

## **Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación**

Recibido: 19 de enero de 2008. Aceptado en versión final: 20 de agosto de 2008.

Noel Bonfilio Pineda Jaimes\*

Joaquín Bosque Sendra\*\*

Montserrat Gómez Delgado\*\*

Wenceslao Plata Rocha\*\*\*

**Resumen.** Este trabajo tiene como objetivo describir los cambios en la cobertura y uso del suelo sucedidos en el Estado de México en el periodo 1993-2002. Se calculan los cambios, intercambios y transiciones sistemáticas que afectan la pérdida de la cobertura forestal, se aplican métodos de regresión multivariantes para explicar las posibles causas que provocan este proceso de deforestación regional. Una descripción detallada demuestra que las categorías de bosque tienen cambios netos bajos, pero valores de intercambio altos. Las transiciones sistemáticas entre categorías revelan una dinámica de perturbación-recuperación forestal. Los

modelos de regresión lineal múltiple señalan que los factores demográficos a nivel municipal son los que más inciden en la pérdida del bosque. A nivel de píxel los modelos de regresión logística explican que la mayor pérdida ocurre en zonas boscosas más próximas a las zonas agrícolas. Asimismo, las zonas con alta fragilidad ecológica son las que presentan mayor susceptibilidad a ser deforestadas.

**Palabras clave:** Cambio del uso del suelo, SIG, análisis multivariante, deforestación, Estado de México.

## **Analysis of land use changes in the State of Mexico using regression analysis and GIS: an approach to the deforestation processes**

**Abstract.** This paper describes land use change in the State of Mexico during the period 1993-2002. Changes, interchanges and systematic transitions affecting forest loss were calculated. Multivariate analysis was performed to explain the possible causes that are leading to this regional deforestation process.

A detailed description demonstrates that categories of forest have low net changes, however interchange values were high. Systematic transitions between categories demonstrate a strong forest disturbance-recovery dynamics. Models of multiple linear regressions indicate that forest loss is heavily influenced by demographic factors at municipal

---

\*Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria, 50110, Toluca, Estado de México. E-mail: nbpj@uaemex.mx

\*\*Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, calle Colegios 2, 28801, Alcalá de Henares, Madrid, España. E-mail: joaquin.bosque@uah.es, Montserrat.gomez@uah.es

\*\*\*Escuela de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Sinaloa, Av. De las Américas y Blvd. Universitarios, Cd. Universitaria, zona centro, 80010, Culiacán, Sinaloa. E-mail: wenses\_plata@hotmail.com

units. Logistic regression models applied at a pixel level explain that the greatest loss happens in forested areas next to agricultural land use; additionally it was found that those areas with high ecological fragility are those presenting the largest susceptibility to be deforested.

**Key words:** Land use change, GIS, multivariate analysis, deforestation, State of Mexico.

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el cambio del uso del suelo se ha constituido como uno de los factores plenamente implicados en el cambio global, alterando procesos y ciclos. Lo anterior se vuelve trascendental si se considera que es a través de estos cambios donde se materializa la relación entre el hombre y el medio ambiente (Lambin *et al.*, 1999).

Los ecosistemas terrestres han sufrido grandes transformaciones, la mayoría debido a la conversión de la cobertura del terreno y a la degradación e intensificación del uso del suelo (Lambin, 1997). Estos procesos usualmente englobados en lo que se conoce como deforestación o degradación forestal, se asocian a impactos ecológicos importantes en casi todas las escalas (Bocco *et al.*, 2001). Se ha comprobado que la destrucción de la biodiversidad y los bosques tropicales y templados puede perturbar el clima global y poner en riesgo una fuente importante de captura de carbono. Cada vez es más evidente la transformación que sufre el territorio. Los cambios del uso del suelo ya sean legales o ilegales son cada día más frecuentes. Según Orozco *et al.* (2004) el avance de la frontera agrícola hacia superficies forestales ha traído como consecuencia la aparición de una superficie de labor frágil y con alta susceptibilidad a los procesos erosivos y, por ende, con baja productividad.

Los factores explicativos que inducen esta degradación son diversos. Algunos autores consideran que la modificación de la cobertura y uso del suelo se debe a la interacción de factores económicos, políticos y ecológicos (Meyer y Turner, 1992; Walter y Steffen, 1997; Geist y Lambin, 2001). Sin embargo, otros piensan que la escasa conexión entre los estudios explícitos del uso del suelo y los aspectos socioeconómicos provoca serias dificultades para

integrar realmente aspectos biofísicos y humanos (Nagendra *et al.*, 2004). También se acusa la falta de trabajos de análisis cuantitativos que permitan explicar las causas y efectos de estos factores, ya que también las interpretaciones de cómo estos interactúan para estimular el cambio varían ampliamente de una región a otra (Skole *et al.*, 1994; Kummer y Turner, 1994).

Los estudios de caso en México muestran que los métodos utilizados en general son diferentes; indefinidos en cuanto a los parámetros y variables que se incluyen; incomparables en términos de las categorías que utilizan y con escalas de trabajo incompatibles (Palacio *et al.*, 2000; Velázquez *et al.*, 2002).

Por otro lado, llama la atención que no se afronta en su gran mayoría, la explicación de los cambios, es decir, se llegan a cuantificar los cambios netos o totales ocurridos sin poner mucho énfasis en las transiciones que se dan entre categorías (García *et al.*, 2000; Alonso *et al.*, 2003; Ramírez y Zubietta, 2005). De igual forma sólo algunos trabajos revisados hacen uso de técnicas estadísticas para tratar de conocer las causas de los cambios ocurridos (Mas *et al.*, 1996; Castillo *et al.*, 1998; Bocco y Mendoza, 1999; Mendoza y Dirzo, 1999; Mas y Puig, 2001; Isaac-Márquez *et al.*, 2005). De acuerdo con lo anterior, se puede decir que aún son escasas las investigaciones en el país que tratan de explicar las causas de estos cambios utilizando variables socioeconómicas y ambientales (Bocco *et al.*, 2001).

Los objetivos principales de este trabajo son: a) realizar una descripción de los cambios de la cobertura y uso del suelo en el Estado de México, utilizando una matriz de tabulación cruzada donde se aprecie la dinámica entre categorías, y b) construir dos modelos explicativos mediante técnicas de regresión que coadyuven a comprender los procesos de pérdida de la masa forestal en el periodo estudiado.

## ÁREA EN ESTUDIO

Se localiza en la parte sur de la altiplanicie meridional de la República Mexicana, entre los paralelos 18°21' y 20°17' de latitud norte y los meridianos

98°35' y 100°36' de longitud oeste (Figura 1). Es una de las regiones más elevadas del país, sus altitudes fluctúan entre los 1 330 y 2 800 msnm y tiene una superficie de 22 274.97 km<sup>2</sup> que representa el 1.1% del total nacional (GEM, 1993).

La entidad cuenta con importantes recursos forestales constituidos principalmente por bosque de coníferas, bosque de latifoliadas, bosque mixto y bosque mesófilo de montaña. La utilidad e importancia de estos recursos no radica sólo en la producción de materias primas y bienes económicos, sino en el papel esencial que desempeñan en el funcionamiento del sistema natural. Los bosques templados del Estado de México cobran mayor importancia si se observan de manera holística sus funciones protectoras, reguladoras y productivas. Por otra parte, el proceso de deforestación ha tenido efectos negativos entre los que destacan:

la degradación de los suelos, disminución de los mantos acuíferos al alterarse el ciclo del agua, pérdida de la biodiversidad y aparición de plagas en diversas zonas boscosas del estado (GEM, 1999). En la actualidad, el Estado de México es la entidad más poblada del país con 14 007 495 habitantes (INEGI, 2005). Lo anterior se debe en gran parte al proceso de expansión que ha sufrido durante las últimas décadas la Ciudad de México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materiales

Para este estudio se utilizaron dos mapas digitales de vegetación y uso del suelo escala 1: 250 000 correspondientes a la serie II de 1993 (t1) y a la serie III (t2) de 2002 del Instituto Nacional de

