The degree of disturbance or recovery relative to each transition was determined based on the change of density of the various forest occupations. It is worth clarifying that the terms "Degradation" and "Recovery" are relative exclusively to the tree density dynamics and do not include pests, diseases or fires occurring on these surfaces. Figure 2 summarizes the outlined degradation-recovery dynamics.

The degree of tree degradation or recovery was defined by the change undergone as a result of any one of the occupations (Figure 2): for example, if a transition occurred from a dense (1) to a semi-dense (2) forest, from a semi-dense (2) to a fragmented (3) forest, or from a fragmented forest (3) to a non-forest occupation (4); this was referred to as "moderate degradation". On the other hand, if there was a direct change from a dense (1) to a fragmented forest (3), or from a semi-dense forest (3) to other non-forest occupations (4), this was considered to be a "strong degradation". Finally, if there was a direct transition

Cuadro 1. Categorías reclasificadas para cambio de ocupación del suelo.

Categorías			
Bosque denso de pino	Bosque denso de aile	Bosque denso de cedro	Pastizal
Bosque semidenso de pino	Bosque semidenso de aile	Bosque semidenso de cedro	Sin vegetación
Bosque fragmentado de pino	Bosque fragmentado de aile	Bosque fragmentado de cedro	Vegetación secundaria
Bosque denso de oyamel	Bosque denso de encino	Área agrícola	
Bosque semidenso de oyamel	Bosque semidenso de encino	Pastizales	
Bosque fragmentado de oyamel	Bosque fragmentado de encino	Cuerpos de agua	

Table 1. Reclassified categories for soil occupation change.

Categories			
Dense pine forest	Dense alder forest	Dense cedar forest	Grassland
Semi-dense pine forest	Semi-dense alder forest	Semi-dense cedar forest	Devoid of vegetation
Fragmented pine forest	Fragmented alder forest	Fragmented cedar forest	Secondary vegetation
Dense fir forest	Dense holm oak forest	Agricultural area	
Semi-dense fir forest	Semi-dense holm oak forest	Grasslands	
Fragmented fir forest	Fragmented holm oak forest	Water bodies	

Determinación de nivel de deterioro o recuperación

Al obtener una cartografía más manejable, se evidenciaron las principales transiciones en las cuales un cambio en la estructura forestal estaba presente; lo que restaba era evaluar el grado de perturbación o recuperación observado en el periodo de estudio, para lo cual se utilizaron los criterios propuestos por Franco *et al.* (2006).

El grado de perturbación o recuperación relativo a cada transición se determinó con base en el cambio de densidad de las distintas ocupaciones forestales. Cabe mencionar que los términos "Deterioro" y "Recuperación" son relativos exclusivamente a la dinámica de densidad forestal y no incluyen rubros como plagas, enfermedades o incendios en dichas superficies. La Figura 2 resume la dinámica de deterioro-recuperación planteada.

from a dense forest (1) to other non-forest occupations (4), it was assumed that it was a "severe degradation". Likewise, the criterion was applied in the opposite sense, i.e. of forest recovery, the assessment parameters being "high recovery", "medium recovery" and "low recovery".

Deforestation rates and tree density reduction

As a complementary datum, the decision was made to estimate the global deforestation rate, whereby the total forest loss was determined as a percentage.

The equation used was:

$$K = NI (S_{2009}/S_{2000})/t$$

Where:

S_{2009} = Forest surface at time 1

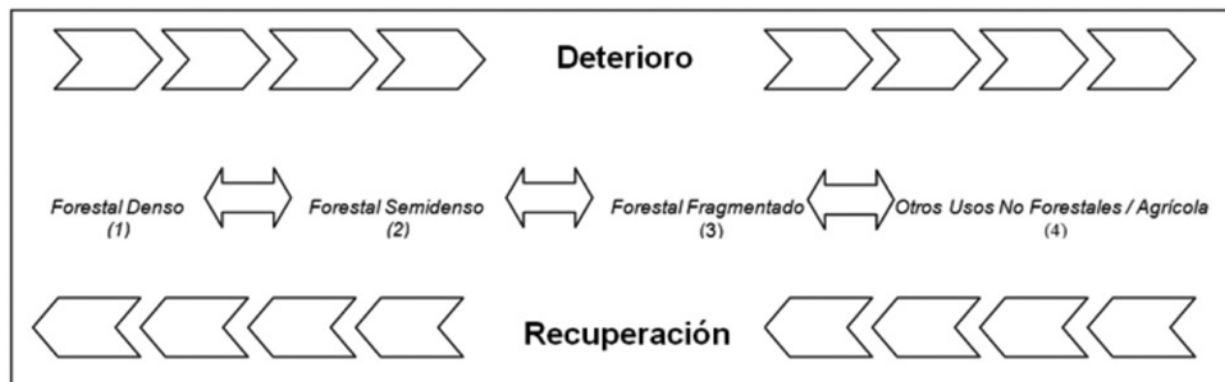
S_{2000} = Forest surface at time 2

t = Time difference in years

K = Yearly deforestation rate and

NI = Natural logarithm (Rosete, 1997)





Fuente: Franco *et al.* (2006).

Source: Franco *et al.* (2006).

Deterioro = degradation; Forestal denso = Dense forest; Forestal Semidenso = Semi-dense forest; Forestal Fragmentado = Fragmented forest; Otros usos no forestales/Agrícola = Other non-forest/agricultural uses; Recuperación = Recovery

Figura 2. Dinámica de deterioro-recuperación forestal.

Figure 2. Dynamics of forest degradation and recovery.

Se definió el grado de deterioro o recuperación del arbolado por el cambio sufrido por alguna de las ocupaciones (Figura 2). Por ejemplo, si se pasó de un bosque denso (1) a un bosque semidenso (2), de un bosque semidenso (2) a un bosque fragmentado (3) o de un bosque fragmentado (3) a una ocupación no forestal (4), se denominó como “deterioro moderado”. Por otra parte, si se pasó directamente de un bosque denso (1) a un bosque fragmentado (3) o de un bosque semidenso (2) a otras ocupaciones no forestales (4), se consideró como un “deterioro fuerte”. Finalmente, si se pasó directamente de un bosque denso (1) a otras ocupaciones no forestales (4), se asumió que se trataba de un “deterioro grave”. Del mismo modo, se manejó el criterio en el sentido inverso, es decir, de la recuperación forestal, siendo sus parámetros de calificación “recuperación alta”, “recuperación media” y “recuperación baja”.

