
ARTÍCULOS

ANÁLISIS DE LOS FACTORES INDUCTORES DE LOS CAMBIOS OCURRIDOS EN LA SUPERFICIE FORESTAL DEL ESTADO DE MÉXICO EN EL PERÍODO 1993-2000

Noel Bonfilio Pineda Jaimes¹, Joaquín Bosque Sendra²,
Montserrat Gómez Delgado³ y Roberto Franco Plata⁴

^{1,4}Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México

^{2,3}Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá

RESUMEN

El objetivo del trabajo es conocer y relacionar las causas que han inducido la pérdida de la superficie forestal en el estado de México. Para realizar el análisis se emplea la regresión lineal múltiple utilizando como variables independientes información a nivel municipal, así como la regresión logística para analizar a nivel de píxel la influencia que tienen algunos factores sobre la pérdida de la masa forestal.

Palabras clave: regresión lineal, regresión logística, estado de México.

ABSTRACT

The goal of this paper is to relate the causes inducing forest surface loss in Mexico State. Two methods are used: Multiple linear regression for variables at the municipal level, and Logistic regression for variables at pixel level.

Key words: lineal regression, logistic regression, Mexico state.

Fecha de recepción: octubre 2009.

Fecha de aceptación: mayo 2011.

I. INTRODUCCIÓN

El análisis de los cambios de la ocupación y uso del suelo en cualquier territorio conlleva comprender como interactúan los diversos factores socioeconómicos y biofísicos que en él se encuentran. En el caso de las superficies boscosas, ya sean tropicales o templadas, los cambios se deben a diversas causas y factores (Lambin, 1997; Bocco *et al.* 2001). Los impactos más evidentes provocados por estas transformaciones del territorio se manifiestan con mayor regularidad en el clima, la hidrología y en la calidad de los suelos, la carencia de alimentos, el riesgo a enfermedades y la pérdida de la biodiversidad (Chhabra *et al.* 2006).

El estudio de estos temas no es reciente, pero en los últimos años los estudios sobre sostenibilidad ambiental han provocado que recobre su importancia. Un ejemplo es el proyecto LUCC (*Land-Use and Land Cover Change*) que desde hace más de una década ha contribuido de manera relevante al estudio de las causas y efectos del cambio de la ocupación y uso del suelo, entre ellos la deforestación (Lambin y Geist, 2006).

Las causas que inducen estos cambios se subdividen generalmente en dos grupos: a) causas directas y b) causas indirectas. Las causas directas son actividades y acciones que afectan de manera inmediata al uso del suelo, por ejemplo, la extracción de madera o la construcción de caminos. Mientras que las causas indirectas son factores fundamentales que sostienen las causas directas como los factores demográficos, económicos, tecnológicos, institucionales y culturales (Geist y Lambin 2001; Verburg *et al.* 2004).

En la actualidad existen numerosas técnicas empíricas para explorar, explicar y predecir los cambios de la ocupación y uso del suelo, como el análisis exploratorio de datos, el análisis de regresión, estadísticas bayesianas y redes neuronales artificiales (Lesschen *et al.* 2005). En el caso de los procesos de deforestación, estas técnicas generalmente son usadas para modelar y cuantificar la magnitud de las relaciones entre los factores inductores y la pérdida de la superficie forestal.

En los últimos años la deforestación y alteración de los ecosistemas forestales ha sido preocupante en numerosas regiones de México, lo que ha provocado que diversos sectores en el país se vean involucrados en tareas de evaluación y análisis de este fenómeno. No obstante, algunos reconocen la enorme complejidad que representa estudiar las causas y orígenes de estos procesos (Merino y Segura, 2002). El estado de México no está exento de esta problemática, por ello en el presente trabajo se aplican dos métodos de análisis cuantitativo para comprender los procesos que han provocado la pérdida de la superficie forestal en el estado de México, entendidos éstos como una compleja interacción de factores biofísicos, socioeconómicos, culturales y políticos.

Por lo anterior, este estudio tiene como objetivo principal conocer y relacionar las causas y los factores que han inducido la pérdida de la superficie forestal del estado de México durante el período 1993-2000. Para lograr alcanzar este objetivo se plantean los siguientes objetivos específicos: (1) estimar y ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para cada una de las coberturas forestales, (2) estimar y ajustar un modelo de regresión logística para cada una de las coberturas forestales, y (3) analizar los resultados de estos modelos de regresión, como una forma de comparar dos unidades de observación espacial diferentes.