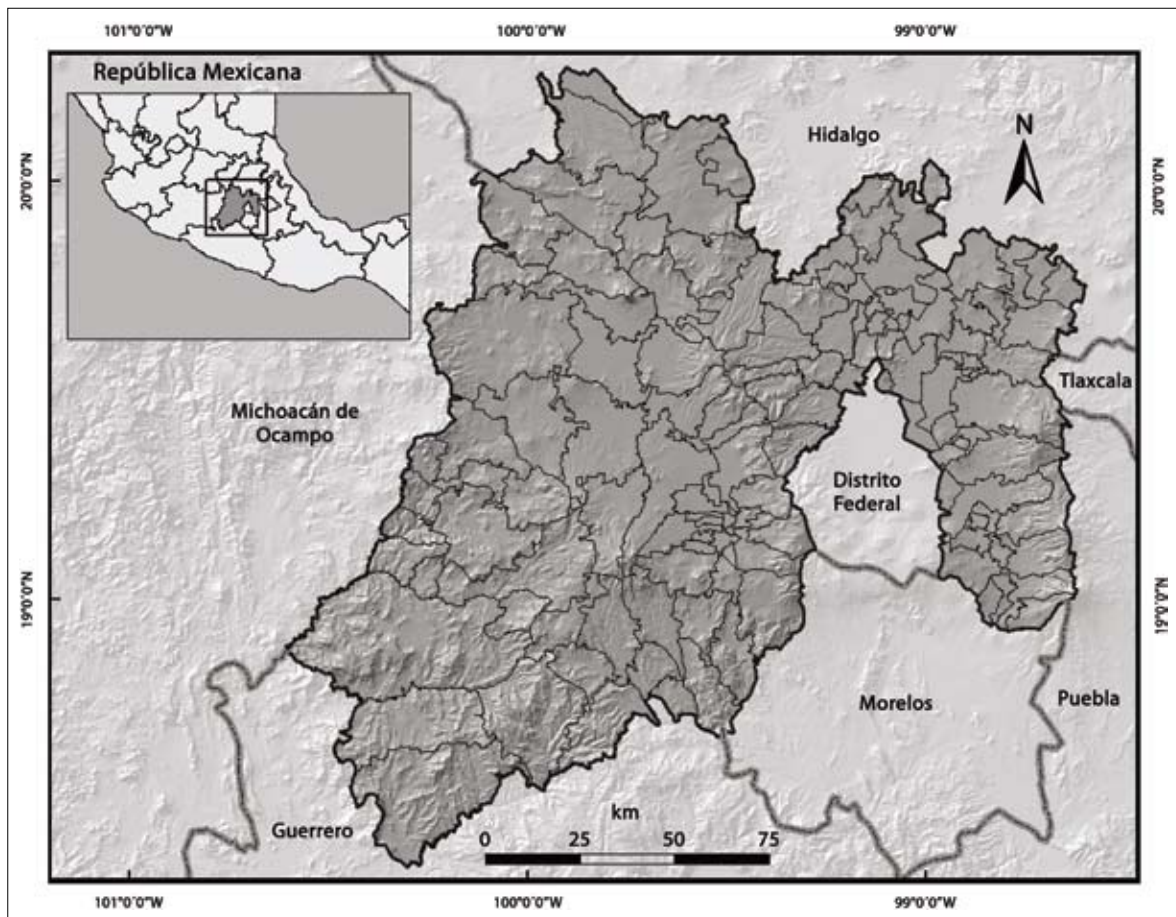


Figura 1. Localización geográfica del Estado de México.

Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Si bien ambas series tienen una metodología de elaboración en común, se detectaron inconsistencias de equivalencia en algunas categorías que hicieron difícil su comparación. Debido a esta dificultad se optó por agregar las clases utilizadas en el sistema de clasificación del INEGI y adaptarlas al sistema clasificatorio propuesto por Velázquez *et al.*, (2002) para el Inventario Nacional Forestal. Esta reclasificación de los mapas digitales permitió asegurar que los cruces de los mapas y las estadísticas derivadas fueran equivalentes y comparables. No obstante, no se conocen reportes sobre la confiabilidad geométrica y temática de estas coberturas, por lo que algunos cambios pueden ser resultado de “artefactos” generados por errores en la cartografía utilizada.

Para analizar los resultados de la matriz de cambios, se optó por transformar la información cartográfica a formato matricial. Star y Estes (1990) citado por Bosque (1997) plantean que la unidad base de la rejilla debe ser la mitad de la longitud más pequeña que sea necesaria para representar todas las existentes en la realidad. Se midió el polígono más pequeño a representar y considerando lo anterior se generó un reticulado con rejillas de 125 x 125 m. Para el análisis de los cambios se utilizó el módulo de IDRISI Andes *Land Change Modeler for Ecological Sustainability*, desarrollado como una aplicación orientada al análisis del cambio de la cobertura y uso del suelo (Eastman, 2006).

Para construir los modelos se recopilieron 19 variables a nivel municipal de los Censos de Población

y Vivienda de 1990 y 2000, así como de los Censos Ejidales de 1991 y 2001. Esta información se manipuló en un paquete estadístico con capacidad de generar modelos de regresión lineal múltiple. Por su parte, las variables a nivel de píxel fueron tomadas de la cartografía elaborada para el Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio del Estado de México (GEM, 1999).

### Descripción del cambio de ocupación del suelo

Una tabulación cruzada del tiempo 1 y del tiempo 2 permitió obtener una matriz de cambios similar a la que se presenta en la Tabla 1. La diagonal muestra la cantidad total del paisaje estable entre una fecha y otra, mientras que fuera de la diagonal se encuentran las transiciones de las clases entre 1993 y 2002.

Con la información de la matriz se calculó la ganancia ( $G_{ij}$ ) que es la diferencia entre la columna del total del tiempo 2 ( $P_{+i}$ ) y la persistencia ( $P_{jj}$ ) (expr. 1). Por su parte, la pérdida ( $L_{ij}$ ) es la diferencia entre la fila del total del tiempo 1 ( $P_{j+}$ ) y la persistencia ( $P_{jj}$ ), (expr. 2). El intercambio entre categorías ( $S_j$ ) se calcula como dos veces el valor mínimo de las ganancias y las pérdidas (expr. 3). Para calcular el cambio total para cada categoría ( $C_j$ ) se establece como la suma del cambio neto ( $D_j$ ) y el intercambio ( $S_j$ ), o bien, la suma de las ganancias y las pérdidas (expr. 4).

$$G_{ij} = P_{+i} - P_{jj} \tag{1}$$

Tabla 1. Tabulación cruzada para dos tiempos con pérdidas y ganancias

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

$$L_{ij} = P_{j+} - P_{jj} \quad (2)$$

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

$$C_j = (D_j + S_j) \quad (4)$$

Para detectar los cambios significativos entre categorías se aplicó una metodología que propone analizar de forma más detallada los cambios que están fuera de la diagonal, considerando las ganancias y las pérdidas por separado (Pontius *et al.*, 2004). No obstante, hay que considerar que el enfoque de este trabajo se ubica en un contexto de índole estadístico. Es decir, considera que una transición es aleatoria si una categoría de ocupación del suelo tiene ganancias de otras categorías en proporción al tamaño de las categorías que han tenido pérdidas, o bien, si la pérdida de esa misma categoría está en proporción al tamaño de aquellas categorías que han ganado. Cualquier diferencia alta de estas proporciones representa una transición sistemática del paisaje (Braumoh, 2006).

En el caso de las ganancias, se asume que la ganancia de cada categoría y la proporción de cada categoría en el tiempo 2 son fijas, para después distribuir la ganancia a través de las otras categorías, según la proporción relativa de las otras categorías en el tiempo 1 (expr. 5).

$$G_{ij} = \frac{(P_{+j} - P_{jj}) \times P_{i+}}{1 - P_{j+}} \quad (5)$$

Donde  $G_{ij}$  es la transición esperada de la categoría  $i$  para la categoría  $j$  debido a un proceso aleatorio de ganancia,  $P_{+j} - P_{jj}$  es la ganancia total observada de la categoría  $j$ ,  $P_{i+}$  es el tamaño de la categoría  $i$  en el tiempo 1 y  $P_{i+}$  es la suma de los tamaños de todas las categorías excluyendo a la categoría  $j$  en el tiempo 1. Para el cálculo de las pérdidas el procedimiento es similar al anterior, donde se asume que la pérdida de cada categoría es fija, y luego distribuye la pérdida a través de las otras categorías según la proporción relativa de las otras categorías con el tiempo 2 (expr. 6).

$$L_{ij} = \frac{(P_{i+} - P_{ii}) \times P_{+j}}{1 - P_{+i}} \quad (6)$$

Donde  $L_{ij}$  es la transición esperada de la categoría  $i$  para la categoría  $j$  debido a un proceso aleatorio de pérdida,  $P_{i+} - P_{ii}$  es la pérdida total observada de la categoría  $i$  entre los dos tiempos  $P_{+j}$  es el tamaño de la categoría  $j$  en el tiempo 2, y  $1 - P_{+i}$  es la suma de los tamaños de todas las categorías excepto la categoría  $i$  en el tiempo 2.

### Explicación de los cambios ocurridos en la cobertura forestal

Para tener una aproximación a las posibles causas que provocan la pérdida de los bosques se formularon modelos de regresión lineal múltiple y de regresión logística utilizando datos a nivel municipal y de píxel, respectivamente. Ambos fueron aplicados de forma separada a la pérdida total de bosque y a la pérdida de los cuatro tipos de bosque.

No es sencillo determinar cuáles son los factores socioeconómicos que más inciden en los procesos de deforestación, sin embargo, algunos estudios consideran como principal causa los aspectos demográficos (Southgate y Basterrechea, 1992; Lambin, 1997), otros autores como Mahar y Schneider (1994) señalan el avance agrícola como factor principal de este fenómeno, mientras que Reyes *et al.* (2003) consideran que las políticas gubernamentales y los programas de subsidio al campo son parte del problema.

Se realizó un análisis de correlación de las 19 variables originales para medir su intensidad de asociación. La Tabla 2 muestra las variables que resultaron poco correlacionadas y potencialmente útiles para el modelo de regresión, las cuales fueron agrupadas en tres grupos: *a)* crecimiento de la población entre 1990 y 2000, *b)* variación del número de viviendas entre 1990 y 2000, y *c)* variación de la forma de explotación de la tierra entre 1991 y 2001.

La relación entre las variables del grupo correspondiente al crecimiento de la población y la variable dependiente (pérdida de bosque), se basa en el supuesto de que es la población originaria la que actúa sobre el territorio municipal y no toma en cuenta actores sociales que probablemente actúen dentro del municipio y no son parte de él. De igual forma se debe considerar que las variables socioeconómicas utilizadas son en realidad promedios y suponen que todo el municipio es homogéneo.