Tasas de deforestación y de disminución de densidad forestal

Como dato complementario, se decidió obtener la tasa de deforestación global, con lo que se determinó la pérdida total de bosque en porcentaje.

La ecuación usada es:

$$K = \ln (S_{2009}/S_{2000})/t$$

Donde:

S_{2009} = Superficie forestal tiempo 1

S_{2000} = Superficie forestal tiempo 2

t = Diferencia de tiempo en años

K = Tasa de deforestación anual

\ln = Logaritmo natural (Rosete, 1997)

RESULTS AND DISCUSSION

Soil occupation changes

As a result of the interactive interpretation of the transitions, two products were obtained: the soil occupation map for the year 2009 and soil occupation change map for the 2000-2009 period; the latter constitutes the main outcome of the research.

For the analysis of the soil use changes involving an evidence of tree degradation or recovery, the classes were grouped into categories by density. Thus, out of the 125 soil occupation categories, 18 were obtained for each date, a fact that rendered the interpretation easier and quicker.

Transition matrix

As a result of the transfer of the information obtained from the interpretation process of the soil occupation changes for the study period, we obtained a transition matrix that explained in detail the dynamics of change that occurred during the study period (Table 2).



Cuadro 2. Matriz de transición de ocupación del suelo en el periodo 2000-2009.

	Agrícola	Agua	Cedro Denso	Cedro Fragmentado	Cedro Semidenso	Intervención antrópica	Latifoliado Denso	Latifoliado Fragmentado (lencino y/o alie)	Latifoliado (lencino y/o alie)	Semidenso (lencino y/o alie)	Oyamel Denso	Oyamel Fragmentado	Oyamel Semidenso	Pastizal	Pino Denso	Pino Fragmentado	Pino Semidenso	Sin Vegetación	Vegetación Secundaria
Agrícola	93049									0.5				50				1.5	52.1
Agua		19.8																	10
Cedro Denso			1600																
Cedro Fragmentado	0.2			55.5															
Cedro Semidenso			42		133.5														
Intervención antrópica						108.7													
Latifoliado Denso	1.3						1143.9	148	5.3									0.5	6.3
Latifoliado Fragmentado	3.3							370.3	5.5										13.5
Latifoliado Semidenso	5.3						2.4	338	1052.3										16.4
Oyamel Denso	3.4									14795.3									130
Oyamel Fragmentado	5.9										1086.4								70.5
Oyamel Semidenso	28										16.9	170	1699.6	5.5					20.7
Pastizal	4.9	2.4				1.6					1.4	1.9		4308.6		40		1.1	4.6
Pino Denso	3.5											3.5		36	6555.8	192	99.9		9.1
Pino Fragmentado	13.9													46.2		4565.7		38	16.2
Pino Semidenso	28													150		1308	6134.7	0.2	8.4
Sin Vegetación	0.8																		
Vegetación Secundaria	52.3				1.3	1.5		30	12.4		5.8			0.8				680.4	866.6

Table 2. Soil occupation transition matrix for the 2000-2009 period.

	Agricultural	Water	Dense Cedar	Fragmented Cedar	Semi-dense Cedar	Anthropic Intervention	Dense Broadleaf (Holm Oak and /or Alder)	Broadleaf Fragmented (Holm Oak and/or Alder)	Broadleaf Semi-dense (Holm Oak and/or Alder)	Dense Fir	Fragmented Fir	Semi-dense Fir	Grassland	Dense Pine	Fragmented Pine	Semi-dense Pine	Devoid of Vegetation	Secondary Vegetation
Agricultural	9304.9								0.5								1.5	52.1
Water		19.8																
Dense Cedar			1600															1.0
Fragmented Cedar				55.5														
Semi-dense Cedar					133.5													
Anthropic Intervention						108.7												
Dense Broadleaf							1143.9	148	5.3								0.5	6.3
Fragmented Broadleaf								370.3	5.5									13.5
Semi-dense Broadleaf										2.4	33.8	1052.3						16.4
Dense Fir																		13.0
Fragmented Fir										14795.3	16.9	43.9						70.5
Semi-dense Fir											1086.4							20.7
Grassland										1.4	17.0	1699.6						
Dense Pine													4308.6				1.1	4.6
Fragmented Pine														6555.8				9.1
Semi-dense Pine															4565.7		3.8	16.2
Devoid of Vegetation																6134.7	0.2	8.4
Secondary Vegetation																	660.4	866.6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los cambios de ocupación de suelo

Como resultado de la interpretación interactiva de transiciones, se obtuvieron dos productos: el mapa de ocupación del suelo para el año 2009 y el de cambio del mismo concepto para el periodo 2000-2009, producto principal del trabajo de investigación.

Para el análisis de los cambios de uso de suelo que implicaban una evidencia de deterioro o recuperación del arbolado, se agruparon las clases en categorías por densidad. Así, de las 125 categorías de ocupación de suelo, resultaron 18 por fecha, lo que agilizó su interpretación.

Matriz de transición

Como resultado del vaciado de la información obtenido del proceso de interpretación de los cambios de ocupación del suelo para el periodo de estudio, se obtuvo una matriz de transición que explica con detalle las dinámicas de cambio suscitadas en el periodo de estudio (Cuadro 2).

En el Cuadro 2 se observa que de las casi 54 000 ha que conforman el PNNT, en 884 ha se produjo algún tipo de transición, en la que los cambios más significativos se describen a continuación:

Ocupación agrícola. Se modificó la ocupación en 68 ha que originalmente eran agrícolas. Los principales cambios indican que para 2009, 8.5 ha presentan rasgos antrópicos y 52 ha vegetación secundaria, lo que hace evidente un abandono de tierras de cultivo, que bien puede obedecer a un detrimento en su productividad.

