

Capítulo 23. La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del inventario forestal nacional

José Luis Palacio-Prieto
Instituto de Geografía, UNAM

José López-García
Instituto de Geografía, UNAM

Gerardo Bocco
Instituto Nacional de Ecología, INE

Mardocheo Palma Muñoz
Instituto de Geografía, UNAM

Alejandro Velázquez
Instituto de Geografía, UNAM

Irma Trejo-Vázquez
Instituto de Geografía, UNAM

Jean-Francois Mas
Instituto de Geografía, UNAM

Armando Peralta Higuera
Instituto de Geografía, UNAM

Francisco Takaki-Takaki
Instituto Nacional de Estadística,
Geografía e Informática (INEGI)

Jorge Prado-Molina
Instituto de Geografía, UNAM

Arturo Victoria
Instituto Nacional de Estadística,
Geografía e Informática (INEGI)

Adriana Rodríguez-Aguilar
Instituto de Geografía, UNAM

Laura Luna-González
Instituto de Geografía, UNAM

Rafael Mayorga-Saucedo
Instituto de Geografía, UNAM

Gabriela Gómez-Rodríguez
Instituto de Geografía, UNAM

Francisco González Medrano
Instituto de Geografía, UNAM

Resumen

A partir de fines de 1999, la SEMARNAP decidió desarrollar la primera fase del inventario forestal nacional de México. A tal efecto, el Instituto de Geografía de la UNAM presentó en febrero de 2000 una propuesta técnica que fue adjudicada por la SEMARNAP. La propuesta del instituto de Geografía respondió al

interés de SEMARNAP de elaborar una estrategia que rebasara los alcances de los inventarios forestales tradicionales, e incorporara una perspectiva ecológica complementaria.

Se evaluaron 194 198 411 ha (1 941 984 km², porción continental del territorio nacional). De esta superficie, los “Matorrales” ocupan la mayor proporción con casi un 30%; Le siguen en orden descendiente de superficie los “Bosques”, “Cultivos”, “Pastizales” y “Selvas” con superficies entre 15 y 17% del total. Las otras tres formaciones ocupan en conjunto alrededor del 5% de la superficie total del país (véase gráfica más abajo).

Los resultados obtenidos se plasmaron en los siguientes productos:

- 121 mapas de cubierta vegetal y uso del suelo, a escala 1:250 000 y 121 espaciomapas, ambos en formato digital e impresos.
- Evaluación cuantitativa de la calidad de la cartografía mediante fotografía digital detallada.
- Datos de superficies y otras cubiertas a varios niveles de agregación.
- Diccionario de datos, glosario y metadatos.
- Pagina en la internet donde se presentan el informe, los anexos y los productos obtenidos.

Esta investigación permitirá a muy plazo hacer estimaciones confiables sobre las tasas de deforestación, ya que las categorías mapeadas son compatibles con los sistemas de clasificación de mayor uso en el país.

Current situation of forest resources in Mexico: results of the 2000 National Forest Inventory

Abstract

We describe the procedure and results of the land use and vegetation mapping at the national level (1:250 000 scale), as a first step of the Mexican National Forest Inventory 2000-2001. A geographic-ecologically-sound approach has been followed. The Project was sponsored by SEMARNAP (the Mexican ministry of the environment).

We developed a classification scheme for the mapping of vegetation and land-use, linked to a nested multi-level legend, so that it could be correlated with and compared to other mapping efforts at the national scale. The legend is hierarchical and includes the nomenclature for 4 aggregation levels: 8 formations

17 vegetation types, 47 communities, 28 sub-communities giving a total of 75 categories.

Results include 121 maps, 121 apace-images and corresponding metadata and dictionary structures. Area data for forest and other and covers were provided for the entire country, at state level, and at large watershed scale. Data are also presented in an ad hoc designed web page in the INTERNET.

Major cover clases and porcentaje área resuted shrubs (30%), temperature forests (17%) grasslands (16%), and tropica (dry and wet) forests (16%). Partial mean producer accuracy, for sic communities, using nearly 900 aerial photos, was 78. Accuracy calculation Will continue to assess all mapping units.

The data produced by this Project can be compared to previous data sets; thus, land-cover change in time is straightforward in addition, the data can be used as imput for biodiversity mapping estimation of environmental services provided by forest communities and potential for Wood harvesting.

Antecedentes

En México se han desarrollado múltiples esfuerzos de cartografía de uso del suelo, vegetación y temas relacionados, entre los que destacan el de Miranda y Hernández-X (1963), el del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), encargado de elaborar la cartografía en el tema comprendido en 121 mapas en escala 1:250 000 (en 1971 y años posteriores), Rzedowski (1978), el inventario forestal de gran visión con base en imágenes AVHRR (1991), el Inventario Nacional Forestal Periódico (1994), Dirzo y Masera (1996), y el Mapa de Vegetación utilizando también imágenes AVHRR (1999). Cada una de estas experiencias ha sido realizada para objetivos y con criterios diferentes, así como a escalas diversas (desde 1 :50 000 hasta 1 :8 millones).

Por la diversidad de enfoques, objetivos e insumos, las comparaciones se dificultan. Por ejemplo, en algunos casos, se enfatiza en la vegetación potencial. en otros, en la cobertura vegetal real del terreno. Esta actividad comparativa, sin embargo, es imprescindible para múltiples fines, entre los que destacan el análisis del cambio del uso del suelo y la priorización de políticas de manejo, conservación y restauración de los recursos naturales en general.

En este contexto, la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) encargó al Instituto de Geografía de la UNAM la formulación de la primera etapa (cartografía de la cobertura vegetal) del proyecto Inventario Forestal Nacional (IFN) 2000. La propuesta fue adjudicada en marzo

de 2000 y ejecutada por un equipo técnico estructurado de manera ad hoc en el Instituto de Geografía de la UNAM, en estrecha relación con el INEGI y personal técnico de la Dirección Forestal de SEMARNAP.

En este trabajo se formularon los criterios para cartografiar los recursos forestales en el contexto de la vegetación de México (entendida como la expresión evolutiva de aglomerados de especies en un lugar y a un tiempo determinado). Este marco conceptual debía, por un lado, ser compatible con las principales experiencias previas de cartografía de la vegetación, y por otro, ser expedito, para permitir el seguimiento de la vegetación en general a corto, mediano y largo plazos. Para tal fin se desarrollaron tres talleres donde se analizaron críticamente las contribuciones de las experiencias anteriores.

Objetivos

El objetivo central del trabajo fue la elaboración de la Cartografía Digital e impresa en escala 1:250 000, sus bases de datos y las estadísticas asociadas para el inventario forestal nacional 2000-2001. Este proyecto busca, además de la cartografía de los recursos maderables y no maderables, obtener información que sirva como base para otras gestiones ambientales, tales como el cambio de uso del suelo, la estrategia de conservación de áreas naturales protegidas, la formulación de regiones de alto riesgo y, en general, de apoyo a la gestión de los diversos programas federales y estatales, como, por ejemplo, del Instituto Nacional de Ecología (INE), los Programas de Desarrollo Regional Sustentable (PRODERS), la Comisión Nacional para el Estudio de la Biodiversidad (CONABIO) y la Comisión Nacional del Agua (CNA).