Tabla 2. Variables independientes utilizadas para la regresión lineal múltiple

Variable	Descripción	Grupo
CP18mas	Población de 18 años y más.	Crecimiento de la población. (1990-2000)
CPobAn	Población analfabeta.	
CPEAPr	Población económicamente activa en el sector primario.	
CPojp	Población ocupada de jornaleros y peones.	
CPom1sal	Población que gana menos de un salario mínimo.	
CPobInd	Población que habla alguna lengua indígena.	
CVivTM	Viviendas con techo de madera.	Variación del número de viviendas. (1990-2000)
CVivTT	Viviendas con techo de teja.	
CVivLC	Viviendas que usan leña o carbón como combustible.	
CVivPetro	Viviendas que usan petróleo como combustible.	
CEjAcfo	Ejidos y comunidades agrarias con actividades forestales.	Variación de la forma de explotación de la tierra. (1991-2001)
CEjAcRec	Ejidos y comunidades agrarias con actividades de recolección y aprovechamiento de especies vegetales no cultivadas.	
CSupParc	Ejidos o comunidades agrarias que han sido fraccionadas para ser distribuidas entre sus integrantes para su explotación.	
CSupNoPar	Ejidos o comunidades agrarias que no han sido fraccionadas para su explotación individual.	

La regresión lineal múltiple está basada en el ajuste de una ecuación a un conjunto de datos mediante mínimos cuadrados (expr. 7), y es uno de los más empleados y usuales en todas las ciencias (Bosque y Moreno, 1994:59).

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \dots + b_nX_n + e \quad (7)$$

Donde los subíndices muestran las distintas variables explicativas 1,2 hasta  $n$  y  $e$  indica el término del error del modelo. Los signos de los parámetros  $b_1, b_2, \dots, b_n$  miden el sentido de la relación entre cada una de la variables explicativas y la variable dependiente, manteniendo constante la influencia de las restantes variables explicativas. Se usaron coeficientes estandarizados por lo que su valor numérico indica el tamaño de la influencia (*Ibid.*:60). Se utilizó el método de eliminación hacia atrás (*backward*) para descartar las variables con baja significancia, la cual se estableció en  $p \leq 0.05$ . Este método prueba y determina las mejores regresiones contenidas en un cierto número de variables (Draper y Smith, 1981).

En el caso de la regresión logística se buscó establecer una relación entre la deforestación y variables físicas y de proximidad a nivel de píxel. Algunos autores han usando variables como distancia a ríos, carreteras, poblados, zonas agrícolas, zonas forestales y distancia al borde del bosque (Mas *et al.*, 2003; Soares-Filho *et al.*, 2002; Geoghegan *et al.*, 2001; Rosero-Bixby y Palloni, 1998). Mientras que otros incluyen factores como la altitud, pendiente, precipitación, radiación solar, temperatura media anual (Serra *et al.*, 2003).

Para construir el modelo se tomó como variable dependiente la pérdida de bosque, la cual presenta un valor de 1 cuando un píxel tiene pérdida de bosque y un valor de 0 cuando no la tiene. Se utilizaron como factores explicativos siete variables cuantitativas continuas y una variable cualitativa discreta (Tabla 3). Esta última variable se retomó del Programa de Ordenamiento Territorial del Estado de México y se obtuvo utilizando como indicadores a la vegetación, el relieve, la pendiente y tipo de suelo (GEM, 1999). Además fue codificada como variable binaria (*dummy*). Al respecto Ebdon

Tabla 3. Variables independientes utilizadas para la regresión logística

Variable	Descripción	Tipo
Dist_agrícola	Distancia a zonas agrícolas.	Continua
Dist_locma	Distancia a localidades marginadas.	Continua
Dist_urbano	Distancia a zonas urbanas.	Continua
Dist_vías	Distancia a carreteras.	Continua
Pendientes	Pendientes en grados.	Continua
Altitud	Altitud en msnmm.	Continua
Precipitación	Precipitación en mm.	Continua
Fra_ecológica	Fragilidad ecológica.	Discreta

(1982), considera que el uso de este tipo de variable puede provocar alguna pérdida de información, pero considera esta transformación como imprescindible en un análisis de regresión logística.

La regresión logística es un método similar a la regresión lineal múltiple, pero adaptado a modelos en donde es condición necesaria que la variable a explicar sea una variable binaria, pudiendo tomar únicamente valores de 0 y 1 (Aguilera, 2006). Este método está regido por la siguiente ecuación (exp. 8).

$$\ln \frac{P}{1-P} = \alpha + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (8)$$

Donde  $P$  representa la probabilidad de que un píxel sea deforestado;  $x_1$  hasta  $x_n$  son las variables explicativas contempladas en el análisis y  $\alpha$  y  $b$  son los parámetros estimados por el método de regresión logística.

Los modelos de regresión logística tienen dos funciones principalmente, son útiles para realizar análisis de predicción y también pueden utilizarse para captar la relación que hay entre una variable dependiente y un conjunto de variables independientes. Los modelos aquí empleados se orientan al segundo caso.

Para validar la capacidad explicativa de los modelos se utilizó el parámetro estadístico ROC (*Relative Operating Characteristic*), el cual compara los mapas de pérdida de bosque con los mapas de los modelos ajustados. El área bajo la curva ROC indica, para un punto de presencia (en este caso un píxel

deforestado) y uno aleatorio seleccionados al azar, la probabilidad de que el valor de idoneidad previsto por los modelos para el punto de presencia sea mayor que el previsto para el punto aleatorio. Es una medida directa de la capacidad de discriminación del modelo, que toma valores próximos a 1 cuando existe un buen ajuste con los datos, mientras que un valor cercano a 0.5 significa que el ajuste no es mejor que el obtenido por azar (Benito de Pando y Peñas de Giles, 2007). Por otra parte, la curva ROC se obtiene al representar gráficamente los casos positivos (sensibilidad) y los negativos (especificidad) detectados correctamente (Serra *et al.*, 2003).

## RESULTADOS

### Descripción del cambio de ocupación del suelo

#### a) Cuantificación general del cambio

La distribución espacial de los cambios se observa en la Figura 2, en el periodo estudiado el cambio total en el estado fue de 6.7%, que en términos absolutos se traduce a 149 725 ha, mientras que la persistencia del paisaje ha sido del 93.3%.

Si bien parece ser poco cambio, trabajos similares en México demuestran que en la mayoría de los paisajes la persistencia es lo que predomina. Velázquez *et al.* (2002) muestran datos de persistencia para todo el territorio nacional de 92% para coberturas naturales y 97% para coberturas antrópicas. Por su parte Cortina *et al.*, (1998) obtiene el 90% de zonas estables en dos estados del sur de México. Incluso en lugares como la zona metropolitana de Atlanta en los Estados Unidos se calculó un 75% de persistencia (Yang y Lo, 2002). Asimismo, un estudio reciente de la Comunidad de Madrid, España determinó un 94.2% de zonas estables (Plata, 2007).

Un resumen de los resultados se presenta en la Tabla 4, donde se observa que en 1993 las áreas agrícolas ocupaban el 44% de la superficie estatal (983 320 ha), los bosques el 28% (624 498 ha), el pastizal el 16.7% (370 993 ha) y los asentamientos humanos el 3.5% (78 998 ha). Para el 2002 la superficie de zonas agrícolas aumentó en 48 789 ha, las superficies boscosas se habían reducido a 13 690 ha

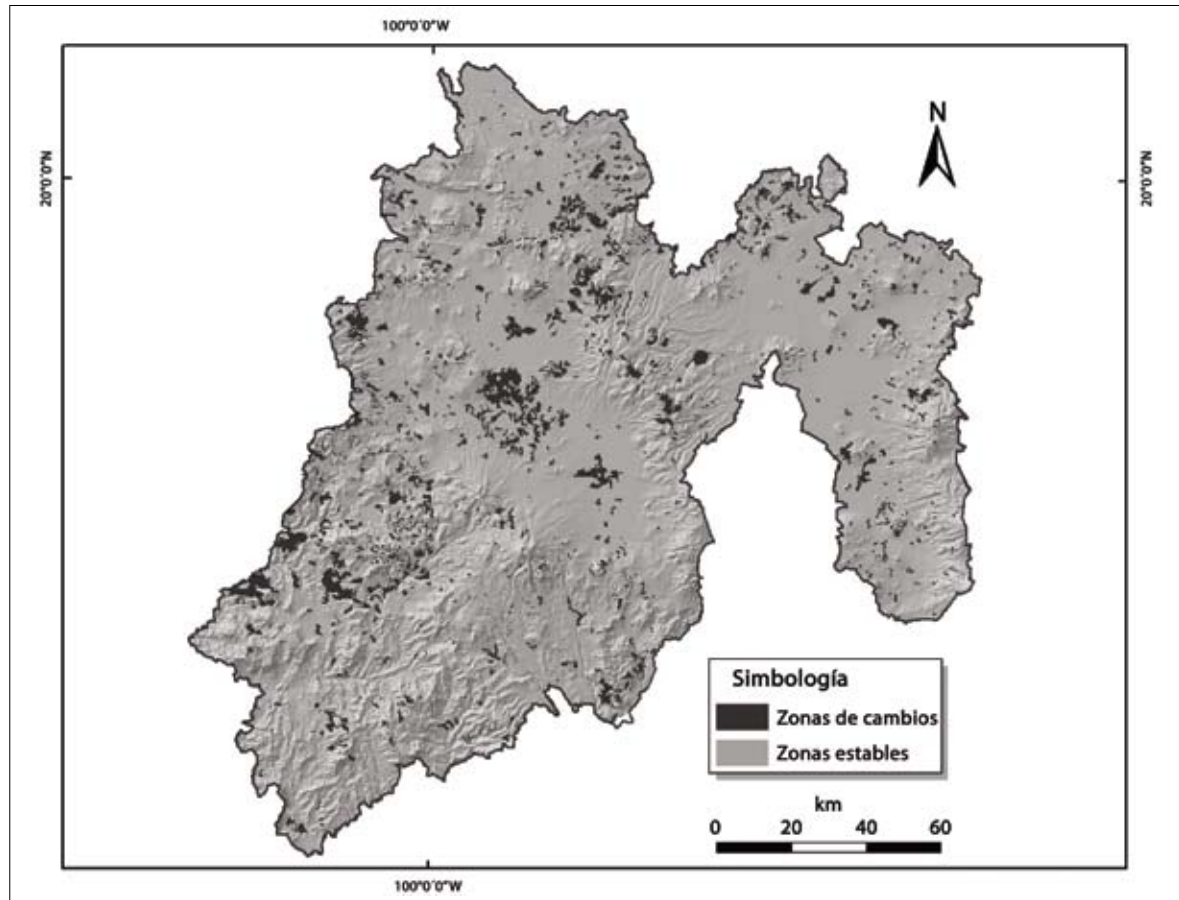


Figura 2. Zonas de cambios y zonas estables entre 1993 y 2002.

y el pastizal tuvo un descenso de 44 303 ha, siendo la categoría que más pierde en ese lapso, mientras que los asentamientos humanos ganaron 7 792 ha.