Bosques de cedro. Reconocidos como bosques introducidos producto de reforestaciones en décadas pasadas, indican (Figura 2) una ocupación estable, pues en muy poca superficie aparecen procesos tanto de recuperación como de deterioro, lo cual es entendible por su reducida superficie representada en el área de estudio.

Bosques de latifoliadas. En estas ocupaciones de suelo (encino y/o aile), casi en su totalidad registraron procesos de deterioro forestal. En el caso de los bosques densos de latifoliadas, de las casi 30 ha de transición, las más impactantes fueron hacia bosques fragmentados (14.8 ha), entre lo que destacan los procesos de extracción intensiva. Por otra parte, para los bosques semidensos, de las casi 64 ha de este tipo, las más sobresalientes son hacia bosques fragmentados en casi 34 ha y las 16 ha hacia vegetación secundaria, lo que sugiere procesos de tala selectiva. Por último, para los bosques fragmentados, de las casi 33 ha de transición, las más sobresalientes van dirigidas hacia una pérdida total del arbolado,

Table 2 shows some kind of transition occurring in 884 out of the 54 000 ha that make up the PNNT. The most significant changes were the following:

Agricultural occupation. The occupation was modified in 68 ha that were originally agricultural. The first changes indicate that in 2009, anthropic features were present in 8.5 ha, and secondary vegetation in 52 ha. This is indicative of an abandonment of the agricultural lands possibly due to a decrease in their productivity.

Cedar forests. Recognized as forests that were introduced as a result of reforestations in past decades, they show (Figure 2) a stable occupation, since both recovery and degradation processes appear to have occurred in a small surface; this is understandable, given the limited surface represented in the study area.

Broadleaf forests. Almost all of these soil occupations (holm oak and/or alder) underwent forest degradation processes. In the case of dense broadleaf forests, the most striking transitions that occurred on a surface of almost 30 ha were to fragmented forests (14.8 ha), largely due to intensive extraction processes. On the other hand, on the almost 64 ha of semi-dense forest, the main transitions were to fragmented forests, in almost 34 ha, and to secondary vegetation in 16 ha; this is suggestive of selective logging processes. Finally, the main transitions in almost 33 ha of fragmented forests were to a total tree loss, as more than 10 ha are now occupied by grasslands, and almost 14 ha are occupied by secondary vegetation.

Fir forests. For these forests, the tendency also seems to be toward degradation processes. Transitions from dense forests occurred in 84 ha, the most prominent being to semi-dense forests in almost 44 ha; this is suggestive of selective extraction processes; also worth mentioning are transitions to fragmented forests and secondary vegetation, in 16 and 13 ha, respectively. There were changes in 47 ha of semi-dense forests, notably to secondary vegetation, in nearly 21 ha, and to fragmented forests, in 17 ha, showing the same tendency as dense forests. Changes occurred in 78 ha of these, with an evident transition to secondary vegetation in almost 71 ha; this is understandable, given the high baseline degree of disturbance.

Pine forests. Pine forests represent those occupations in which the most numerous negative transition processes have occurred as a consequence of the exposure of the species of these communities to a larger number of disturbance factors. There was a transition of dense to semi-dense forests in 100 ha; this dynamic may be ascribed to a recurrent selective logging and, perhaps, to the effects of pests and diseases in large tree extensions; this suggests a need for sanitation cuts. The most active transitions occurred on a surface of 157 ha of originally semi-dense forests, of which 131 underwent changes to fragmented forests, indicating forest density reduction processes. Finally, a transition was observed

pues más de 10 ha ahora están ocupadas por pastizales y casi 14 ha por vegetación secundaria.

Bosques de oyamel. Para estos bosques, la tendencia también parece dirigida hacia procesos de deterioro. En bosques densos aparecieron transiciones en 84 ha, en las que la más acentuada correspondió hacia los bosques semidensos por casi 44 ha, lo cual supone procesos de extracción selectiva, aunque también son dignas de mención las que pasaron hacia bosques fragmentados y vegetación secundaria con 16 y 13 ha, respectivamente. En bosques semidensos hubo cambios en 47 ha, de los cuales destacan los dirigidos hacia vegetación secundaria con casi 21 ha, seguido de los cambios hacia bosques fragmentados con 17 ha, en donde se advierte la misma tendencia que en bosques densos. Para estos últimos hubo cambios en 78 ha, manifiestos en una evidente transición hacia la vegetación secundaria con casi 71 ha, lo cual es comprensible dado el grado de disturbio del que se parte.

Bosques de pino. Los bosques de pino representan las ocupaciones en las que se han verificado los más numerosos procesos de transición negativa debido a que las especies de estas comunidades están expuestas a más factores de disturbio. De los bosques densos, en 100 ha hubo una transición hacia bosques semidensos; esta dinámica es atribuible a una tala selectiva recurrente y, quizás, a los efectos que han tenido las plagas y enfermedades en grandes extensiones de arbolado, lo cual sugiere aplicar acciones de saneamiento forestal por derribo. En los bosques originalmente semidensos, se presentó la dinámica de transiciones más activa (en 157 ha), en la que la dirigida hacia bosques fragmentados fue la de mayor extensión, con 131 ha, lo cual refleja procesos de reducción de densidad forestal. Finalmente, para bosques fragmentados de origen se registraron 80 ha de transición, dirigidas hacia una nueva área no forestal, de ocupación agrícola, pastizales, vegetación secundaria o desprovista de vegetación.

Matriz de probabilidad de transición.

A partir de la matriz de transición, se elaboró una matriz de probabilidad de transición para determinar la posibilidad que presenta cada tipo de ocupación para preservar su estado actual (Cuadro 3).