II. ESTADO DE LA CUESTIÓN

En los últimos años, la forma de modelar el fenómeno de la deforestación y sus causas ha cobrado gran importancia. Existen numerosas formas de analizar el problema, desde el tipo de modelo, las variables independientes más adecuadas y sobre todo la escala o unidad de análisis. Es claro que según el nivel en que se realice se podrán resolver distintas interrogantes. Para Kaimowitz y Angelsen (1998) las principales escalas utilizadas en los modelos se dividen en micro: individual, familiar y comunal; meso: municipal, estatal y regional; y macro: nacional y mundial.

Uno de los primeros trabajos realizados en México a nivel nacional es el de Deininger y Minten (1996), quienes estiman los efectos que tienen sobre la deforestación algunos factores como la pobreza, las políticas gubernamentales y la tenencia de la tierra. Utilizan información agregada de aproximadamente 2.400 municipios del país de 1980 y 1990. Para estimar el modelo se aplica un método de regresión por mínimos cuadrados ordinarios. Los resultados muestran que los créditos bancarios, los precios de la madera y los niveles de pobreza tienen una relación fuerte y positiva, mientras que la asistencia técnica, las áreas naturales protegidas y la población indígena tienen una relación negativa, resultando insignificante en el modelo la variable que valora la tenencia de la tierra.

Un trabajo más reciente es el de Alix-García (2007), que investiga los efectos que tiene la cooperación y la forma de organización en las comunidades de propiedad comunal sobre la deforestación. Considera como variable dependiente el cambio en la superficie boscosa de 1994 al 2000, expresada en el número de hectáreas y como porcentaje del área total del ejido. Utiliza modelos de regresión lineal múltiple con variables independientes de tipo económico, cooperación y biofísicas. Los resultados muestran que los precios de la madera y el tamaño del ejido tienen una relación fuerte y positiva, mientras que las variables de cooperación como la participación en las asambleas ejidales y la pendiente resultaron negativas.

Existen otros estudios a nivel nacional que utilizan sobre todo modelos de regresión logística, con variables independientes de tipo biofísico, de proximidad e institucionales. En estos trabajos parece ser que los factores más relacionados con la deforestación son la distancia a carreteras y el grado de protección legal donde se ubican los bosques (Chaves y Rosero, 2001; Mas *et al.* 2002; Verburg *et al.* 2004).

A un nivel más regional, Bocco *et al.* (2001) analizan los procesos de deforestación ocurridos en el estado de Michoacán, México. Utilizando algunas variables demográficas y económicas a nivel municipal elaboran un modelo de regresión múltiple, con el fin de estudiar los cambios ocurridos en la cobertura forestal entre 1973 y 1993. Los resultados de los modelos no son muy robustos por lo que los autores concluyen que las hipótesis que sugieren cambios debido a presión demográfica o factores ligados a necesidades de subsistencia no operan a escala regional.

Por su parte, Pineda *et al.* (2009), utilizan técnicas de regresión multivariantes para analizar los procesos de deforestación ocurridos en el estado de México. No obstante la similitud en las técnicas estadísticas aplicadas, la fuente de los datos y el periodo de estudio son diferentes a los utilizados en el presente trabajo. Además, el número de variables empleadas es menor y no incluye en sus modelos a la selva baja caducifolia, categoría que ha presentado pérdida de superficie muy importante. En cuanto a los resultados, los modelos de regresión lineal múltiple sugieren que la población que habla alguna lengua indígena está relacionada

con algún proceso de deforestación, pero el bajo porcentaje de explicación de los mismos indica que no es una variable concluyente para explicar este fenómeno. En los modelos de regresión logística se observa que las pérdidas se dan en áreas boscosas más próximas a las zonas agrícolas y en áreas con alta fragilidad ecológica.

De igual forma, Blackman *et al.* (2003) utilizan modelos de regresión múltiple para investigar cuáles son los factores biofísicos, socioeconómicos, institucionales y de proximidad que provocan la deforestación del bosque en zonas de café de sombra en la sierra sur de Oaxaca, México. El estudio intenta comprender las consecuencias de estos procesos antes y después de la crisis cafetalera ocurrida en 1993. Los resultados indican que los factores de proximidad y algunas variables relacionadas con la tenencia de la tierra expresan mejor los patrones de deforestación en la zona.

Un estudio realizado en la zona de la Reserva de la Biosfera de Calakmul, Campeche, México, señala, a través de modelos de regresión logística, como algunas variables socioeconómicas y de financiamiento se comportan de forma diferente en ejidos que se ubican dentro y fuera de las áreas protegidas (Reyes *et al.* 2003). Otro estudio en la misma zona, demuestra con un modelo de regresión múltiple como las variables independientes pueden tener un efecto distinto sobre los procesos de deforestación cuando se aplican en dos escalas diferentes (Chowdhury, 2006).