Lo anterior indica que las zonas agrícolas son las que más han ganado en superficie, sobre todo la agricultura de temporal. Por su parte, las zonas boscosas, junto con el pastizal, son las categorías que más pierden. Sin embargo, este análisis no ofrece detalles de la dinámica de cambio que existe en las zonas boscosas del Estado de México. Una exploración más particular de los cambios netos e intercambios más importantes entre categorías ayudó a detectar las transiciones más significativas.

#### *b) Cambio neto e intercambio*

El porcentaje de cambio neto que presentan los bosques de coníferas es de 0.17%, el bosque de latifoliadas de 0.32%, el bosque mesófilo de mon-

taña de 0.01% y el bosque mixto de 0.10%. No obstante, en la Figura 3 se aprecia que el bosque mixto a pesar de ser una categoría con poco cambio neto es de las categorías que tiene mayor porcentaje de intercambio (1.43%), después de la agricultura de temporal y el pastizal. Lo mismo sucede con los bosques de coníferas y de latifoliadas que presentan porcentajes de intercambio de 0.49 y 0.63%, respectivamente. Lo que indica que a pesar de que estas categorías presentan bajo porcentaje de cambio neto, su dinámica de intercambio es muy importante.

#### *c) Transiciones sistemáticas inter-categorías*

Para identificar las transiciones sistemáticas se deben interpretar las transiciones de acuerdo con el tamaño de las categorías, tanto en términos de pérdidas como en términos de ganancias (Pontius *et al.*, 2004).



Tabla 4. Evolución de la cobertura y uso del suelo en superficie y porcentaje entre 1993 y 2002

Categoría	1993		2002		Cambio de la superficie en ha
	ha	%	ha	%	
Agricultura de riego (Ar)	240718.8	10.8	248953.1	11.2	8234.4
Agricultura de temporal (At)	742601.6	33.3	783156.3	35.2	40554.7
Asentamiento humano (Ah)	78998.4	3.5	86790.6	3.9	7792.2
Bosque de coníferas (Bc)	203496.9	9.1	199660.9	9.0	-3835.9
Bosque de latifoliada (Bl)	193571.9	8.7	186276.6	8.4	-7295.3
Bosque mesófilo de montaña (Bmm)	11945.3	0.5	11635.9	0.5	-309.4
Bosque mixto (Bm)	215484.4	9.7	213234.4	9.6	-2250.0
Cuerpo de agua (Ca)	17645.3	0.8	17645.3	0.8	0.0
Matorral xerófilo (Mx)	18312.5	0.8	18171.9	0.8	-140.6
Otros tipos de vegetación (Otv)	3529.7	0.2	3328.1	0.1	-201.6
Pastizal (P)	370993.7	16.7	326690.6	14.7	-44303.1
Plantación forestal (PF)	4978.1	0.2	4987.5	0.2	9.4
Selva baja caducifolia (Sbc)	113826.6	5.1	115956.3	5.2	2129.7
Vegetación hidrófila (Vh)	829.7	0.0	829.7	0.0	0.0
Áreas sin vegetación aparente (Asva)	10564.1	0.5	10179.7	0.5	-384.4
	2227496.9	100.0	2227496.9	100.0	

Las transiciones en términos de pérdidas se presentan en la Tabla 5. Las ocho primeras transiciones significan procesos de deforestación. La tasa más significativa pertenece a la selva baja caducifolia con un valor 2.30 veces mayor, lo que significa que esta categoría perdió 1 599 ha más de lo esperado. Sin embargo, cuando el bosque de coníferas y el bosque mixto pierden son sustituidos por la agricultura de temporal y el pastizal en 5 208 ha más a las esperadas. Por su parte, cuando el bosque de latifoliadas pierde lo sustituye el pastizal en 1 973 ha más a las esperadas. Por lo que se observa en estas transiciones, las pérdidas de los bosques y selvas se presentan a costa de las zonas de agricultura de temporal y de las zonas de pastizal.

Por otro lado, es posible identificar en las últimas cuatro transiciones como los asentamientos humanos en el Estado de México han crecido a costa de las áreas agrícolas, ya que cuando las categorías de agricultura de temporal y riego pierden, son sustituidas por los asentamientos humanos en 1 126 ha más a las esperadas. Por su parte, la categoría otros tipos de vegetación ha perdido en

una tasa 24.6 veces mayor a la esperada a favor de los asentamientos humanos.

Las transiciones en términos de ganancias se muestran en la Tabla 6. Las cinco primeras transiciones representan procesos de revegetación del bosque. La transición más significativa es la del bosque de coníferas que cuando gana reemplaza al pastizal en una tasa 2.3 superior a la esperada. En el mismo sentido, el bosque de latifoliadas y el bosque mixto han reemplazado al pastizal en 1 624 ha más a las esperadas. El bosque mesófilo de montaña presenta una transición con el mismo patrón, aunque en este caso reemplaza a la agricultura de temporal en 2 947 ha más a las esperadas. Además de los procesos de revegetación las dos últimas transiciones representan un proceso de avance de la frontera agrícola, el más significativo es el que presenta el reemplazo del pastizal por la agricultura de temporal en 26 361 ha más de las esperadas, sin embargo, no deja de ser importante el reemplazo del pastizal por la agricultura de riego en una tasa 1.3 mayor a la esperada.

Derivado de este análisis se observa que las transiciones en términos de pérdidas indican los

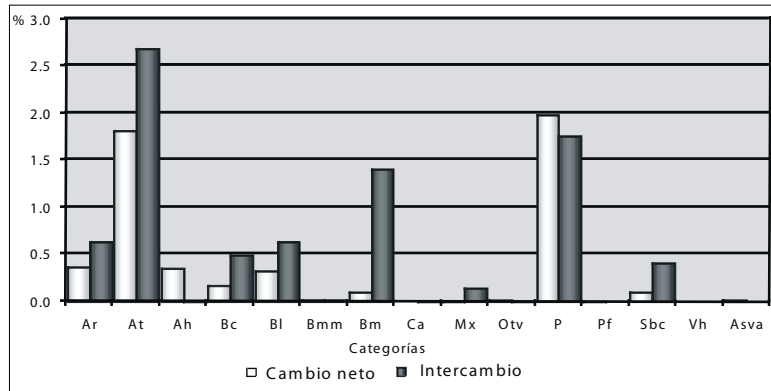


Figura 3. Cambio neto e intercambios ocurridos entre 1993 y 2002.

procesos de deforestación que están sufriendo los bosques del Estado de México. No obstante, los valores de la tabla en términos de ganancias confirman que en el periodo estudiado existe una dinámica interesante de perturbación-recuperación del bosque (Franco *et al.*, 2006).

La mayor pérdida de bosques de coníferas se presenta en las regiones montañosas del norte de la sierra de las cruces (Figura 4-A). Las pérdidas del bosque de latifoliadas se dan en la zona norte del estado, aunque también se aprecia una región importante en el suroeste (Figura 4-B). El bosque mesófilo de montaña presenta pequeñas zonas de pérdida en la ladera sur del nevado de Toluca (Figura 4-C). Las pérdidas de bosque mixto se observan claramente en las zonas serranas del suroeste del estado, así como en la sierra de las cruces entre los valles de México y Toluca.

### Explicación de los cambios ocurridos en la cobertura forestal

#### a) Modelos de regresión lineal múltiple

Se elaboraron cinco modelos de regresión lineal múltiple utilizando variables socioeconómicas por municipio, de los cuales el modelo aplicado al bosque mesófilo de montaña fue descartado debido a que el número de casos era muy reducido.

El mejor modelo para explicar la pérdida total de bosque (Tabla 7) revela que sólo tres variables resultaron estadísticamente significativas, la población analfabeta, la población indígena y los ejidos con actividades forestales, siendo la población que habla alguna lengua indígena la que mejor explica la pérdida de bosque con un coeficiente estanda-

rizado de 0.5717. La población analfabeta tiene el mismo sentido aunque su coeficiente estandarizado es menor (0.2283).

El resultado anterior confirma el supuesto de algunos autores que señalan los aspectos demográficos como una de las causas de la degradación de este tipo de recursos (Meyer y Turner, 1992). Por otro lado, el valor del coeficiente estandarizado de los ejidos que tienen actividades de tipo forestal (-0.2268) indica que la pérdida de bosque es menor en estas superficies.

Lo anterior podría ir en contra de lo que se puede intuir, incluso ser contradictorio, sin embargo, no lo es. Estas áreas por lo regular son manejadas por ejidatarios y técnicos forestales por lo que es probable que tengan algún manejo forestal sustentable. Al respecto, Bray *et al.* (2007) ofrecen una excelente recopilación de este tipo de prácticas sustentables en paisajes forestales en diversas regiones de México. El trabajo de estos autores ofrece una oportunidad para conocer y analizar las dimensiones y las características únicas del manejo forestal comunitario mexicano.