Como se puede apreciar en el Cuadro 3, a partir de la probabilidad de transición para un periodo de 9 años, parece haber una estabilidad en el área de estudio, lo cual es comprensible dado el lapso relativamente corto, si se observa que los valores de la diagonal en la matriz son próximos a 1.00. A pesar de ello, se encontraron valores menores a 0.95 que representan un grupo de transiciones más dinámicas que el resto.

in 80 ha from fragmented forests to a new non-forest area with agricultural occupation, grasslands, secondary vegetation, or areas devoid of vegetation.

Transition probability matrix

Based on a transition matrix, a probability transition matrix was created to determine the likelihood that each type of occupation has of preserving its current status (Table 3).

As can be seen in Table 3, based on the transition probability for a 9-year period, the study area seems to be stable, which is understandable, given the relatively short length of the period, if we take into account that the values of the diagonal in the matrix are close to 1.00. However, we also find values under 0.95, representing a group of transitions that are more dynamic than the rest.

The data show that fragmented broadleaf forests have a stability likelihood of 92 %, but this occupation may have a transition to grasslands or secondary vegetation in each; in semi-dense broadleaf forests the stability likelihood is 94 %, though there is a 3 % probability that a transition to a fragmented forest may occur. The stability likelihood that the fragmented fir forests will remain within this category is 93 %; however, there is a 6 % likelihood that a transition to secondary vegetation may occur. Finally, this type of vegetation, located outside forest ranges, has a 6 % likelihood of transitioning to agricultural lands. The main transition likelihoods are found in occupations that are subject to degradation processes, as well as to the conversion opportunities associated to the owners of these areas (Ordóñez and Martínez, 2003).

Forest degradation and recovery processes

Overall, 884.61 ha (1.64 % of the total surface of the park) were estimated to have undergone some kind of transition process. Of this surface, forest degradation processes are shown to occur in 698.32 ha; forest recuperation processes may be observed in 28.9 ha, and 136.97 ha show changes that do not involve forest occupation.

Using the above information, the corresponding disturbance map for the main forest species was produced. For map visualization purposes, recovery categories were omitted, as they were hardly representative in terms of their expanse. Figure 3 shows a map of the degradation processes in pine forests.



Cuadro 3. Matriz de probabilidad de transición en ocupaciones de suelo según la tendencia 2000-2009.

	Agrícola	Agua	Cedro Denso	Cedro Fragmentado	Cedro Semidenso	Intervención antrópica	Latifoliado Denso	Latifoliado Fragmentado	Latifoliado Semidenso	Oyamel Denso	Oyamel Fragmentado	Oyamel Semidenso	Pastizal	Pino Denso	Pino Fragmentado	Pino Semidenso	Sin Vegetación	Vegetación Secundaria
Agrícola	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Agua	0.00	1.00	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	0.00
Cedro Denso	0.00	0.00	0.98	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Cedro Fragmentado	0.00	0.00	0.00	1.00	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	0.03	0.00	0.97	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
Intervención antrópica	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Latifoliado Denso	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.98	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Latifoliado Fragmentado	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
Latifoliado Semidenso	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.94	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Oyamel Denso	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Oyamel Fragmentado	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06
Oyamel Semidenso	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Pastizal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pino 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	0.98	0.00	0.01	0.00	0.00
Pino 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	0.01	0.00	0.98	0.00	0.00	0.00
Pino 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	0.02	0.98	0.00	0.00
Sin Vegetación	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	1.00	0.00
Vegetación Secundaria	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92

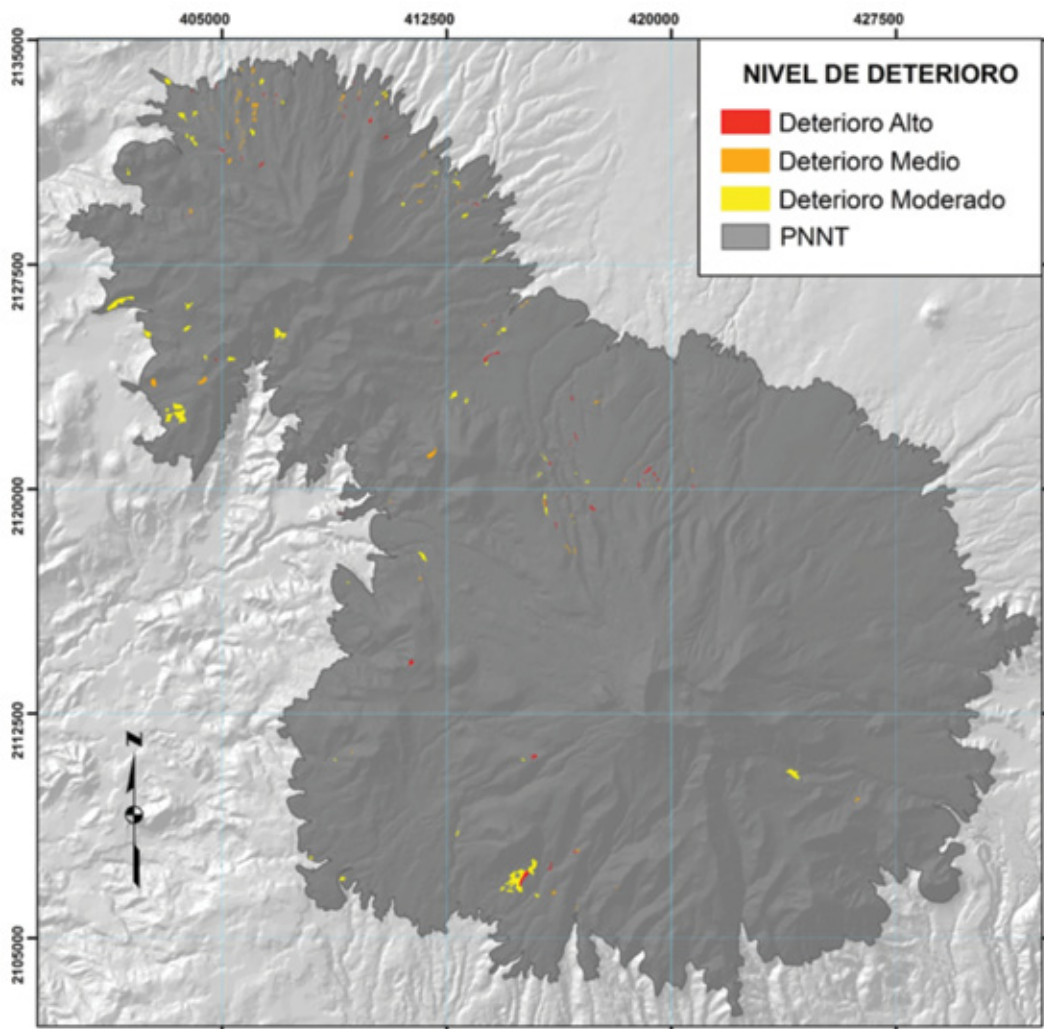
Table 3. Soil occupation transition probability matrix according to the 2000-2009 trend.