Marco conceptual

Un sistema jerárquico

Otro de los aspectos innovadores de la presente propuesta es que se trata de un sistema jerárquico (Figura 1) que permite cambiar del nivel micro (alta resolución) al macro (baja resolución). Este sistema de arreglo de la leyenda debe, además, ser compatible con la experiencia de INEGI, para facilitar las comparaciones. Esto permitirá resolver tres problemáticas: a) la tipificación de los ecosistemas a diversos niveles de resolución espacial; b) una organización jerárquica de la vegetación que incluya criterios definidos para cada nivel de agregación, y c)

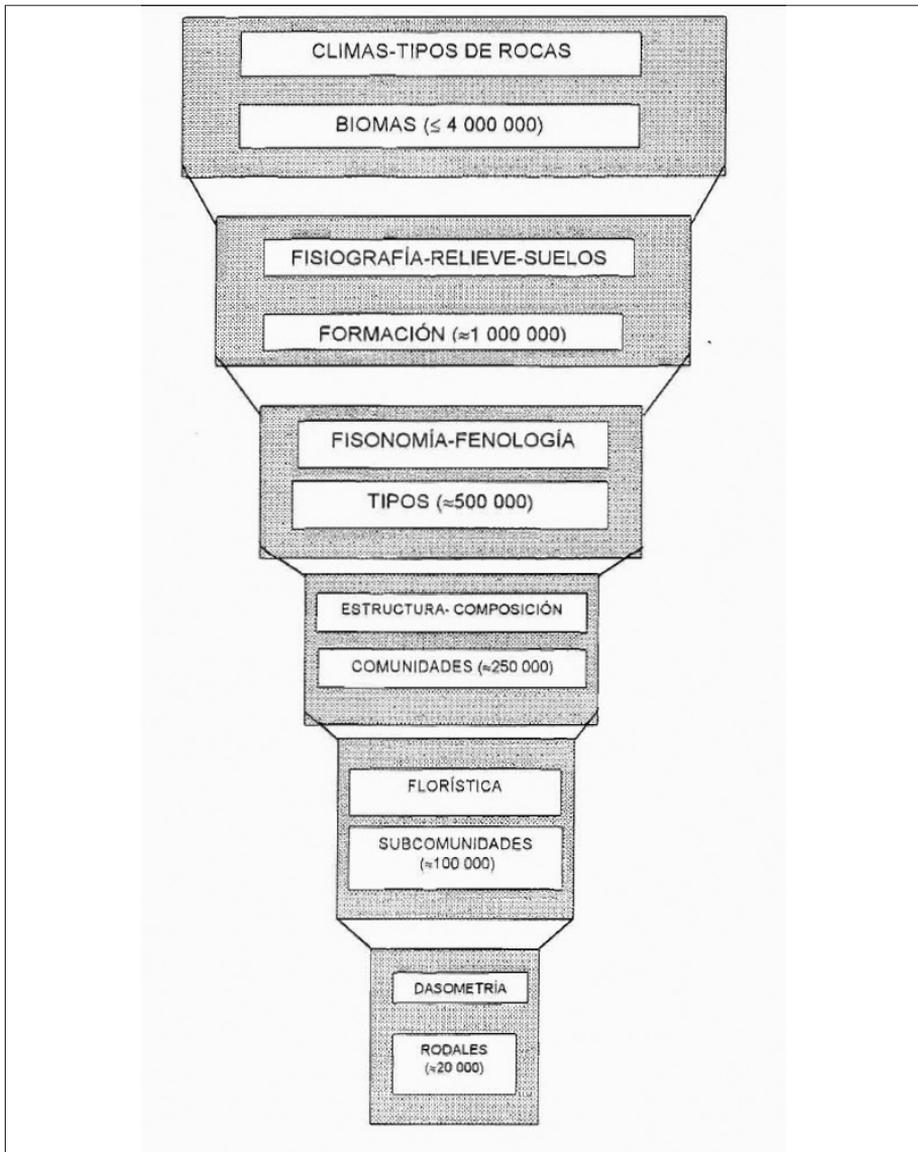


Figura 1 Sistema jerárquico conceptual utilizado para cartografiar la vegetación. Los cuadros superiores indican los criterios dominantes para definir las unidades de vegetación. Los cuadros inferiores indican el nivel de agregación posible y la escala aproximada para su representación cartográfica.

una representación objetiva de la dinámica de la vegetación por incluir clases en continua transformación.

El primer punto permitirá agregar a la leyenda una serie de atributos del medio físico (clima, geología, relieve y suelo) que caracterizan a cada una de las clases. Este aspecto se cubrió con una exhaustiva consulta bibliográfica de las fuentes de información disponibles (tales como la base de datos de plantas vasculares de CONABIO).

El segundo punto (el sistema de clasificación jerárquico expresado en una leyenda) busca identificar los atributos que mejor explican los patrones de vegetación a diversas escalas. De acuerdo con esta visión, a medida que se navegó a través de los diversos niveles de resolución espacial se buscó identificar el o los atributos que mayor relación guardan con los límites de los patrones de vegetación visualizados desde las imágenes que se utilizaron. La transformación de los diversos sistemas de clasificación de la vegetación en una leyenda que cubriera con las expectativas forestales y ambientales, por un lado, y el diseño jerárquico y dinámico por otro, fueron el principal reto académico del proyecto (Tabla 1).

Los criterios para la cartografía de la vegetación han seguido diversos enfoques, entre los que predomina el biológico (con elementos tales como la feno-

Tabla 1. Leyenda jerárquica utilizada en la cartografía del IFN 2000-2001

Formación	Tipo de vegetación y uso de suelo	Comunidad y otras coberturas
I. Cultivos	1. Agricultura (riego y humedad)	Agricultura de riego (incluye riego eventual) Riego suspendido Pastizal cultivado
	2. Agricultura (de temporal)	Agricultura de temporal
	3. Plantación forestal	Plantación forestal
II. Bosques	4. Coníferas	Bosque de táscate 2 3 Bosque de oyamel (incluye Ayarin y cedro) 2 3 Bosque de pino 2 3 Matorral de coníferas 2 3
	5. Coníferas latifoliadas	Bosque bajo-abierto 2 3 Bosque de pino-encino (incluye pino) 2 3
	6. Latifoliadas	Bosque de Encino 2 3
	7. Mesófilo de montaña	Bosque mesófilo de montaña 2 3

Tabla 1. Continúa.

Formación	Tipo de vegetación y uso de suelo	Comunidad y otras coberturas
III. Selvas	8. Perennifolia y subperennifolia	Selva alta y mediana perennifolia 2 3
		Selva baja perennifolia 2 3
		Selva alta y mediana subperennifolia 2 3
		Selva baja subperennifolia 2 3
9. Caducifolia y subcaducifolia	9. Caducifolia y subcaducifolia	Selva mediana caducifolia y subcaducifolia 2 3
		Selva baja caducifolia y subcaducifolia 2 3
		Matorral subtropical 2 3
		Selva baja espinosa 2 3
V. Pastisal	12. Pastizal	Pradera de alta montaña Pastizal natural (incluye pastizal huizachal) Sabana
VI. Vegetación hidrófila	13. Vegetación hidrófila	Manglar Popal-lular Vegetación de galería (incluye bosque y selva)
VII. Otros tipos de vegetación	14. Otros tipos de vegetación	Palmar Vegetación halófila y gipsófila Vegetación de dunas costeras
	15. Área sin vegetación aparente	Área sin vegetación aparente
VIII. Otras coberturas	16. Asentamiento humano	Asentamiento humano
	17. Cuerpo de agua	Cuerpo de agua

¹ Incluye dos categorías: con cultivos anuales, o con cultivos permanentes y semipermanentes.