En los modelos aplicados al bosque de coníferas y al bosque de latifoliadas la variable población que habla alguna lengua indígena resultó estadísticamente significativa, lo que indica que la pérdida de este tipo de bosques está de alguna manera inducida por la presencia de esta población. Sin embargo, hay que tomar en consideración que los  $R^2$  de estos modelos son muy bajos (0.20 y 0.08, respectivamente), inclusive el  $R^2$  del bosque de latifoliadas se podría considerar como despreciable, por lo que suponer que este factor es determinante en la de-

Tabla 5. Transiciones sistemáticas en términos de pérdidas

Transición sistemática	Vr	Ve	Vr-Ve	Vr-Ve / Ve	Interpretación de la transición sistemática
Bosque de coníferas en 1993 y agricultura de temporal en 2002.	5446.87	3596.51	1850.35	0.51	Cuando el bosque de coníferas pierde, lo sustituye la agricultura de temporal.
Bosque de coníferas en 1993 y pastizal en 2002.	2056.25	1500.27	555.97	0.37	Cuando el bosque de coníferas pierde, lo sustituye el pastizal.
Bosque de latifoliadas en 1993 y pastizal en 2002.	4265.62	2292.41	1973.20	0.86	Cuando el bosque de latifoliadas pierde, lo sustituye el pastizal.
Bosque mesófilo de montaña en 1993 y agricultura de riego en 2002.	68.75	48.10	20.64	0.42	Cuando el bosque mesófilo de montaña pierde, lo sustituye la agricultura de riego.
Bosque mesófilo de montaña en 1993 y agricultura de temporal en 2002.	260.93	151.31	109.62	0.72	Cuando el bosque mesófilo de montaña pierde, lo sustituye la agricultura de temporal.
Bosque mixto en 1993 y agricultura de temporal en 2002.	9179.68	6948.07	2231.61	0.32	Cuando el bosque mixto pierde, lo sustituye la agricultura de temporal.
Bosque mixto en 1993 y pastizal en 2002.	3468.75	2898.36	570.38	0.22	Cuando el bosque mixto pierde, lo sustituye el pastizal.
Selva baja caducifolia en 1993 y pastizal en 2002.	2292.19	693.57	1598.62	2.30	Cuando la selva baja caducifolia pierde, lo sustituye el pastizal.
Agricultura de riego en 1993 y asentamientos humanos en 2002.	1295.31	312.13	983.18	3.15	Cuando la agricultura de riego pierde, lo sustituyen los asentamientos humanos.
Agricultura de temporal en 1993 y asentamientos humanos en 2002.	207.81	65.35	142.46	2.18	Cuando la agricultura de temporal pierde, lo sustituyen los asentamientos humanos.
Otros tipos de vegetación en 1993 y asentamientos humanos en 2002.	240.63	9.39	231.24	24.63	Cuando otros tipos de vegetación pierden, los sustituyen los asentamientos humanos.
Áreas sin vegetación aparente en 1993 y asentamientos humanos en 2002.	118.75	15.05	103.70	6.89	Cuando las áreas sin vegetación aparente pierden, los sustituyen los asentamientos humanos.
Vr = Valor real					
Ve = Valor esperado					

Tabla 6. Transiciones sistemáticas en términos de ganancias

Transición sistemática	Vr	Ve	Vr-Ve	Vr-Ve / Ve	Interpretación de la transición sistemática
Pastizal en 1993 y bosque de coníferas en 2002.	3317.19	1003.84	2313.35	2.35	Cuando el bosque de coníferas gana reemplaza al pastizal.
Pastizal en 1993 y bosque de latifoliadas en 2002.	2654.69	1281.95	1372.74	1.70	Cuando el bosque de latifoliadas gana reemplaza al pastizal.
Pastizal en 1993 y bosque mixto en 2002.	3131.25	2880.21	251.03	0.09	Cuando el bosque mixto gana reemplaza al pastizal.
Agricultura de temporal en 1993 y bosque mesófilo de montaña en 2002.	76.56	39.80	36.76	0.92	Cuando el bosque mesófilo de montaña gana reemplaza a la agricultura de temporal.
Agricultura de temporal en 1993 y bosque mixto en 2002.	8712.50	5765.20	2947.29	0.51	Cuando el bosque mixto gana reemplaza a la agricultura de temporal.
Pastizal en 1993 y agricultura de temporal en 2002.	43985.94	17624.62	26361.32	1.50	Cuando la agricultura de temporal gana reemplaza al pastizal.
Pastizal en 1993 y agricultura de riego en 2002.	6739.06	2866.33	3872.74	1.35	Cuando la agricultura de riego gana reemplaza al pastizal.
Vr = Valor real					
Ve = Valor esperado					

Tabla 7. Modelos de regresión lineal múltiple

Variabes	Total de Bosque n=76 Coef. Est.	Sig.	Bosque de Coníferas n=50 Coef. Est.	Sig.	Bosque de Latifoliadas n=48 Coef. Est.	Sig.	Bosque Mixto n=46 Coef. Est.	Sig.
Intercepto		0.0573		0.0070		0.0960		0.0600
CPobAn	0.2283	0.0122						
CPobInd	0.5717	0.0000	0.4530	0.0009	0.2964	0.0407		
CEjAcFo	-0.2268	0.0133						
CPom1sal							0.3752	0.0048
CSupNoPar							0.4128	0.0021
R2	0.4411		0.2055		0.0878		0.3172	
La significancia estadística es de $p < 0.05$								

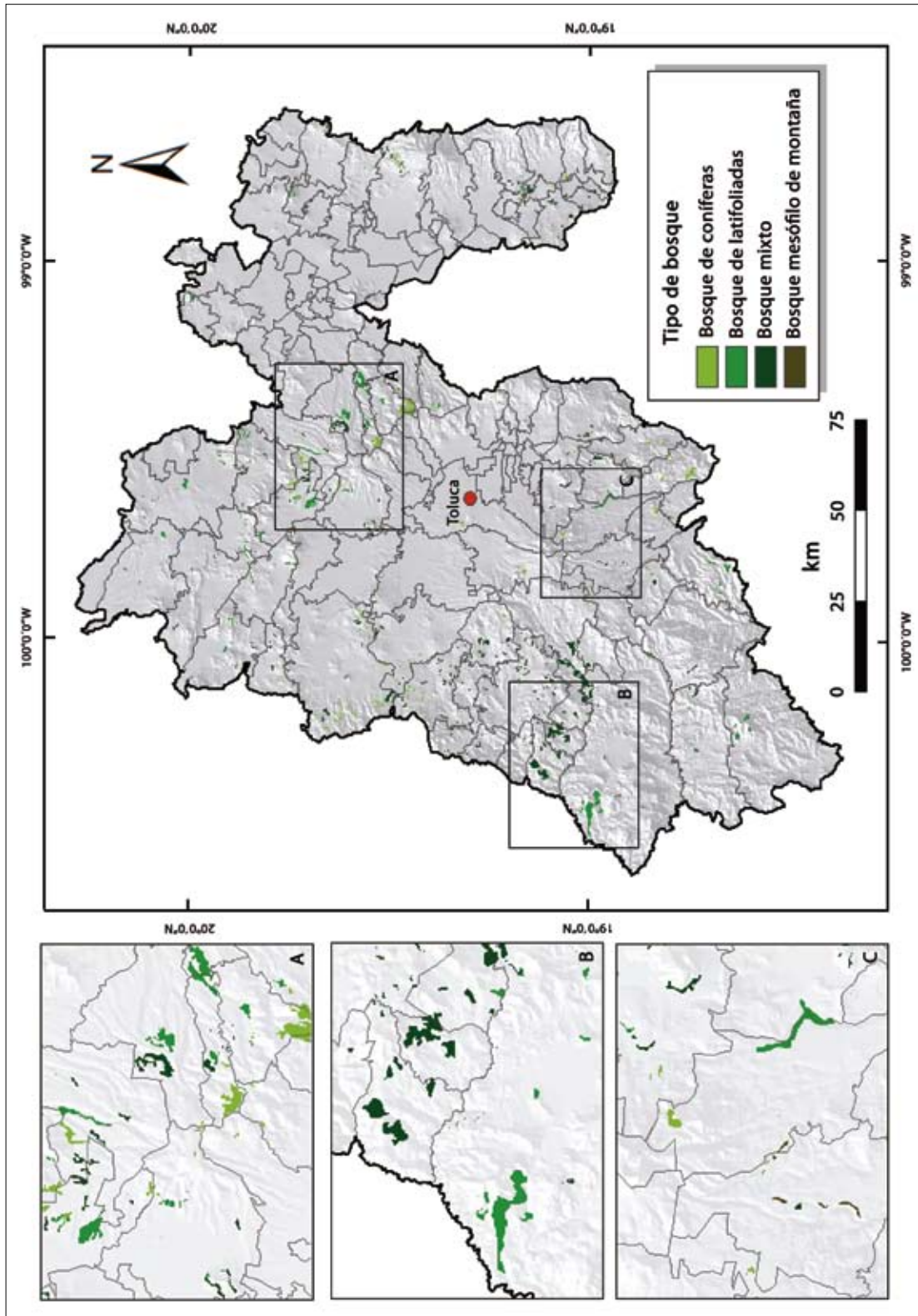


Figura 4. Zonas de pérdida de bosques ocurridos entre 1993 y 2002.

gradación de estos bosques no sería muy correcto. Por su parte, el modelo de regresión aplicado al bosque mixto arrojó dos variables estadísticamente significativas. La población que gana menos de un salario mínimo tiene un coeficiente estandarizado de 0.3752 y expone que la pérdida de los bosques mixtos en el Estado de México está relacionada con la población que tiene esta condición salarial. Por su parte, el coeficiente de la variable superficie no parcelada para su explotación agrícola (0.4128) revela qué pérdida del bosque mixto tiene alguna relación con el avance de la frontera agrícola.