Agricultural	0.99	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	0.00	0.01
Water	0.00	1.00	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	0.00	0.00
Dense Cedar	0.00	0.00	0.98	0.00	0.01	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	0.01
Fragmented Cedar	0.00	0.00	0.00	1.00	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
Semi-dense Cedar	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.97	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
Anthropic Intervention	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	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
Dense Broadleaf	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.98	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Fragmented Broadleaf	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
Semi-dense Broadleaf	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Dense Fir	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fragmented Fir	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Semi-dense Fir	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Grassland	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Dense Pine	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fragmented Pine	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	0.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Semi-dense Pine	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	0.02	0.98	0.00	0.00	0.00	0.00
Devoid of Vegetation	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	0.98	0.00	0.00	0.00
Secondary Vegetation	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	1.00	0.00	0.00
	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92

Los datos indican que los bosques latifoliados fragmentados tienen una probabilidad de estabilidad de 92 %, pero es posible que dicha ocupación presente una transición hacia pastizales o vegetación secundaria en 3 % cada una; en los bosques latifoliados semidensos hay una probabilidad de estabilidad de 94 %, aunque existe otra de 3 % de que haya transición hacia un bosque fragmentado; en los oyametales fragmentados, la probabilidad de mantenerse en esa categoría es de 93 %; sin embargo, existe 6 % de posibilidad de que pase a una ocupación de vegetación secundaria; finalmente, este tipo de vegetación ubicada fuera de los macizos forestales, presentan una posibilidad de conversión en terrenos agrícolas en 6 %. Las probabilidades de transición más importantes se ubican en ocupaciones sujetas a procesos de deterioro y a las oportunidades de conversión que están asociadas a los propietarios de dichas áreas (Ordóñez y Martínez, 2003).

The pine forests underwent: a) degradation processes in 374.3 ha, b) a moderate degradation in 309.1 ha, with most changes occurring in the volcanic cone area, at 3 200 to 3 800 m of altitude, mainly toward the west, where there is more access by road; this is indicative of a selective, systematic extraction occurring illegally or as a consequence of sanitation processes against pests and diseases. Medium and high degradation (49 and 16 ha, respectively) are distributed in areas adjacent to those showing a moderate degradation. 4 ha show a moderate recovery as a result of natural regeneration or of the fencing-in of certain areas.

Tree disturbance-recovery dynamics in fir forests turned out to be very different (Figure 4).



Nivel de deterioro= degradation level; Deterioro alto = High degradation; Deterioro medio = Medium degradation; Deterioro moderado = Moderate degradation; Límite PNNT = PNNT boundaries.

Figura 3. Nivel de deterioro en bosques de pino en el PNNT en el periodo 2000-2009.

Figure 3. Degradation level in pine forests in the PNNT during the 2000-2009 period.

Procesos de deterioro-recuperación forestal

En general, se estimó que 884.61 ha (1.64 % del total del parque) presentan algún proceso de transición. De esa superficie, 698.32 ha muestran procesos de deterioro forestal, 28.9 ha de recuperación y 136.97 ha cambios en los cuales no está involucrada una ocupación forestal.

Con la información arriba mencionada, se generó la cartografía de perturbación correspondiente para las principales especies forestales. Para efectos de visualización cartográfica, se omitieron las categorías de recuperación en función de la poca representatividad de su extensión. La Figura 3 presenta el mapa de procesos de deterioro en bosques de pino.

En los bosques de pino se registraron: a) procesos de deterioro en 374.3 ha, b) deterioro de tipo moderado en 309.1 ha, en las que se advierten, principalmente, dichos cambios en la zona del cono volcánico, de los 3 200 a los 3 800 m de altitud principalmente hacia el poniente, donde el acceso por caminos es mayor, lo cual es indicativo de una extracción selectiva y sistemática, que ocurre ya sea de manera ilegal o derivada de procesos de saneamiento por plagas y enfermedades. El deterioro medio (49 ha) y alto (16 ha) se distribuyen en zonas contiguas a las de deterioro moderado. Se registraron 4 ha de recuperación moderada, producto de la regeneración natural o bien por el cercado de algunas áreas.

En los bosques de oyamel, la dinámica de perturbación-recuperación del arbolado resultó muy diferente (Figura. 4).

Los procesos de deterioro en el bosque de oyamel resultaron tener mucha menor extensión que los de pino, a pesar de que es la ocupación con mayor extensión dentro del PNNT. Las transiciones que suponen un proceso de deterioro suman 205.3 ha, de las cuales a las de deterioro moderado corresponden las de mayor extensión con 133 ha; en ella se diferencian dos áreas principales con una extensión considerable al suroeste del cono volcánico y al suroeste de la estructura volcánica de Peña Ahumada, que reflejan actividades de extracción selectiva. Por otra parte, las zonas de deterioro medio (26 ha) y alto (46 ha) se distribuyen en pequeños manchones, principalmente en los bordes de las poligonales. Cabe mencionar que se encontraron 9 ha con recuperación moderada, que representan dinámicas de regeneración natural.

Finalmente, los bosques de latifoliadas, que incluyen al encino (*Quercus laurina* Humb. et Bonpl.) y al aile (*Alnus jorullensis* HBK.), mostraron deterioro exclusivamente hacia la zona oriental del cono volcánico (Figura 5).