² Incluye la vegetación primaria y la vegetación secundaria arbórea en una sola categoría.

³ Incluye a las comunidades con vegetación secundaria arbustiva y herbácea.

⁴ Se refiere a las comunidades de matorrales con vegetación primaria.

⁵ Incluye la vegetación secundaria derivada de la alteración de los matorrales.

logía, composición florística, estudios dasométricos, entre otros (Figura 3) Los enfoques geográficos, no obstante, representan el mismo objeto de estudio desde un enfoque espacial. En este trabajo, ambos enfoques se manejaron como com-

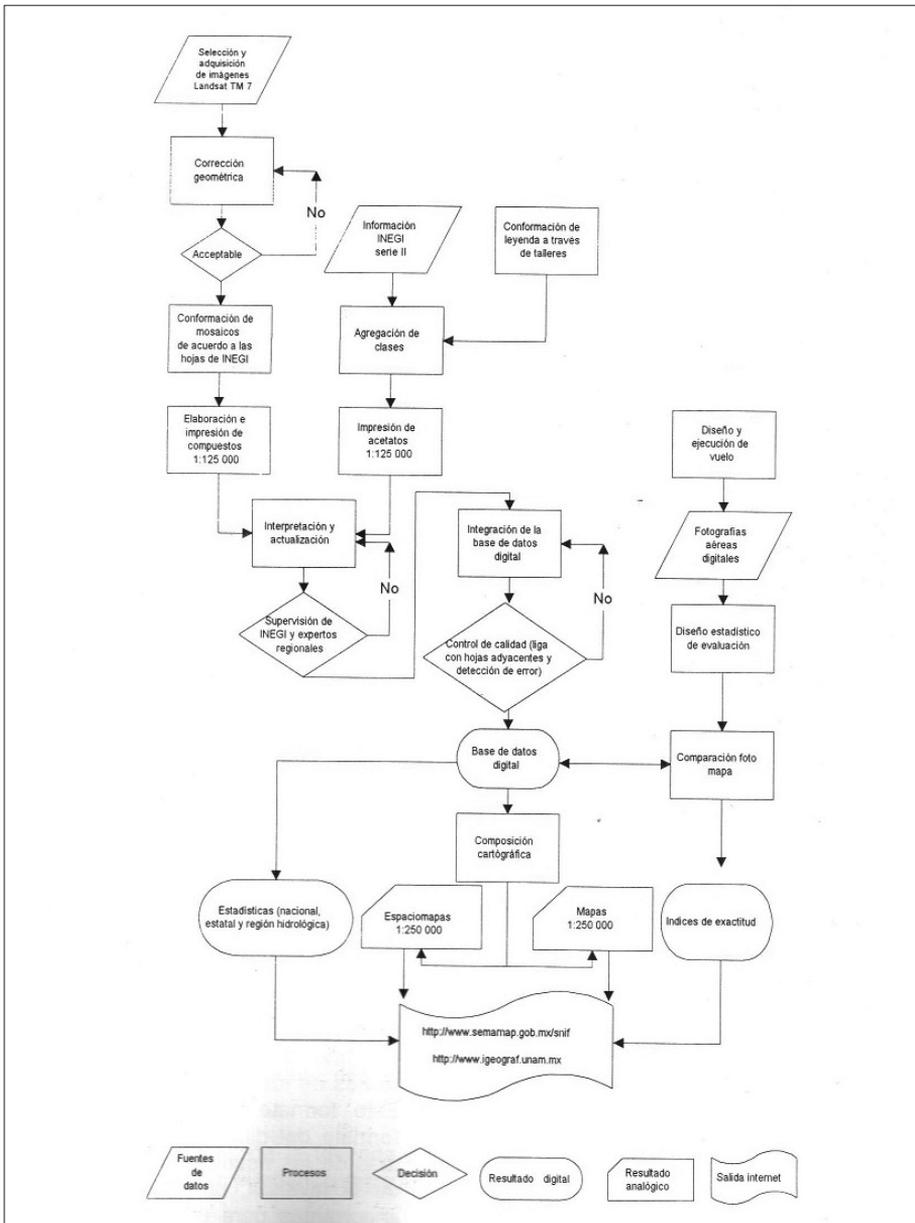


Figura 2. Diagrama de flujo que muestra los pasos metodológicos seguidos durante el proceso de generación del IFN 2000-2001

plementarios. Para tal fin se vincularon, a través de bases de datos digitales, las clases informativas existentes (INEGI) y las espectrales generadas durante este proyecto.

La fuente de información para tal fin provino de los trabajos de campo de INEGI ya que para detectar estas clases con vegetación secundaria se requiere de observaciones escala 1:1 en el campo. Vincular esta información de campo a las bases de datos espectrales en escala 1:250 000 representó una de las mayores dificultades del proyecto. Para resolver esto se contó con la supervisión por parte de intérpretes de INEGI y de expertos de cada región que, en su mayoría, participaron en la elaboración de la cartografía de los años setenta y participan actualmente en su actualización.

El desarrollo del proyecto abarcó ocho meses, desde su inicio formal en marzo de 2000 y su entrega final a fines de octubre del mismo año, y se desarrolló enteramente en el Instituto de Geografía de la UNAM, con la colaboración del INEGI y de técnicos de la Dirección Forestal de la SEMARNAP.

Métodos

El equipo de trabajo se integró con 60 participantes para las diferentes etapas de su desarrollo. Los sistemas de cómputo utilizados, sin que esto signifique un aval alguno a las marcas, fueron 11 estaciones de trabajo (6 SUN y 5 Silicon Graphics), 35 PCs Pentium111, 3 graficadores ("plotters") de alta resolución (600 a 1200 dpi). 5 tabletas de digitalización, 4 tri paquetes de ARC/INFO versión 8, varias licencias de PCI, y otros sistemas complementarios basados en computadora personal, tales como ILWIS y sistemas para el procesamiento de gráficos.

El proyecto inició con una amplia consulta entre los especialistas en cartografía de la vegetación y del recurso forestal de México. El primer paso fue el diseño de un modelo y leyenda cartográficos, con varios niveles de generalización, que satisficieran los requerimientos de los diferentes usuarios potenciales del producto. Asimismo, la cartografía de referencia debía servir de base para la segunda etapa del inventario, que permitirá, mediante intenso trabajo de campo, cuantificar el volumen maderable para su posterior aprovechamiento.