Los modelos aplicados muestran las variables socioeconómicas a nivel municipal que más inciden en la pérdida de bosques en el Estado de México, destacando los factores demográficos como causa principal. Si se analizan de manera conjunta los modelos de regresión, se puede apreciar que la población con elevados índices de marginalidad es la que influye de manera positiva en la pérdida de bosques, sobre todo la población de habla indígena, y es de suponer que este tipo de población tiene el mayor índice de analfabetismo y los salarios más bajos del Estado de México. A pesar de lo anterior, algunos autores consideran muy simplista la ecuación donde se establece que a mayor crecimiento de la población mayor pérdida de bosque (Agrawal, 1995; Bocco *et al.*, 2001). No obstante, los resultados de este trabajo demuestran que esta relación aunque simple es real, si bien es cierto que hacen falta estudios más detallados y a escalas mayores para entender y comprender mejor estas relaciones que por sí mismas son complejas.

*b) Modelos de regresión logística*

Para estudiar las variables de tipo físico-geográfico y de proximidad a nivel de píxel se realizaron cinco modelos de regresión logística, uno para cada tipo de bosque y otro para el total de bosque (Tabla 8).

La variable distancia a zonas urbanas presenta un coeficiente positivo, lo que indica que no hay gran pérdida de bosque en áreas próximas a estas zonas (Figura 5c). El coeficiente de la variable distancias a vías es negativo, es decir, a mayor distancia menor pérdida de masa forestal, lo cual es indicativo de que la acción de las vías aún influye en los procesos de deforestación en el Estado de México (Figura 5d). Por otra parte, en zonas con fragilidad ecológica la pérdida de la masa forestal aumenta, lo que quiere decir que en las zonas más frágiles de los ecosistemas del Estado de México se está presentando degradación forestal, algo que resulta ecológicamente insostenible.

De igual forma cuando la variable pendiente aumenta cinco grados disminuye la pérdida de bosque (Figura 6a), cuando la precipitación aumenta 100 mm, también tiende a existir pérdida de bosque, sin embargo, en este caso se observa una pérdida menor alrededor de los 900 mm y en los 1 100 mm (Figura 6b). La variable altitud presentó un comportamiento anómalo que no permitió explicar claramente algún proceso de deforestación.

En el modelo del bosque de coníferas todos los coeficientes de las variables de proximidad resultaron negativos, incluyendo la distancia a zonas urbanas. Esto indica que en algunas zonas en particular la expansión urbana se da a expensas de este

Tabla 8. Modelos de regresión logística

Variables	Modelos									
	Total de bosque		Bosque de coníferas		Bosque de latifoliadas		Bosque mesófilo		Bosque mixto	
	Coeficiente	OR	Coeficiente	OR	Coeficiente	OR	Coeficiente	OR	Coeficiente	OR
Intercepto	4.12585520	61.92	-2.74309470	0.06	1.27254514	3.57	-3.75407600	0.02	2.80566887	16.54
Dist_agrícola	-0.35347663	0.70	-0.48870208	0.61	-0.12101129	0.89	-1.17203746	0.31	-0.52465599	0.59
Dist_locma	-0.14420917	0.87	-0.16489563	0.85	0.08109738	1.08	0.09289165	1.10	0.15332912	1.17
Dist_urbano	0.00003320	1.00	-0.00000874	1.00	-0.00000532	1.00	-0.00023364	1.00	0.00006757	1.00
Dist_vías	-0.15043474	0.86	-0.11477237	0.89	-0.22505449	0.80	0.14147752	1.15	-0.05748665	0.94
Fra_ecológica	0.21040256	1.23	-0.06506732	0.94	0.24171232	1.27	0.04497689	1.05	0.31260997	1.37
Precipitacion	-0.00112453	1.00	-0.00000831	1.00	-0.00186568	1.00	0.00464458	1.00	-0.00033755	1.00
Pendiente	-0.04235297	0.96	-0.01828476	0.98	-0.02750353	0.97	-0.09172797	0.91	-0.06619020	0.94
Altitud	-0.00053803	1.00	0.00147949	1.00	-0.00063659	1.00	-0.00034607	1.00	-0.00063701	1.00
ROC	0.7315		0.7866		0.7388		0.9113		0.8012	

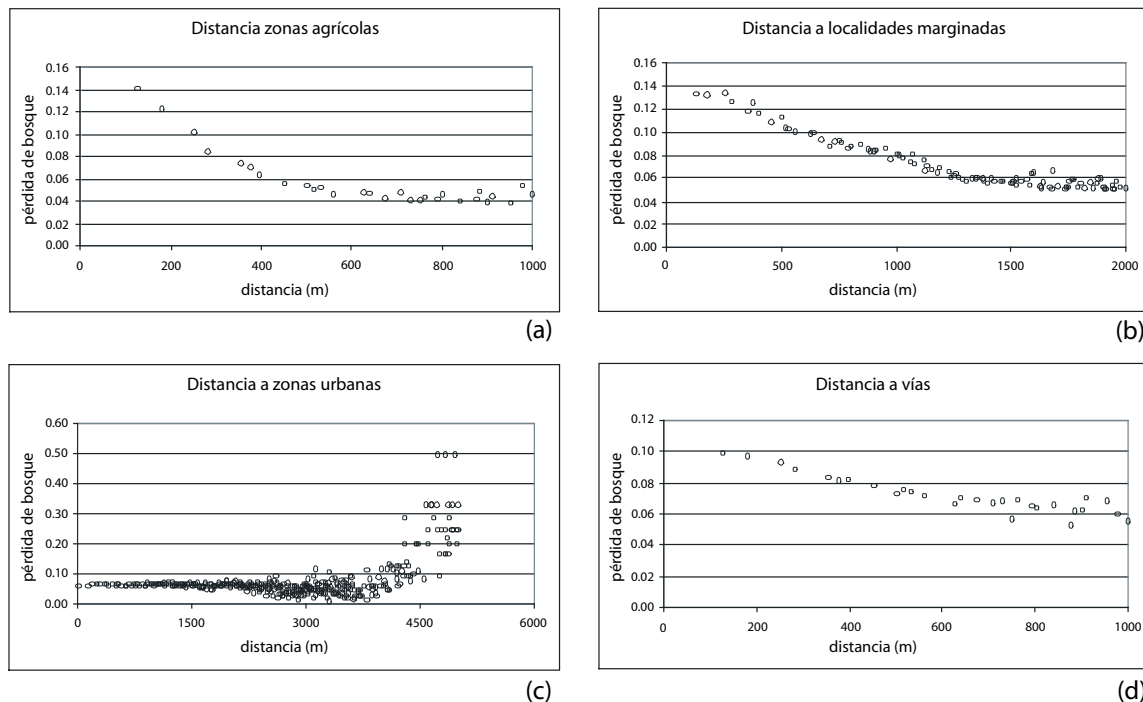


Figura 5. Variables de proximidad del modelo total de bosque.

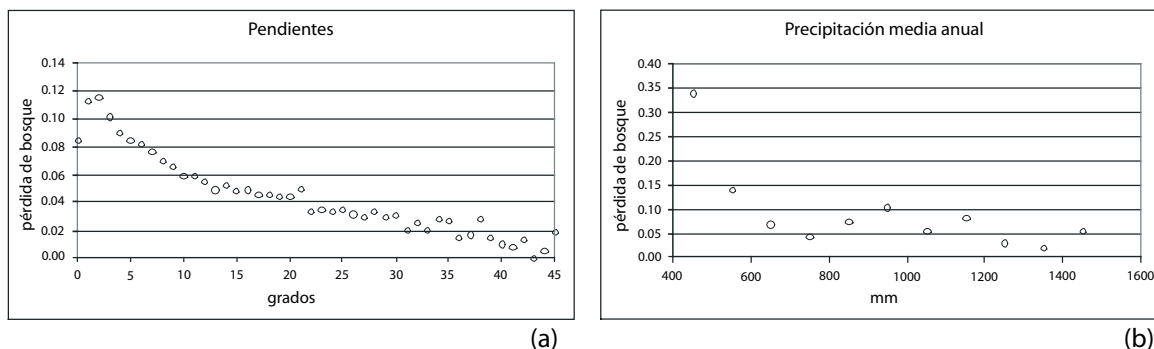


Figura 6. Variables físico-geográficas del modelo total de bosque.

tipo de bosques. Las áreas del municipio de Valle de Bravo al oeste del estado es un ejemplo de lo anterior. Algunas zonas montañosas que se ubican entre los valles de México y Toluca presentan también esta característica.

El coeficiente de la variable fragilidad ecológica es negativo, lo que es de esperarse ya que los bosques de coníferas son uno de los ecosistemas más protegidos en el Plan de Ordenamiento Ecológico del Territorio del Estado de México (GEM, 1999).

La precipitación y la pendiente se muestran similares al anterior modelo, no así la altitud, cuya relación ha cambiado de sentido, es decir, conforme aumenta la altitud, aumenta la pérdida de bosque. Esto se debe a que los bosques de coníferas se ubican en las mayores altitudes que tiene el Estado de México (alrededor de los 3 000 msnm).

En cuanto al modelo aplicado al bosque de latifoliadas, las variables de proximidad muestran coeficientes negativos con excepción de la distancia

a localidades marginadas que es positivo, lo que indica que este tipo de bosque en particular no sufre pérdidas en áreas cercanas a este tipo de localidades.

La fragilidad ecológica muestra un sentido positivo, que demuestra la influencia de este factor en el proceso de deforestación. Los coeficientes de las variables precipitación, pendiente y altitud mantienen un sentido negativo como en el modelo anterior.