Degradation processes of fir forests turned out to cover a much smaller surface than those of pine forests, though the latter occupy the largest surface within the PNNT. Transitions involving a degradation process cover a 205.3 ha, of which 133 ha -the largest proportion- correspond to moderate degradation. This area includes two main differentiated zones, occupying a considerably large surface southwest of the volcanic cone and southwest of the Peña Ahumada volcanic structure, both of which reflect selective extraction activities. On the other hand, medium and high degradation areas (26 and 46 ha, respectively) are distributed in small patches, mainly on the edges of the two zones. It is worth noting that 9 ha showed moderate recovery, indicative of natural regeneration dynamics.

Finally, broadleaf forests, which include the holm oak (*Quercus laurina* Humb. et Bonpl.) and the alder (*Alnus jorullensis* HBK.), showed degradation exclusively toward the eastern side of the volcanic cone (Figure 5).

Degradation processes in broadleaf forests covered 107 ha, of which medium and moderate degradation (48 and 51 ha, respectively) occupy most of the surface. High degradation processes (involving total loss) occurred in 9 ha. Despite the limited surface covered by these occupations, degradation processes are dynamic because of the commercial value of the species; however, their regeneration capacity has brought about recovery in 14 ha.

Deforestation and loss of tree density

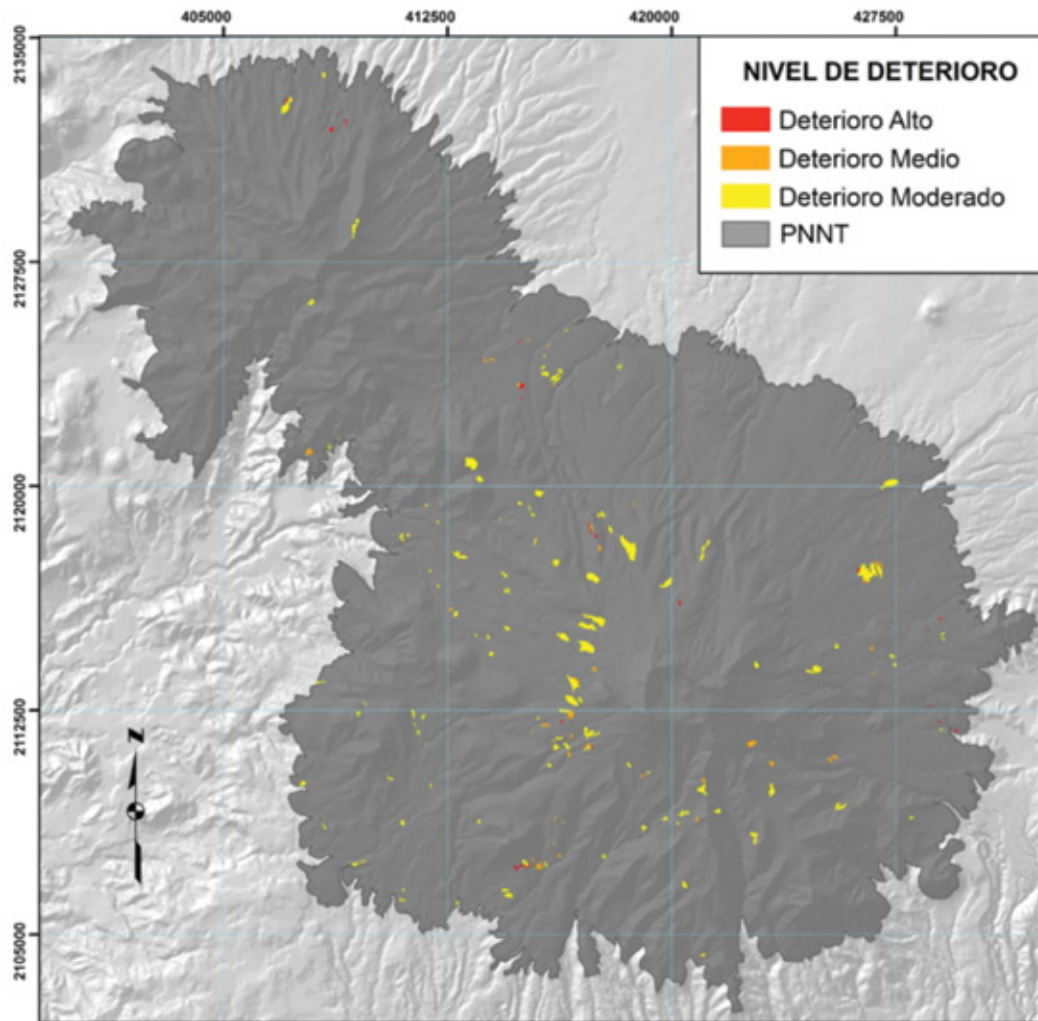
After analyzing the disturbance-recovery dynamics, the forest degradation processes, which cover 380.6 ha (55.5 %), were found to represent a loss of density, while deforestation processes occurred in 317.72 ha (45.5 %).

The deforestation rate for the studied period is 35 ha year⁻¹, while the reforestation rate is merely 3.01 ha year⁻¹.

Table 4 shows the proportion of deforested forests by species.

As can be seen in Table 4, fir forests have lost the largest forest surface -even more than pine forests- as a consequence of deforestation. As for the proportion that was lost in relation to the occupation in the year 2000, it is clear that the pressure was highest in the broadleaf forests, whose baseline surface decreased by 3.15 % in 9 years, particularly in the area located east of the PNNT, where the proximity of human populations to the timber-yielding resources has favored a widespread exploitation of this raw material for use as fuel (charcoal).





Nivel de deterioro- degradation level; Deterioro alto = High degradation; Deterioro medio = Medium degradation; Deterioro moderado = Moderate degradation; Límite PNNT = PNNT boundaries; metros = meters

Figura 4. Nivel de deterioro en bosques de oyamel en el PNNT en el periodo 2000-2009.

Figure 4. Degradation levels in fir forests in the PNNT during the 2000-2009 period.