Es cierto que no sólo se han desarrollado modelos y metodologías para tratar de explicar los cambios de la cobertura forestal; también existen los que tratan de explicar los cambios ocurridos en otros usos y coberturas del suelo. Es el caso del trabajo de Isaac-Márquez *et al.* (2005), que analiza, mediante análisis de regresión múltiple, los factores que condicionan el uso del suelo y las implicaciones que tienen para la conservación de la selva en el oriente del estado de Tabasco, México. Con datos obtenidos a través de encuestas y de otras fuentes se demuestra que los factores biofísicos son los primeros condicionantes del uso del suelo a una escala regional, mientras que las políticas públicas, el mercado del ganado y la dinámica histórica del uso del suelo dirigen el proceso a una escala local.

Sandoval y Oyarzun (2004), determinan mediante un análisis de regresión logística la probabilidad de cambio de diferentes tipos de uso del suelo en una región de Chile. El trabajo concluye que las variables más correlacionadas con la ocurrencia del cambio de manera significativa son el tamaño de la propiedad, el uso actual y el uso potencial del suelo, mientras que las variables orientación, distancia a caminos y distancia a plantaciones forestales muestran una menor significación estadística.

Por su parte Pan *et al.* (2004) examinan los patrones espaciales del cambio de uso y cobertura del suelo a nivel de finca en la Amazonia ecuatoriana. Usando variables socioeconómicas, biofísicas y de accesibilidad desarrollaron un modelo de regresión lineal mixto generalizado. Los resultados del modelo indican que el rápido crecimiento de la población ha provocado una subdivisión importante de las parcelas, que su vez ha creado una mayor complejidad y fragmentación del paisaje.

Son muy escasos los estudios de cambio de ocupación y uso del suelo que utilizan dos unidades de observación espacial diferentes. Uno de ellos es el de Serra *et al.* (2005) quienes utilizan técnicas de regresión múltiple y de regresión logística como parte de una metodología para analizar la dinámica del paisaje. Los resultados encontrados en este trabajo mostraron que las variables más significativas son las biofísicas. Sin embargo, el trabajo advierte

que el número de casos utilizados en la regresión múltiple puede provocar coeficientes sesgados, mientras que el principal problema detectado en la regresión logística es la elevada autocorrelación espacial que pueden presentar las variables de tipo socioeconómico.

Como el trabajo anterior, gran parte de los trabajos revisados utilizan al municipio como unidad de observación espacial, aunque también hay quien emplea el píxel como unidad de análisis. Por todo lo anterior, en este artículo se plantea la necesidad de utilizar ambos métodos de análisis como una forma de entender y comprender los procesos y factores que se relacionan con la pérdida de la cobertura forestal en el estado de México.

III. MATERIAL Y MÉTODOS

En el presente artículo se aplican dos de los métodos de análisis más utilizados en este tipo de estudios, según se deriva de la revisión realizada en el apartado anterior. En primer lugar se emplea la regresión lineal múltiple utilizando información socioeconómica y biofísica como variables independientes, todas ellas referidas al municipio como unidad de observación espacial. En segundo lugar se analizó la influencia de algunos factores que conducen la pérdida de la cobertura forestal, utilizando el píxel como unidad de observación espacial. Se estimaron modelos de regresión logística en función de una serie de características socioeconómicas y biofísicas.

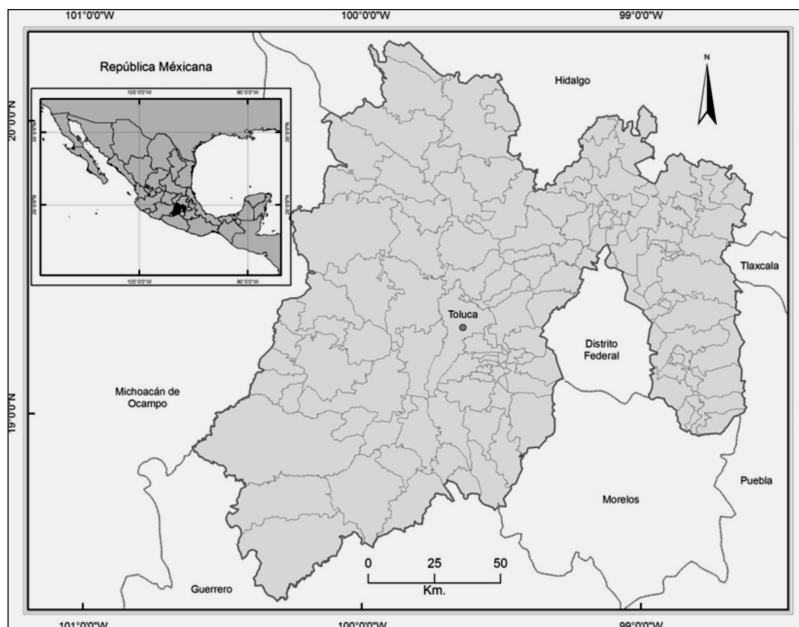
1. Área de estudio

El estado de México se localiza entre los paralelos 18° 21' y 20° 17' de latitud Norte y los 98° 35' y 100° 36' de longitud Oeste, con una altitud promedio de 1.750 metros, lo que lo convierte en una de las regiones más elevadas del país (figura 1). Tiene una superficie de 22 274.97 km² que representa el 1.1% del total nacional (GEM, 1993).