Los resultados del modelo del bosque mesófilo de montaña muestran que cuando aumenta en una unidad la distancia a zonas agrícolas y la distancia a zonas urbanas, la pérdida de bosque disminuye, lo que quiere decir que las pérdidas de bosque mesófilo de montaña se dan en zonas próximas a estas áreas, sobre todo en las primeras, ya que la fuerza de la relación con la variable dependiente es mayor.

Los valores de los coeficientes de la distancia a localidades marginadas y distancia a vías tienen un sentido positivo. Un aumento en una unidad de estas distancias aumenta la pérdida de bosque mesófilo, lo que revela que la deforestación ya no se da en las cercanías de estas localidades ni cerca de las carreteras. Este tipo de bosques se encuentra en laderas montañosas y barrancas de poca accesibilidad, por lo que se presume sea el motivo de que la deforestación se dé a mayores distancias en estas variables.

La variable fragilidad ecológica presenta nuevamente un coeficiente positivo, lo que indica que estas zonas son propensas a sufrir pérdida de este tipo de bosque. Los coeficientes de la pendiente y altitud se mantienen negativos. No obstante la precipitación tiene un sentido positivo, lo que quiere decir que conforme aumenta la precipitación, es mayor la pérdida de bosque. Esto se debe a que este tipo de bosques se encuentra protegido de los vientos y de la excesiva insolación, formando neblinas durante todo el año que provocan mayor precipitación y lo mismo sucede en las áreas de barrancas donde existen mayores condiciones de humedad.

El modelo del bosque mixto presenta valores negativos en sus coeficientes de distancia a zonas agrícolas y distancia a vías, lo que significa que cuando aumenta la distancia de estas variables, disminuye la pérdida de bosque, es decir, también sucede el fenómeno de la expansión de la frontera

agrícola en este caso a costa del bosque mixto. Asimismo, los valores de los coeficientes de la distancia a localidades marginadas y distancia a zonas urbanas son positivos. Un aumento en una unidad de estas distancias aumenta la pérdida de bosque, lo que revela que la deforestación no se da en las cercanías de estas localidades ni próximas a las zonas urbanas.

La fragilidad ecológica tiene un coeficiente positivo, lo que sigue demostrando su gran influencia en la pérdida de bosque. Las variables precipitación, pendiente y altitud mantienen sus coeficientes negativos como se observa en el modelo conjunto, que tal y como se ha demostrado en el apartado de total de bosque, éste y el bosque mixto mantienen una estrecha relación en estas tres variables.

Finalmente, para contrastar la capacidad explicativa se utilizó el parámetro ROC. Los resultados obtenidos no difieren mucho entre los modelos, excepto en el bosque mesófilo de montaña, el cual presenta el valor más alto (0.9113). Lo anterior significa que la pérdida de este tipo de bosque está muy bien explicada por las ocho variables independientes. Lo mismo sucede con el bosque mixto que tiene un valor de 0.8012. Por su parte, el bosque de latifoliadas y el de coníferas presentan valores ROC similares (0.7388 y 0.7866, respectivamente), no siendo valores muy altos, pero sí significativos. El modelo conjunto tiene un valor de 0.7315, lo que indica un buen ajuste de los datos. La Figura 7 muestra las curvas ROC de cada uno de los modelos generados y las curvas teóricas a modo de comparación. En ellas se aprecia claramente el mejor ajuste del bosque mesófilo de montaña y en menor medida el modelo conjunto.

## CONCLUSIONES

El análisis revela que en un periodo de nueve años el Estado de México perdió 3 836 ha de bosque de coníferas, 7 295 ha de bosque de latifoliadas, 309 ha de bosque mesófilo de montaña y 2 250 ha de bosque mixto, sumando un total de 13 691 ha de pérdida de estas coberturas. Se destaca la metodología de Pontius *et al.*, (2004), que contribuyó a entender el intercambio y las transiciones sistemá-



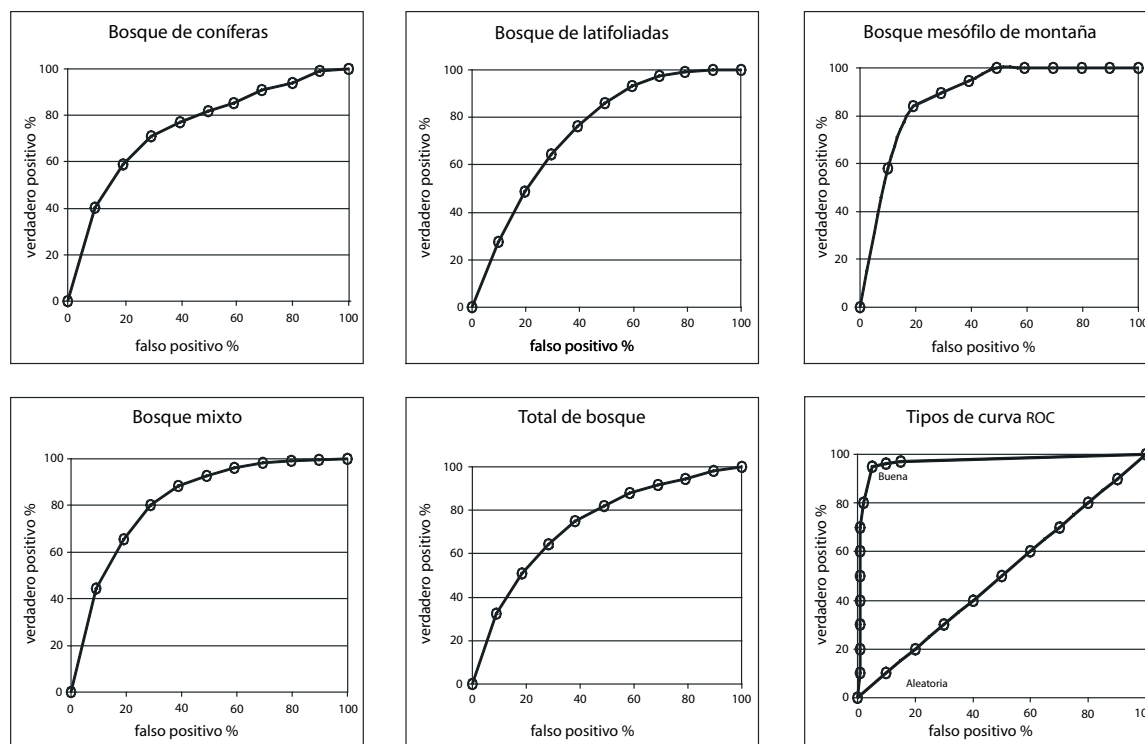


Figura 7. Curvas ROC de los modelos de regresión logística.

tics más significativas de las cuatro categorías de bosque. De igual manera es importante señalar la relativa facilidad con la que esta metodología puede ser aplicada en el módulo *Land Change Modeler* de IDRISI Andes. Los resultados demuestran que los bosques templados del Estado de México están sufriendo procesos de deforestación y en algunos casos recuperación de los mismos. Por lo que es trascendental realizar estudios a mayor detalle que ayuden a describir y explicar el grado de deterioro o recuperación relativo a cada categoría forestal.

En cuanto al análisis de los factores que presentan relación con el proceso de la deforestación en todos los modelos de regresión lineal múltiple, destaca la población que habla alguna lengua indígena, sin embargo, lo anterior no es suficiente para concluir que los procesos de deforestación en el Estado de México se deban sólo a esta variable. Prueba de ello son los valores de los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) que arrojan los modelos de regresión, lo que muestra, salvo el primer modelo, un bajo porcentaje de explicación de este fenómeno.

Estos resultados señalan que estos procesos no pueden explicarse únicamente con este tipo de variables, ya que las causas que lo provocan son aún más complejas. Por otra parte, los modelos de regresión logística arrojaron valores ROC aceptables. En todos los modelos se observa que las pérdidas se dan en áreas boscosas más próximas a las zonas agrícolas, lo que de alguna manera confirma el fenómeno de la expansión agrícola. La variable fragilidad ecológica tiene una actuación muy similar en todos los modelos, lo anterior revela que la pérdida de bosque se presenta en áreas con alta fragilidad ecológica.

Con la aplicación de los modelos de regresión lineal múltiple y los de regresión logística se confirma la importancia y la utilidad del uso de variables socioeconómicas a nivel municipal y de variables ambientales a nivel de píxel. Sin embargo, se deben explorar mecanismos para sortear problemas como la pérdida de información debido a la agregación, la autocorrelación espacial, la reexpresión de variables estadísticas, entre otras. Lo anterior y el uso de los

SIG servirán para conocer y explicar de manera holística la pérdida de la masa forestal, intentando aproximarnos un poco más a la realidad geográfica de este tipo de procesos, donde la interrelación de factores físicos y humanos se presenta de manera conjunta.

## AGRADECIMIENTOS

Este artículo se elaboró con datos en formato digital de vegetación y uso del suelo de 1993 y 2002 cedidos por el INEGI. Asimismo, el primer autor agradece a la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM) y al Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) por el apoyo financiero recibido para realizar estudios de Doctorado en la Universidad de Alcalá, España. Por su parte, Montserrat Gómez y Joaquín Bosque agradecen la financiación recibida del proyecto SIMURBAN (referencia SEJ2007-66608-C04-01) para realizar su actividad.