Los procesos de deterioro en bosques de latifoliadas cubrieron 107 ha, de las cuales los de tipo medio (48 ha) y moderado (51 ha) ocupan la mayor parte en este rubro; los deterioros altos (de pérdida total) se dieron en 9 ha. A pesar de la limitada extensión de estas ocupaciones, los procesos de deterioro son dinámicos debido al valor comercial de las especies, pero, en contraste, su capacidad de regeneración ha provocado una recuperación en 14 ha.

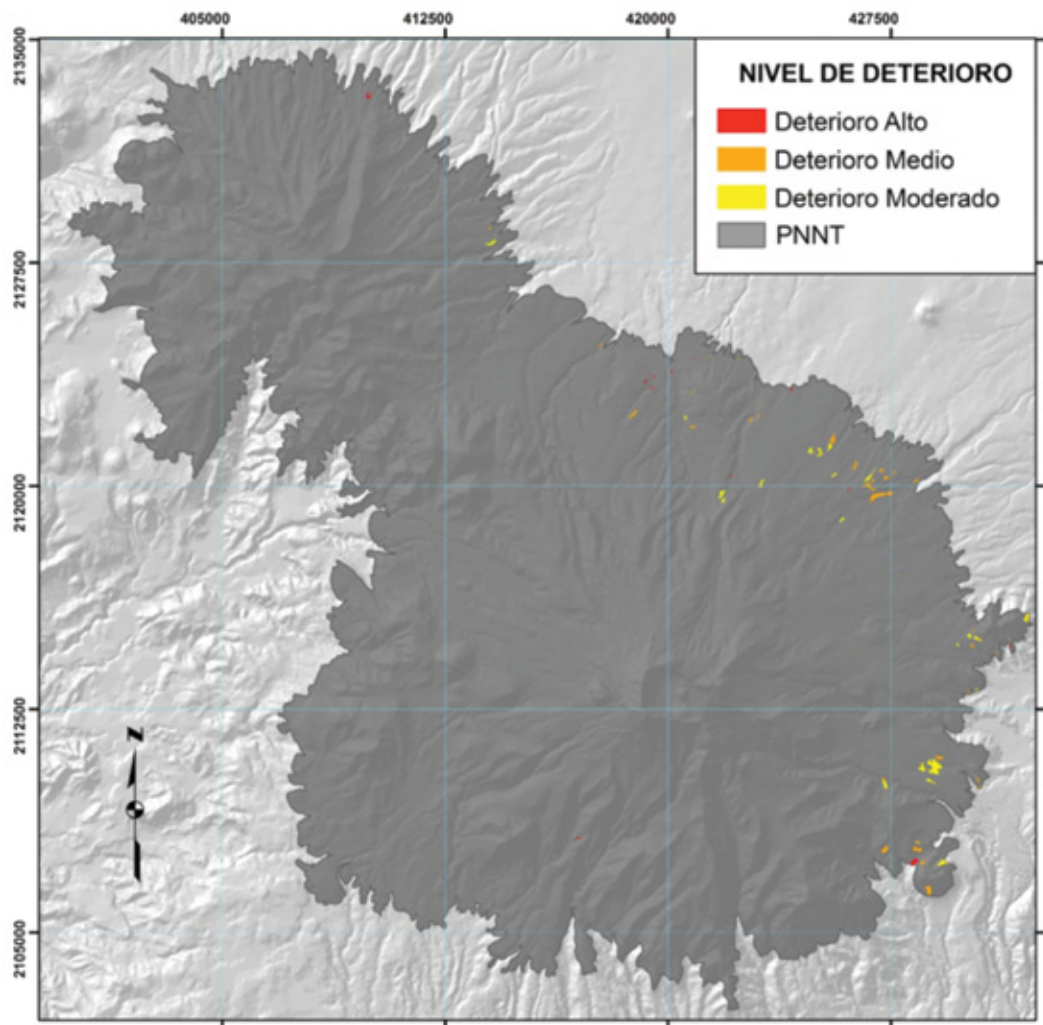
Deforestación y pérdida de densidad forestal

Después de haber analizado la dinámica de perturbación-recuperación, resultó que de los procesos de deterioro forestal, 380.6 ha (55.5 %) representan pérdida de densidad y en 317.72 ha (45.5 %) se observan procesos de deforestación.

Table 5 shows the forests where the tree density has decreased.

The dynamic of deforestation is very different from that of tree density reduction. While deforestation in pine and fir forests covers a similar extension, the affected surface of pine forests with tree density reduction is three times larger than that of fir forests; this situation confirms the presence of intense pressure due to illegal or sanitation-related selective logging, which cannot be detected by traditional remote sensing methods. The numerous roads and improvised trails have facilitated transportation of the extracted products.





Nivel de deterioro= degradation level; Deterioro alto = High degradation; Deterioro medio = Medium degradation; Deterioro moderado = Moderate degradation; Límite PNNT = PNNT boundaries; Metros = meters.

Figura 5. Nivel de deterioro en bosques de latifoliadas en el PNNT en el periodo 2000-2009.

Figure 5. Degradation level in broadleaf forests in the PNNT during the 2000-2009 period.

La tasa de deforestación para el periodo estudiado es de 35 ha año⁻¹, lo que contrasta con la tasa de reforestación que asciende apenas a 3.01 ha año⁻¹.

En el Cuadro 4 se muestra la proporción de bosques deforestados por especie.



Cuadro 4. Bosques deforestados por especie en el periodo 2000-2009.

Especie	Superficie deforestada (ha)	Proporción en cuanto a la deforestación total %	Proporción en cuanto a ocupación por especie %
Pino	122.59	38.58	0.91
Oyamel	130.04	40.93	0.88
Latifoliadas (aile y encino)	63.89	20.11	3.15
Cedro	1.21	0.38	0.47

Table 4. Deforested forests by species during the 2000-2009 period.