La segunda fase del proyecto, en paralelo con la anterior, consistió en la formulación del esquema técnico de interpretación usando datos actuales del último sensor de la familia Landsat (ETM 7), representación cartográfica, elaboración de la estructura de metadatos y diccionario de datos, y producción final,

en concordancia con los lineamientos proporcionados por el INEGI en cuanto a cartografía de la cobertura vegetal y uso del suelo.

Los pasos seguidos en la preparación de las imágenes satelitales para su interpretación visual fueron (Figura 2):

- a) Selección de imágenes Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper (ETM+). Dichas imágenes son distribuidas por la NASA a través del EROS Data Center. Los criterios de selección fueron los siguientes:
 - Imágenes calibradas y con un registro sistemático.
 - Fechas de noviembre 1999 a mayo 2000. Se dio preferencia a las más recientes
 - Ausencia de nubes y de ruido u otras imperfecciones.
- b) Registro. Se utilizaron puntos de control obtenidos de cartas topográficas INEGI a escala 150 000. El registro se hizo por el método del vecino más próximo y el grado del polinomio varia de imagen a imagen entre el primer y tercer grado. En caso de que una imagen cubriera más de una zona UTM se registró cada zona por separado. El error del registro fue, en todos los casos, de menos de una celda (30 m)
- c) Creación de mosaicos utilizando la geometría correspondiente a los mapas INEGI 1 :250 000.
- d) Creación de composiciones a color (la selección de bandas a ser combinadas fue una función de cada área específica, en consulta con intérpretes), incluyendo ecualización de histogramas y realce de bordes.

Para la interpretación visual se utilizaron impresiones de los compuestos a color a escala 1:125 000 en graficadores y papel ambos de muy alta calidad. El análisis de los patrones de las respuestas espectrales se complementó con los mapas digitales de vegetación y uso del suelo proporcionados por el INEGI (serie 11). Estos últimos datos (serie II) son producto de la actualización realizada por esta dependencia, a partir de mosaicos de imágenes Landsat TM 5, de 1992-1993.

Se optó por la interpretación visual de imágenes y no por la automatizada (supervisada o no) después de una revisión bibliográfica adhoc (Sader et al., 1990 y 1991), por la experiencia del grupo operativo, y por experiencias previas de los coordinadores (Mas y Ramírez, 1996; Palacio y Luna, 1995 y 1996).

Los pasos detallados de la interpretación fueron:

- a. evaluación de la respuesta espectral de los objetos sobre las imágenes;

- b. comparación de lo anterior con los datos proporcionados por los mapas digitales de INEGI (serie II), agregados a la leyenda de este inventario, e impresos en acetatos;
- c. utilización de criterios provenientes de fuentes complementarias (mapas de clima, suelo, relieve, etc., y publicaciones científicas);
- d. actualización de las unidades de INEGI mencionadas, mediante redefinición de contactos entre polígonos o reetiquetamiento;
- e. definición de la unidad mínima mapeable a comunidades vegetales de aproximadamente 1 km² en el terreno.

La interpretación fue supervisada, por región eco-geográfica, por expertos regionales de INEGI y de otras dependencias oficiales y académicas. Todo el proceso de elaboración de cada carta quedó asentado en una bitácora por carta, donde se registraron las características particulares de cada una de ellas.

Se prestó especial atención a las ligas entre hojas de INEGI, de tal manera que los extremos de cada mapa fueran coherentes con los de las hojas adyacentes. Asimismo, se realizó un control de calidad de la etiqueta de cada polígono tanto en formato analógico, así como a través de un programa de cómputo que permite detectar los polígonos vecinos no probables. Simultáneamente, se elaboraron espaciomaps (es decir, composiciones de imágenes satelitales a color, con referencia geográfica) acompañadas de la información topográfica básica y una leyenda simplificada de rasgos espectrales.

La generación de la base de datos estadísticos describe, mapa por mapa, las estadísticas de cada una de las clases analizadas a nivel nacional. También se generaron bases de datos parciales por entidad federativa y por región hidrológica, ya que estos aspectos son de alta prioridad para la SEMARNAP. Para asegurar la confiabilidad de las estadísticas calculadas, se implementaron diversos filtros de calidad de información durante cada una de las fases de producción.

El cálculo de las estadísticas derivadas de este proyecto se realizó con base en coberturas en proyección UTM. Enseguida, se establecieron los criterios de calidad indispensables para que los resultados pudieran ser evaluados en sus alcances, a las escalas definidas de interpretación (1:125 000) y representación (1:250 000). A tal fin, se diseñó una estrategia de muestreo para validar la interpretación basada en fotografía digital, adquirida especialmente para el ejercicio, que cubriera en forma significativa estadísticamente, toda la variabilidad de las categorías cartografiadas.

El modelo cartográfico seguido, tanto en lo geométrico (datum, elipsoide, proyección) como en lo temático, es el de INEGI. Se produjeron, así, 121 mapas,

que corresponden a sus similares de INEGI, escala 1:250 000. La selección de categorías, paleta de colores, etc., se realizó de manera automatizada mediante programas de computadora elaborados *ad hoc*.

Para asegurar la distribución oportuna de los productos generados, se diseñó una página en la INTERNET que presenta la información generada. La página electrónica permite acceder a un servidor y poder realizar consultas de los productos.

Resultados y análisis

Productos

A continuación, se describen los productos obtenidos:

- 121 espaciomapas 1:250 000, que corresponde a la estructura de INEGI para tal escala.
- 121 mapas a escala 1:250 000. 121 coberturas en formato vectorial de ARCIINFO.
- Una página diseñada especialmente para divulgar resultados dentro del Sistema Nacional de Información Forestal.
- Una página diseñada especialmente para divulgar resultados dentro del Sistema Nacional de Información Forestal.
- Cuatro tipos de metadatos: para las imágenes, para los espaciomapas, para los mapas y para las fotografías digitales existentes
- Diccionario de datos que describe las categorías cartografiadas a todos los niveles de agregación. Además, incluye las combinaciones autorizadas, las relaciones posibles, las dimensiones y notas de cada una de las categorías descritas.
- Glosario donde se describen las definiciones de los términos técnicos utilizados. Este formato es más amigable que el formato del diccionario; se incluyen, además de las definiciones de las categorías de la leyenda, otros conceptos técnicos importantes para una mejor comprensión del informe en general.

A nivel nacional se presentan estadísticas de las formaciones y tipos de vegetación. A nivel estatal y para cada región hidrológica se incluye además de los niveles anteriores la información a nivel de comunidad. El nivel jerárquico superior utilizado en este estudio comprende a las “Formaciones” y Otras Coberturas.

A este nivel se cuantificó la superficie de las ocho agrupaciones consideradas; los resultados se presentan en el Cuadro 1 y Figura 3 (el patrón de distribución de las diversas formaciones muestra un alto grado de fragmentación, principalmente en el centro y sur del país).

Los “Matorrales” cubren la mayor proporción con casi un 30%; los “Cultivos” con una superficie del *ci.* 24%; le siguen en orden descendiente de superficie los “Bosques”, y “Selvas” con superficies entre 15 y 17% del total. Los “Pastizales” cubren alrededor de un 10%. Las otras tres formaciones y otras coberturas cubren en su conjunto alrededor del cinco por ciento de la superficie total del país.