## REFERENCIAS

- Agrawal, A. (1995), "Population pressure resource degradation: an oversimplistic equation?", *Unasylva*, 46(2), pp. 50-58.
- Aguilera, B. F. (2006), "Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares", *GeoFocus*, núm. 6, pp. 81-112.
- Alonso P. F., A. Ruiz Luna, J. Turner, C. Berlanga Robles and J. Mitchelson (2003), "Land cover changes and impact of shrimp aquaculture on the landscape in the Ceuta coastal lagoon system, Sinaloa, Mexico", *Ocean and Coastal Management*, no. 46, pp. 583-600.
- Benito de Pando, B. y J. Peñas de Giles (2007), "Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica", *GeoFocus*, núm. 7, pp. 100-119.
- Bocco, G. y M. Mendoza (1999), *Evaluación de los cambios de la cobertura vegetal y uso del suelo en Michoacán (1975-1995). Lineamientos para la ordenación ecológica de su territorio*, Programa SIMORELOS-CONACYT, Informe Técnico, Departamento de Ecología de los Recursos Naturales, Instituto de Ecología- Morelia, UNAM, Morelia.
- Bocco, G., M. Mendoza y O. Masera (2001), "La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 44, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 18-38.
- Bosque, J. (1997), *Sistemas de Información Geográfica*, 2ª. Edición, Rialp, Madrid.
- Bosque, J. y A. Moreno (1994), *Prácticas de análisis exploratorio y multivariante de datos*, Oikos Tau, Barcelona.
- Braimoh, A. K. (2006), "Random and systematic land-cover transitions in northern Ghana", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, no. 113, pp. 254-263.
- Bray, D. B., L. Merino y D. Barry (eds.; 2007), *Los bosques comunitarios de México. Manejo sustentable de paisajes forestales*, INE-SEMARNAT, México [http://www.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id\_pub=532].
- Castillo, S., M. A. García-Gil, G. March, I. J. Fernández, J. C. Valencia, E. M. Osorio y A. Flamenco (1998), *Diagnóstico geográfico y cambios de uso del suelo en la Selva El Ocote, Chiapas. Informe Final*, El Colegio de la Frontera Sur-Fondo Mundial para la Naturaleza WWF México, Biodiversity Support Program, U.S. AID. San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México.
- Cortina, V. S., P. Macario y Y. Ogneva-Himmelberger (1998), "Cambios en el uso del suelo y deforestación en el sur de los estados de Campeche y Quintana Roo, México", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 38, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 41-56.
- Draper, N. R. and H. Smith (1981), *Applied Regression Analysis*, John Wiley and Sons, USA.
- Ebdon, D. (1982), *Estadística para Geógrafos*, Oikos Tau, Barcelona.
- Eastman, R. (2006), *IDRISI Andes. Guide to GIS and Image Processing*, Clark Labs., Worcester, MA. USA.
- Franco, M. S., H. H. Regil García y J. A. B. Ordoñez (2006), "Dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca", *Madera y Bosques*, 12(1), pp. 17-28.
- García, N. H., J. López, R. Moreno, M. Villers y R. García (2000), "Delimitación y caracterización de las tierras con uso inadecuado para la agricultura en el distrito de desarrollo rural 004, Celaya, Guanajuato", *Terra*, vol. 18, núm. 1.
- Geist, H. J. and E. F. Lambin (2001), *What drives tropical deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on sub-national case study evidence*, Louvain-la-Neuve, LUCC International Project Office: 116, Belgium.

- Geoghegan, J., S. Cortina, P. Klepeis, P. Macario, Y. Ogneva-Himmelberger, R. Roy Chowdhury, B. L. Turner II and C. Vance (2001), "Modeling tropical deforestation in the southern Yucatán peninsular region: comparing survey and satellite data", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, no. 85, pp. 25-46.
- GEM (1993), *Panorámica Socioeconómica del Estado de México*, Secretaría de Finanzas y Planeación, Toluca, México.
- GEM (1999), *Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio del Estado de México*, Secretaría de Ecología, Toluca, México.
- INEGI (1990), *XI Censo General de Población y Vivienda 1990 del Estado de México*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (2000), *XII Censo General de Población y Vivienda 2000 del Estado de México*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México [cd-rom].
- INEGI (1991), *VII Censo Ejidal del Estado de México*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (2001), *VIII Censo Ejidal del Estado de México*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México [cd-rom].
- INEGI (2005), *Conteo de Población y Vivienda del Estado de México*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México [cd-rom].
- Isaac-Márquez, R., B. De Jong, A. Eastmond, S. Ochoa-Gaona y S. Hernández (2005), "Estrategias productivas campesinas: un análisis de los factores condicionantes del uso del suelo en el oriente de Tabasco, México", *Universidad y Ciencia*, vol. 21, núm. 42, pp. 56-72.
- Kummer, D. M. and B. L. Turner (1994), "The human causes of deforestation in Southeast Asia", *BioScience*, no. 44, pp. 5323-5328.
- Lambin, E. F. (1997), *Modelling deforestation processes: a review tropical ecosystem environment observations by satellites*, European Commission Joint Research Centre- Institute for Remote Sensing Applications-European Space Agency, Luxembourg, TREE Series B., Research Report No. 1.
- Lambin, E. F., N. Baulies, G. Bockstael, T. Fisher, R. Krug, E. F. Lemmans, R. R. Moran, Y. Rindfuss, D. Sato, B. L. Skole, Turner II and C. Vogel (1999), *Land use and land cover change implementation strategy*, IGBP report, 48, IHDP, report 10, Estocolmo.
- Mahar, D. and R. Schneider (1994), "Incentives for tropical deforestation: some examples from Latin America", in Brown, K. and D. Pearce (eds.), *The causes of tropical deforestation*, University College London Press, London, pp. 56-78.
- Mas, J. F., V. Sorani y R. Álvarez (1996), "Elaboración de un modelo de simulación del proceso de deforestación", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. esp. 5, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 43-57.
- Mas, J. F. et H. Puig (2001), "Modalités de la déforestation dans le Sud-Ouest de l'état du Campeche, Mexique", *Canadian Journal of Forest Research/Journal Canadien de Recherche forestière*, 31, pp. 1280-1288.
- Mas, J. F., H. Puig, J. L. Palacio y A. Sosa (2003), "Un modelo espacial de riesgo de deforestación", *Anais XI SBSR*, Belo Horizonte, Brasil, pp. 1357-1363 [cd-rom].
- Mendoza, E. and R. Dirzo (1999), "Deforestation in Lacandonia (southeast Mexico): evidence for the declaration of the northernmost tropical hot-spot", *Biodiversity and Conservation*, 8, Netherlands, pp. 1641.
- Meyer, W. B. and B. L. Turner (1992), "Human population growth and global land-use/cover change", *Annual Review of Ecology and Systematics*, no. 23, pp. 39-61.
- Nagendra, H., D. K. Munroe and J. Southworth (2004), "From pattern to process: landscape fragmentation and the analysis of land use/land cover change", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, no. 101, pp. 111-115.
- Orozco, H. E., V. Peña, R. Franco y N. Pineda (2004), "Atlas Agrario Ejidal del Estado de México", *Cuadernos de Investigación*, núm. 34, UAEM, Toluca, México.
- Palacio, J. L., G. Bocco, A. Velázquez, J. F. Mas, F. Takaki, A. Victoria, L. Luna, G. Gómez, J. López, M. Palma, I. Trejo, A. Peralta, J. Prado, A. Rodríguez, R. Mayorga y F. González (2000), "La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del inventario forestal nacional 2000", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 43, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 183-203.
- Plata, R.W. (2007), *Descripción del crecimiento urbano en la comunidad de Madrid en el periodo 1987-2000 y una aproximación al análisis de factores explicativos*, Tutelado del Doctorado en Cartografía, SIG y Teledetección, Universidad de Alcalá.
- Pontius, R. G., E. Shusas and M. McEachern (2004), "Detecting important categorical land changes while accounting for persistence", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101(2-3), pp. 251-268.
- Ramírez, M. I. y R. Zubieta (2005), *Análisis regional y comparación metodológica del cambio en la cubierta forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca*, Reporte Técnico preparado para el Fondo para la Conservación de la Mariposa Monarca, México.

- Reyes, H. H., S. Cortina, H. Perales, E. Kauffer y J. M. Pat-Fernández (2003), "Efecto de los subsidios agropecuarios y apoyos gubernamentales sobre la deforestación durante el período 1990-2000 en la región de Calakmul, Campeche, México", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 51, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 88-106.
- Rosero-Bixby, L. and A. Palloni (1998), "Population and deforestation in Costa Rica", *Population and Environment*, vol. 20(2), pp.149-185.
- Serra, P. D., D. Sauri and X. Pons (2003), *Modelling land cover and land use changes and their driving forces with regression methods. Combining spectral, socioeconomic and biophysical factors*, Framing Land Use Dynamics Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University, The Netherlands.
- Soares-Filho, B. S., G. Coutinho and C. Lopes (2002), "DINAMICA a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier", *Ecological Modelling*, no. 154, pp. 217-235.
- Southgate, D. and M. Basterrechea (1992), "Population Growth, Public Policy, and Resource Degradation: the Case of Guatemala", *Ambio*, 21:7, pp. 460-464.
- Skole, D. L., H. Chomentowski, W. A. Salas and A. D. Nobre (1994), "Physical and human dimensions of deforestation in Amazonia", *BioScience*, no. 44, 5, pp. 314-322.
- Velázquez, A., J. F. Mas, G. J. Díaz, S.R. Mayorga, P. C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra y J. L. Palacio (2002), "Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México", *Gaceta Ecológica*, núm. 62, INE, México, pp. 21-37.
- Walter, B. and W. Steffen (1997), "The terrestrial biosphere and global change: implications for natural and managed ecosystems", A synthesis of GCTE and related research, IGBP Science 1, Int. Geosph.-Biosph. Program., Stockholm.
- Yang, X. and C. P. Lo (2002), "Using a time series of satellite imagery to detect land use and land cover changes in the Atlanta, Georgia metropolitan area", *Int. J. Remote Sensing*, 23(9), pp. 1775-1798.