Species	Deforested surface (has)	Proportion in terms of total deforestation %	Proportion in terms of occupation by species %
Pine	122.59	38.58	0.91
Fir	130.04	40.93	0.88
Broadleaves (adler and holm oak)	63.89	20.11	3.15
Cedar	1.21	0.38	0.47

Como se puede observar en el Cuadro 4, los bosques de oyamel son los que mayor superficie forestal han perdido aún por encima de los pinares, derivado de procesos de deforestación. En cuanto a la proporción perdida respecto a la ocupación en 2000, resulta claro que los bosques con mayor presión son los de latifoliadas, ya que en 9 años su superficie original se redujo 3.15 %, en particular en la zona oriente del PNNT, donde la cercanía de las poblaciones humanas a los recursos maderables ha propiciado una explotación extendida de esta materia prima por su uso como combustible (carbón).

Los bosques que han disminuido su densidad de arbolado ordenan en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Bosques con pérdida de densidad arbórea por especie en el periodo 2000-2009.

Especie	Superficie disminuida (ha)	Proporción (%)
<i>Alnus jorullensis</i> HBK.	49.98	12.8
<i>Cupressus</i> sp.	1.98	0.5
<i>Quercus laurina</i> Humb. et Bonpl.	3.89	1.0
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham.	81.29	20.8
<i>Pinus</i> spp.	253.29	64.9

La dinámica de deforestación es muy diferente a la de disminución de densidad del arbolado. Si bien la primera para bosques de pino y oyamel cubre una extensión similar, en cuanto a la disminución parcial del arbolado, los bosques de pino triplican la superficie afectada con relación a los de oyamel, situación que corrobora una intensa presión por tala selectiva de manera ilegal o por saneamiento, misma que no se detecta por métodos tradicionales de percepción remota. Los numerosos caminos y veredas improvisadas han facilitado el transporte de los productos extraídos.

Table 5. Forests with loss of tree density by species during the 2000-2009 period.

Species	Reduced surface (has)	Proportion (%)
<i>Alnus jorullensis</i> HBK.	49.98	12.8
<i>Cupressus</i> sp.	1.98	0.5
<i>Quercus laurina</i> Humb. et Bonpl.	3.89	1.0
<i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. et Cham.	81.29	20.8
<i>Pinus</i> spp.	253.29	64.9

CONCLUSIONS

Pine forests are the occupations where disturbance processes show the highest dynamism, resulting in a marked deforestation; this manifests primarily as forest density reduction, since the affected surface covers three times that of fir forests. This may be the result of a complex organization of illegal selective extraction, as has historically occurred in the Nevado de Toluca National Park.

The adaptation of photointerpretation techniques within a carefully controlled vectorial environment made it possible to generate very precise geographical information, which is ideal for evaluating the change dynamics and the degree of forest disturbance even for periods of less than 10 years; this is an advantage compared to the use of other remote sensing techniques, such as the classification of satellite images that tend to produce significantly biased results because of spatial or spectral resolution issues that hinder the creation of short-term, high-precision transition maps. In this sense, deforestation and tree density loss, traced with great detail, were identified as a key input for proposing alternatives for the management, preservation and recovery of the natural resources of this major natural reserve.

End of the English version



CONCLUSIONES

Los bosques de pino son las ocupaciones en donde hay un mayor dinamismo en los procesos de perturbación, lo que se refleja en una marcada deforestación; su manifestación principal se observa en la disminución de la densidad forestal, pues presenta más del triple de la superficie afectada en comparación con los bosques de oyamel. Esto puede ser producto de una compleja organización de extracción selectiva de manera ilegal, como históricamente ha sucedido en el Parque Nacional Nevado de Toluca.

La adecuación de las técnicas de fotointerpretación bajo un ambiente vectorial cuidadosamente controlado permitieron la generación de información geográfica muy precisa, que es ideal para evaluar la dinámica de cambios y el grado de perturbación de los bosques incluso en periodos menores a 10 años; esto es una ventaja comparativa frente a otras técnicas de percepción remota como la clasificación de imágenes de satélite que suelen crear sesgos importantes en sus resultados por problemas de resolución espacial o espectral, lo que imposibilita la creación de cartografía de transición en periodos cortos y con precisión alta. En este sentido, se lograron identificar con nivel alto de detalle los problemas de deforestación y de pérdida de densidad del arbolado como insumo fundamental para plantear alternativas de gestión, conservación y recuperación de los recursos naturales de esta importante área natural protegida. 🌳



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. *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 44: 18-38.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (Cetenal). 1976. Instructivo para la Elaboración de la Carta de Uso del Suelo. Secretaría de Gobernación. México D.F. México. 46 p.
- Chuvieco, E. 2002. Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio. Ariel. Barcelona, España. 586 p.
- Dirzo, R. y O. Masera. 1996. Clasificación y dinámica de la vegetación en México. Centro de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. México. 56 p.
- Franco, S., H. Regil y J. Ordóñez. 2006. Dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca. *Madera y Bosques*, 12 (1): 17-28.
- Instituto de Investigación e Información Geográfica Estadística y Catastral del Estado de México (IIIGECEM). 2002. Ortofotos digitales del Estado de México escala 1:20000. Gobierno de Estado de México. Toluca, Edo. de Méx. México. pp. 61, 62, 63, 78, 79, 80, 81, 89, 90 y 91.
- Meyer, W. y B. Turner (eds.). 1994. Changes in land use and land cover: a global perspective. Papers arising from the 1991 OIES Global Change Institute. University of Cambridge. Cambridge UK. 380 p.
- 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. Madrid, España. 224 p.
- Rodríguez, B. y S. Franco. 2003. La identificación de servicios ambientales entre zonas urbanas y rurales: captura de carbono en el Parque Nacional Nevado de Toluca. In: Carreño, F. (comp.): Planeación del Territorio y Ambiente en América Latina, Tomo II. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Edo. de Méx. México. pp. 243-260.
- Rosete, F., J. Ordóñez y O. Masera. 1997. Dinámica de cambio de uso del suelo y emisiones de carbono en la meseta. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. México. 31 p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2005. Informe sobre la Situación del Medio Ambiente en México 2004. http://appl.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/introduccion/introduccion.html. (30 de octubre de 2012).