En un nivel jerárquico inferior se contemplaron los “Tipos de vegetación” agregados en cada “Formación”. La superficie (en hectáreas) de cada uno de los tipos de vegetación y otras coberturas se presenta en el Cuadro 2. El “Matorral xerófilo” cubre la mayor superficie (27%); le siguen las categorías de “Agricultura de temporal”, “Agricultura de riego y humedad”, “Selva caducifolia y subcaducifolia” y “Pastizal con superficies que van del 9 al 12% del total. El resto de los tipos y coberturas ocupan superficies menores al 7% del país.

El procedimiento y la leyenda utilizados en el inventario forestal nacional 1992.1994 arrojó datos de superficie que no permiten una comparación directa con los datos generados en el presente inventario. Las diferencias fundamentales son:

La estructura y categorías de la leyenda son diferentes por lo que no pueden compararse fácilmente (Tabla 2).

Cuadro 1. Superficie total y relativa de formaciones incluidas en el IFN 2000-2001

Formación	Superficie	
	ha	%
Cultivos	45 687 017	23.53
Bosques	32 850 691	16.92
Selvas	30 734 896	15.83
Matorral	55 451 788	28.55
Pastizal	18 847 355	9.71
Vegetación hidrófila	2 082 584	1.07
Otros tipos de vegetación	6 198 623	3.19
Otras coberturas	2 345 458	1.21
Total	1944 198 411	100.00

Cuadro 2. Superficie total y relativa de los tipos de vegetación y usos de suelo incluidas en el IFN 2000-2001

Tipo de vegetación y usos de suelo	Superficie	
	ha	%
Agricultura (riego y humedad)	22 824 688.53	11.75
Agricultura (de temporal)	22 839 710.01	11.75
Plantación forestal	22 638.52	11.75
Bosque de coníferas	7 488 419.38	3.88
Bosque de coníferas-latifoliadas	13 570 016.46	6.99
Bosque de latifoliadas	10 058 636.81	5.18
Bosque mesófilo de montaña	1 735 618	0.89
Selva perennifolia y subperennifolia	9 913 463.19	5.10
Selva caducifolia y subcaducifolia	20 821 432.57	10.72
Mezquital	2 924 511.80	1.51
Matorral xerófilo	52 527 276.00	27.05
Pastizal	18 847 354.68	9.71
Vegetación hidrófila	2 082 584.44	1.07
Otros tipos de vegetación	5 209 870.52	2.68
Área sin vegetación aparente	988 752.12	0.51
Asentamiento humano	1 245 813.06	0.64
Cuerpo de agua	1 099 644.56	0.57
Total	194 198 411.0	100.00

- El INF 1992-1994 incluyó los conceptos de coberturas abierta y cerrada que no fueron contempladas en el INF 2000-2001.
- Las categorías Bosque y Selva fragmentados del INF 1992-1994 no fueron incluidas en el INF 2000-2001; se prefirió, en cambio, manejar categorías de alteración, medidas a través de la presencia de vegetación secundaria, con base en INEGI.
- La categoría Áreas Forestales Perturbadas del IFN 1992-1994 incluye gran diversidad de clases de diversos orígenes, tales como matorrales, bosques, selvas, pastizales y áreas agrícolas. Esta categoría comprende alrededor del 12% de la superficie del país. Esta clase del IFN 1992-

Tabla 2. Correspondencia entre inventarios 1992-1994 y 2000-2001. Las diferencias metodológicas y conceptuales en ambos inventarios limitan seriamente las comparaciones, por lo que estos datos comparativos deben ser tomados con cautela.

INF 2000-2001	INF 1992-1994
FORMACION	ECOSISTEMA
BOSQUES	BOSQUES (Bosques y Bosque mesófilo menos (Plantación forestal y Bosque de galería)
SELVAS 30 734 896 ha (15.89%)	SELVAS (Selva alta y media y selva baja) menos (matorral subtropical) 19 672 420 ha (10.0%)
MATORRAL 55 451 788 ha(28.55%)	MATORRAL (Vegetación de zonas áridas menos matorral subtropical) 55 542 750 ha (28.2%)
VEGETACIÓN HIDRÓFILA (vegetación hidrófila menos Manglar y vegetación de galería) 1 072 933 ha(0.55%)	VEGETACIÓN HIDRÓFILA 1 115 203 ha(0.1%)
OTROS TIPOS DE VEGETACIÓN (otros tipos de vegetación menos vegetación de unas cortezas) 6 065 133 ha (3.1%)	PALMAR Y VEGETACIÓN HIDRÓFILA 3 149 989 ha (1.6%)

1994 no permite una comparación confiable con ninguna de las clases del IFN 2000-2001.

- El IFN 1992-1994 cartografió sobre imágenes de satélite el 72% de la superficie del país. El 28% restante fue tomado de la cartografía de INEGI. La cartografía de 1992-1994 es una combinación de información actualizada, proveniente de imágenes (clases forestales), y de información de INEGI (serie 1; clases no forestales). Este producto híbrido hace más complicado el proceso de comparación.

Existe, sin embargo, una correspondencia entre algunas de las categorías que pueden ser comparadas, tales como bosques y matorrales. Esto se debe al uso en

ambos casos de datos provenientes de INEGI como material de referencia y al uso de estrategias similares de interpretación. No es el caso de las selvas, que parecen incrementarse en un porcentaje considerable (4.7%). Lo que probablemente ocurre es que, en el inventario anterior, la categoría selva fue concebida y por lo tanto cartografiada como una clase diferente a la selva en el presente inventario. Suponemos que importantes superficies correspondientes a matorral subtropical y áreas forestales perturbadas en el INF 1992-1994 fueron consideradas como selva en el INF 2000-2001.

La cobertura vegetal en México y otros países intertropicales

En este apartado, se analizan sintéticamente los resultados obtenidos en este ejercicio, en relación con datos análogos de algunos países que, bien por su extensión, o bien por otras características socioambientales, pueden compararse con México (República Democrática del Congo, en África; India e Indonesia, en Asia; y Colombia, Brasil y Argentina, en América Latina; Cuadros 3 y 4).

Como puede apreciarse, en primer lugar, hay una diferencia entre el dato reportado por la FAO para bosques y selvas en México (29%) y el dato reportado por este trabajo (33%). Esto representa una superficie de 77 679 km². En segundo lugar, la superficie forestal relativa de México sólo es superior a la de India y Argentina, aunque el área *per capita* sólo es superior a India. Estas comparaciones confirman las tendencias señaladas en los antecedentes de este trabajo en donde diversas categorías a nivel de comunidad se encuentran ocupando superficies menores al uno por ciento del territorio nacional (Cuadro 5).

Cuadro 3. Datos básicos de países intertropicales

País	Superficie (km ²)	Población 1997 (millones)	Densidad (hab./km ²)	Población rural 1997 (%)
Congo	2,267.050	48.0	21.2	70.7
India	2,973.190	960.2	323.0	72.6
Indonesia	1,811.570	203.5	112.3	62.7
Colombia	1,038.700	37.1	35.7	26.5
Brasil	8,456	163.2	19.3	20.5
Argentina	2,736.690	35.7	13.0	11.4
México	1,908.690	94.3	49.4	26.2

Fuente: FAO. 1999.

Cuadro 4. Superficie forestal de países intertropicales

País	Superficie forestal total 1995			
	Superficie (km ²)	% del área total	Área per capita	Veg. natural (km ²)
Congo	1,092.450	48.2	2.5	1.092.030
India	650,050	21.9	0.0	503,850
Indonesia	1,097.910	60.6	0.6	1,036.660
Colombia	529,880	51.0	1.5	528,620
Brasil	5,511.390	65.2	3.4	5,462.390
Argentina	339,420	12.4	1.0	552.780
México	553,870	29.0	0.6	552.780

La cobertura vegetal en las regiones hidrológicas de México

En la Figura 4 se ordenan las regiones hidrológicas de acuerdo con un índice de antropización. Este índice agregó todas las coberturas a nivel de formación en dos categorías: “Natural” y “Antrópica”. En la categoría “Natural” se incluyó la

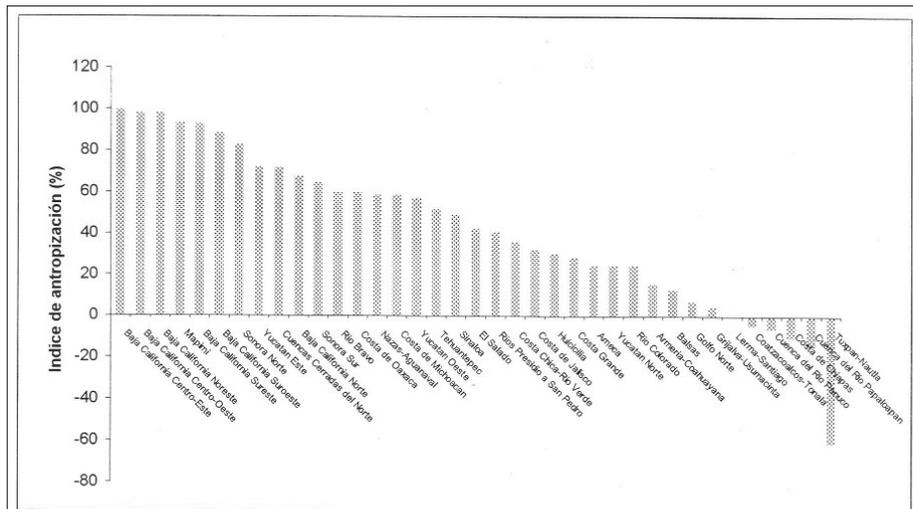


Figura 4. La gráfica presenta un arreglo de las regiones hidrológicas (propuestas por la SEMARNAP) con base en un índice de antropización de la cobertura vegetal generado.

Figura 4. La gráfica presenta un arreglo de las regiones hidrológicas (propuestas por la SEMARNAP)

formación “Bosques”, “Selvas”, “Matorral”, “Vegetación hidrófila”, “Otros tipos de vegetación” y de la formación “Pastizal” las comunidades “Pradera de alta montaña”, “Pastizal natural” y “Sabana”. La categoría antrópica agrupó la formación “Cultivos”, la comunidad “Pastizal cultivado”, la comunidad “Pastizal inducido” y el uso de suelo “Asentamiento humano” (Tabla 1). La diferencia en superficie entre estas dos categorías representa el grado de antropización de cada una de las regiones hidrológicas. Las regiones hidrológicas de mejor situación son las de Baja California (centro-este; centro-este y noreste), mientras que las que muestran mayor grado de actividad antrópica son Tuxpan-Nautla y Cuenca del río Papaloapan.

Uso potencial de los resultados

Los resultados obtenidos en este trabajo pueden utilizarse en varios temas ecológico-ambientales

- *Biodiversidad*

La acelerada pérdida de la vegetación primaria lleva consigo la pérdida de los diversos componentes de la biodiversidad. Los resultados generados en el presente trabajo proporcionan una base de datos de gran utilidad para las tareas de manejo y conservación de la biodiversidad. Entre esto se destacan tres líneas de trabajo: la identificación de áreas de alta heterogeneidad (diversidad Beta), la condición de las diversas áreas protegidas del país, y la vinculación entre las diversas bases de datos existentes y entidades geográficas.

El primer resultado de este inventario muestra un sistema jerárquico de agregación de la vegetación que permite elaborar cuatro modelos en forma rápida. El primer modelo cartográfico, a nivel de formación (escalas entre 1:8 000 000 y 1:4 000 000), permitirá visualizar la heterogeneidad a nivel país y comparar la proporción de coberturas de origen antrópico con las coberturas naturales. Se pueden, asimismo, hacer comparaciones con la situación de otros países y ubicar a México dentro el contexto mundial.

El segundo modelo, a nivel de tipo de vegetación (escalas entre 1:1 000 000 y 1:500 000), aporta elementos para la planeación a nivel estatal, la regionalización y la búsqueda de entidades ecológicas. Adicionalmente se pueden generar evaluaciones rápidas sobre la distribución de la biodiversidad y los frentes de cambio de uso de suelo.

El tercer mapa, a nivel de comunidad (escalas entre 1:250 000 y 1:125 000) muestra la complejidad para el manejo de diversas regiones a nivel de grupo de municipios (región económica). S6 podrán generar políticas de manejo y conservación de la biodiversidad con base en índices de heterogeneidad municipal y planes conjuntos con municipios vecinos que comparten comunidades y problemáticas afines.

El último mapa (escala 1:100 000) permitirá identificar áreas de alta biodiversidad con alto grado de fragmentación. Con esta información se tendría la base para la elaboración de planes de manejo regional para modelos de aprovechamiento y conservación en municipios, comunidades, ejidos y otras organizaciones sociales.

Con base en un índice de antropización de la cobertura vegetal generado.

• *Recurso hídrico, equilibrio en cuencas hidrológicas y erosión/conservación de suelos*

La relación entre equilibrio en cuencas hidrológicas y cobertura vegetal del terreno ha sido establecida claramente hace muchos años. El papel de la cobertura en el balance hídrico está bien comprendido en términos conceptuales. Existen numerosas evidencias empíricas en diferentes regiones ecológicas de las consecuencias negativas (directas e indirectas) causadas por la remoción de la cubierta vegetal de una cuenca vertiente.

En forma análoga, la relación entre cobertura vegetal y erosión/conservación de suelos ha sido estudiada en forma detallada durante al menos 70 años. Su papel, asimismo, está bien entendido en términos conceptuales. La cobertura del terreno es uno de los factores que integra la ecuación universal de pérdida de suelos (el así denominado factor C). Las investigaciones experimentales en el tema indican que el factor cobertura es clave en las predicciones de pérdidas de suelos por unidad de área y tiempo.

Los datos de cobertura proporcionados por el presente trabajo permitirán precisar las relaciones establecidas más arriba, a dependencias tales como la Dirección General de Conservación de Suelos. El factor cobertura es esencial en los modelos de predicción de erosión y en los cálculos de obras de conservación.

El disponer de estos datos a nivel general y regional, así como a nivel de cuencas, permite describir, explicar y predecir los patrones de erosión laminar y en cárcavas, y estimar la producción de sedimentos y la tasa de depositación en niveles de base locales y regionales. Asimismo, estos datos ofrecen la posibilidad

de establecer escenarios de simulación para pérdidas de suelos y para consecuencias catastróficas de eventos extraordinarios.

- *Riesgos naturales*

En las estadísticas mundiales y de nuestro medio, se reflejan tanto la agudización del riesgo natural (propensión) como el incremento en la ocurrencia (frecuencia y magnitud) de fenómenos catastróficos (eventos). La cobertura vegetal y los cambios en el tiempo de la misma desempeñan un papel fundamental en ambos procesos. Particularmente, los riesgos y procesos influidos por la cobertura son aquéllos desencadenados por eventos hidrometeorológicos extraordinarios, es decir, de alta magnitud pero de relativamente baja frecuencia.

La cobertura vegetal, particularmente la cobertura forestal, actúa como elemento protector de las laderas frente a dichos eventos extraordinarios, cuya dinámica es influida por la interferencia antrópica en los patrones de cambio global. La cobertura vegetal actúa de la siguiente manera:

Directa (eventos)

protección de laderas frente al impacto directo de las tormentas; incremento de la estabilidad de laderas y taludes; disminución del escurrimiento y capacidad erosiva de flujos.

Indirecta (riesgos)

Prevención de la remoción y depositación en masa; disminución de la amenaza a vidas, bienes e infraestructura; disminución de la amenaza al desarrollo social y económico de comunidades.

Así como en los casos anteriores, los datos proporcionados por este trabajo contribuyen a definir cuáles son las zonas susceptibles de sufrir altos niveles de afectación por efectos de eventos extraordinarios. Esta información es vital para dependencias tales como el Centro Nacional para Prevención de los Desastres (CENAPRED).

El componente cobertura es clave en los modelos de predicción de desastres. La disponibilidad de datos cuantitativos confiables permite incrementar la capacidad del estado y de las comunidades en la prevención de desastres y en la mitigación de sus consecuencias.

- *Análisis del cambio en la cobertura y uso del suelo y fragmentación*

Uno de los indicadores más importantes, a nivel mundial y en nuestro medio, de un desarrollo balanceado con la conservación de los recursos naturales, es la cuantificación del cambio en la cobertura y uso del suelo. La cuantificación del

cambio resulta de la diferencia, mediante sobreposición cartográfica, entre los mapas de cobertura de una fecha base y de una fecha a comparar. De ello resulta una matriz de transición, con un valor de cada clase que ha cambiado (más dinámicas), y una indicación de aquellas clases que no han cambiado (más estables). También se deriva una evaluación de clases de cobertura y uso atractoras de territorio de otras clases, y clases de cobertura que ceden territorio a otras clases.

Estos resultados ofrecen una visión sinóptica de cambios en el territorio, que tienen repercusiones ambientales y socioeconómicas. Un ejemplo de esto son los estudios de la deforestación, un caso particular del análisis del cambio de cobertura vegetal.

La deforestación es un proceso cuyo desarrollo se ha acelerado en regiones intertropicales, a favor de políticas de incremento la productividad económica (usos maderables), pero no del desarrollo integral, o bien, por falta de control en la implementación de políticas correctas.

• *Cambio global y captura de carbono*

El cambio drástico de áreas perturbadas por áreas totalmente antropizadas, aunado al incremento del CO₂ en la atmósfera producto de la actividad humana, ha sido considerado como la mayor causa de pérdida del germoplasma a nivel global. Desde esta perspectiva, la conservación y restauración de la cobertura vegetal primaria y las diversas fases sucesionales son prioritarias para asegurar aspectos esenciales de la calidad de vida del hombre.

La dinámica del cambio de uso del suelo permitirá conocer las tendencias hacia qué tipo de vegetación es substituido por qué tipo y, por lo tanto, qué implicaciones tiene esto en el CO₂ existente. Con la información adicional de las tasas de incremento anual por especie característica de cada una de las comunidades de vegetación se podría calcular el total de CO₂ que potencialmente se puede capturar por tipo. Esto, multiplicado por la superficie que ocupa cada comunidad, se podría traducir en el total de toneladas de CO₂ que se capturan por año. Se estima que por cada tonelada de CO₂, capturado se pagan \$10.00 (diez dólares americanos), por lo que el valor económico de estas llamadas trampas de carbono se calcula, consecuentemente, al multiplicar el número de toneladas potencial esa capturar por el número de hectáreas disponibles para cada categoría.

El impacto que ejerce el cambio de uso de suelo en los patrones climáticos aún necesita ser evaluado y desarrollado, así como la información complementaria necesita ser generada a través de futuras investigaciones, pero el insumo básico ya se encuentra disponible para todo el país en formato digital.

Conclusiones

El uso de la percepción remota coloca al usuario en la necesidad de clasificar, no objetos naturales, como ocurre durante el trabajo de campo, sino objetos espectrales (es decir, caracterizados por su respuesta espectral en las bandas que el sensor detecta; Anderson *et al.*, 1976). Esta limitación determina la capacidad de discriminación de clases informativas (es decir, congruentes para su uso en la toma de decisiones) y debe ser compensada por la posibilidad de mapear grandes zonas (capacidad sinóptica de los sensores, sean fotos o imágenes).

Este trabajo indica que es posible fusionar un enfoque espectral de interpretación (cartografía de vegetación usando imágenes de satélite, con resolución de 30 m en el terreno), con datos preexistentes obtenidos mediante fotointerpretación, interpretación de imágenes de satélite, e intensa verificación de campo (datos proporcionados en formato digital por INEGI, serie II de cartografía de uso del suelo y vegetación).

De esta manera, y siempre y cuando los intérpretes tengan buena experiencia de campo, una estrategia de mapeo puede beneficiarse de los dos componentes mencionados en el párrafo anterior. En cuanto a la interpretación de imágenes, el haber optado por un esquema de trabajo visual (y no automatizado, supervisado o no), a partir de las sugerencias bibliográficas (Batista y Tucker, 1991; Sader *et al.*, 1990, 1991) permitió incorporar toda la experiencia de los intérpretes, y no invertir el tiempo en tratamientos automatizados que luego deben editarse de manera pormenorizada.

Perspectivas

De este estudio se deriva la necesidad de actualizar y monitorear en forma permanente la cobertura vegetal. La realización de inventarios en tiempos del orden de los meses es complicado y arriesgado, considerando la diversidad de condiciones que caracterizan a México. Otros países (tales como Canadá, Japón, Costa Rica) cuentan con parcelas permanentes de monitoreo y un sistema de almacenamiento de la información que se va generando de manera local y periódica. Los inventarios forestales en estos países, por lo tanto, consisten en un ejercicio de actualización continuo. Esto se favorece, por un lado, al contar con información actualizada, y por el otro, con la capacidad de generar información expedita. De esta forma se puede alimentar un sistema de información geográfica que apoye las tareas de toma de decisiones.

Otra tarea que resulta necesaria es la generación de una estrategia nacional para poder vincular la información existente de la base de datos resultante de este ejercicio. La información generada y existente en, por ejemplo, CONABIO y la mayoría de las universidades, fue parcialmente incorporada. La razón principal que limitó este esfuerzo fue el tiempo para la realización del proyecto. Esto nos obligó a contar exclusivamente con la información cartográfica de INEGI.

En otras condiciones, el haber contado con la información de campo de INEGI, CONABIO y otras fuentes de información nos hubiera permitido incrementar de manera substancial la exactitud y haber generado un mecanismo de integración de datos puntuales (observaciones de campo) con entidades cartográficas. Estos aspectos deben ser retomados para integrar los resultados de esfuerzos desvinculados por el momento, y que podrían aportar criterios y argumentos relevantes para la definición de políticas.

Por otro lado, está pendiente la cartografía de formas del relieve, a diferentes escalas, de tal manera que pueda ligarse a la cartografía de suelos y aptitud de uso, por un lado, y de vegetación, por el otro. Este instrumento sería de gran utilidad para tareas de evaluación de aptitud, conflictos de uso, y planificación del medio físico, todos ellos insumos críticos del ordenamiento ecológico.

Otro resultado relevante de este proyecto es el trabajo conjunto de más de 60 especialistas, de diversas disciplinas (geógrafos, biólogos, agrónomos, ingenieros forestales, ingenieros en computación, entre otros), en un grupo solo operativo, funcionando en el Instituto de Geografía de la UNAM. Asimismo, es destacable el enorme esfuerzo interinstitucional (SEMARNAP-INEGI-UNAM) en la definición de metas, objetivos, estrategia y ejecución del proyecto de manera exitosa en un lapso menor al año.

Las bases de datos espaciales (mapas y espaciomapas) y estadísticas, así como la página en la Internet conforman un acervo importante acerca de la información sobre recursos naturales del país. Se trata ahora de utilizar la información para enriquecer procesos analíticos tanto a nivel gobierno como de los sectores académico, privado y social.

Un aspecto que será de gran relevancia es, sin duda, el de las tendencias en los cambios en el uso del suelo y su relación con las políticas ambientales. Al poderse detectar las zonas de mayor conflicto por cambio, asimismo, se podrá retroalimentar el esquema de monitoreo de la vegetación mencionado más arriba. Se espera que este trabajo sirva como punto de partida para ulteriores inventarios del recurso forestal en un contexto ecológico, incluyendo el análisis de cambio de uso del suelo a nivel nacional. El desafío para el futuro será generar una estrategia de monitoreo que permita actualizar de manera eficiente las categorías

mapeadas y cuantificadas en este estudio, de tal forma de distribuir los esfuerzos analíticos a lo largo del tiempo, así como de disponer en forma oportuna de los datos necesarios para apoyar la formulación de políticas y la gestión en el ámbito del recurso forestal de México.

Los costos del proyecto estuvieron muy por debajo de las estimaciones en Estados Unidos, donde la hectárea mapeada para temas forestales cuesta entre 30 y 40 centavos de dólar americano (Franklin et al., 2000). Esta diferencia se explica por la participación de la UNAM y de INEGI. Esto garantizó un presupuesto moderado, y un nivel de calidad que difícilmente pueda ser proporcionado por consultores foráneos.

De manera paralela a las tareas del INF 2000-2001 se dio inicio a la evaluación de calidad cartográfica producida. Para esto se realizó un planteamiento que incluye la toma de 70 000 fotografías digitales, a lo largo de transectos que cubren todo el territorio nacional. Este procedimiento de evaluación cartográfica es fundamental para dar una interpretación adecuada a los datos estadísticos obtenidos. Esta parte del proyecto aún está en proceso y los resultados se describirán en un artículo futuro.

Agradecimientos

Este artículo se deriva del proyecto Inventario Nacional Forestal 2000-2001, financiado por la SEMARNAP. Agradecemos el apoyo recibido por parte del Dr. Jorge Delvalle, Subsecretario de Recursos Naturales, del Dr. Fernando Tudela, Coordinador de Asesores, del Dr. Anthony Challenger y de la M. en C. Magdalena García Rendón, todos ellos de la SEMARNAP, y otros colaboradores de dicha Secretaría. Recibamos la colaboración durante todas las etapas de elaboración durante todas las etapas de elaboración del proyecto de la Dirección General de Geografía del INEGI. Los autores expresan su gratitud al personal técnico participante. En particular agradecemos el apoyo de la M. en C. Julia Carabias, titular de la SEMARNAP, y a al Lic Guadalupe López, Directora de Geografía del INEGI.

Referencias

Anderson, J., E. Hardy, J. Roach y R. Witmei (1976), "A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. United States", *Geological Survey Professional paper 964*.

- Batista, G. y C. Tucker (1991), "Accuracy of digital classification versus visual interpretation of deforestation in the Amazon", *Proceedings of the 6th SELPER Symposium*.
- Dirzo, R. y O. Masera (1996) Clasificación y Dinámica de la Vegetación en México, en *SEMARNAP. Criterios y terminología para analizar la deforestación en México, México*.
- FAO (Food and Agriculture Organization; 1995), Forest resources 1990, FAO, Roma
- Fao (1999), *Situación de los bosques del mundo* FAO, Roma
- Franklin, J., C. Woodcock y R. Warbington (2000). "Multi-attribute vegetation maps of forest service lands in California supporting resource management decisions", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(10):1209-1217.
- Gardner-Outlaw, T. y R. Engelman (1999), "Forest futures. Population, consumption and wood resources", *Population Action International*.
- Mas, J. e I. Rarnirez (1996), "Cornparison of land use classifications obtained by visual interpretation and digital processing", *ITC-Journa* (3/4): 278-283.
- Masera, O. (1996), *Desforestación y degradación forestal en México*, Grupo interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiaada, GIRA, Pátzcuaro.
- Miranda, F. y E. Hernández-Xolocotzi (1963), "Los tipos de vegetación de México y su clasificación", *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 23, C.P., SARH, México.
- Noble, I. y R. Dirzo (1997), "Forests as human dominated ecosystems", *Science* 277(5325):522-525
- Palacio, J y L. Luna (1995), Clasificación espectral automática vs. Clasificación visual. Un ejemplo al sur de la Ciudad de México, UNAM, 29:25-40.
- Palacio, J y L. Luna (1996), "Improving spectral results in a GIS context", *Int. J. of Remote Sensing*, 17 (11):2201-2209.
- Rzedowski, J. (1978), *Vegetación de México*, Ed. Limusa, México.
- Sader, S., T. Stone y A. Joyce (1990) "Remote sensing of tropical forests: an overview of research and applications using photographic sensors", *Photog. Eng. and Remote Sensing*, 55(10):1343-1351
- Sader, S., G. Powell y J. Rappole (1991), "Migratory bird habitat rnonitoring through remote sensing", *Int. J. of Remote Sensing*, 12(3):363-372
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos; 1994), Inventario Nacional Periódico, Memoria Nacional, Subsecretaria Forestal y de Fauna Silvestre, SARH, México.
- SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, 1997), Ley Forestal, SEMARNAP, México.
- Toledo V. M. (1988), La diversidad biológica de México, *Ciencia y Desarrollo*, México, 14(81):17-30