La zona de estudio tiene importantes recursos forestales constituidos principalmente por bosques templados, los cuales ocupan un 27% del total de la superficie estatal. Este tipo de bosques tiene una distribución variada ya que es posible encontrarlo en la parte centro, este y oeste del estado. Por su parte las selvas bajas se localizan en la parte suroeste, colindan con los estados de Guerrero y Michoacán y ocupan el 5% de la superficie estatal total.

En los últimos años, por desgracia, los bosques de la región estudiada han sufrido una disminución en su cobertura en beneficio de otras ocupaciones y usos del suelo, perdiendo con ello una gran parte de la capacidad protectora, reguladora y productiva que deberían tener. Algunos datos de cambio de ocupación y uso del suelo indican que en un período de nueve años (1993-2002), se perdieron 13.690 ha de bosques templados y 2.129 ha de selva baja, mientras que las zonas agrícolas y los asentamientos humanos aumentaron 48.789 ha y 7.792 ha respectivamente (Pineda *et al.* 2009). Estos procesos de cambio, y en especial la deforestación, han 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). No deja de ser importante que en la actualidad el estado de México es la entidad más poblada del país, con 14 007 495 habitantes (de acuerdo con los datos del INEGI en 2005). Lo anterior se debe en gran parte al proceso de expansión que ha sufrido durante las últimas décadas la ciudad de México.

Figura 1
LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTADO DE MÉXICO



2. Los datos

En este trabajo se tomaron como base de referencia dos mapas digitales de coberturas forestales escala 1:250 000 cedidos por el Instituto Nacional de Ecología (INE). La base cartográfica comprende un mapa de 1993 denominado serie II, elaborado por el INEGI, y otro mapa del año 2000 correspondiente al Inventario Nacional Forestal 2000 (IFN2000) elaborado por el propio INE en convenio con el Instituto de Geografía (IG) de la UNAM (Figura 2).

Las ventajas con respecto a la cartografía utilizada por Pineda *et al.* (2009), es la mejor calidad temática y geométrica, tanto de la serie II como de la cobertura IFN2000, así como una estrategia de compatibilidad entre cada base de datos para que pudieran ser comparables estadística y cartográficamente (Velázquez *et al.* 2002). Sin embargo, una desventaja es que el período de estudio es más corto en el presente trabajo.

A diferencia de otros estudios revisados, en este trabajo se decidió realizar un análisis exploratorio de los datos y se resolvió utilizar como variables dependientes las pérdidas del bosque de coníferas, del bosque de latifoliadas, del bosque mixto, de la selva baja caducifolia y las pérdidas totales de bosque y selva en su conjunto. Las variables dependientes fueron transformadas a valores de porcentaje en proporción a los bosques y selvas de 1993. Se descartaron las pérdidas menores a 10 ha por considerarse irrelevantes para este estudio (Figura 3).

Figura 2
MAPAS DE COBERTURAS FORESTALES DE 1993 Y 2000 DEL ESTADO DE MÉXICO

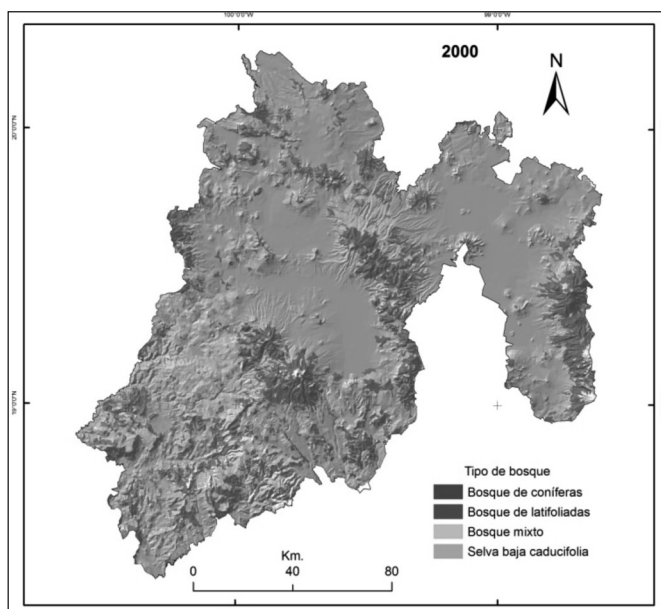
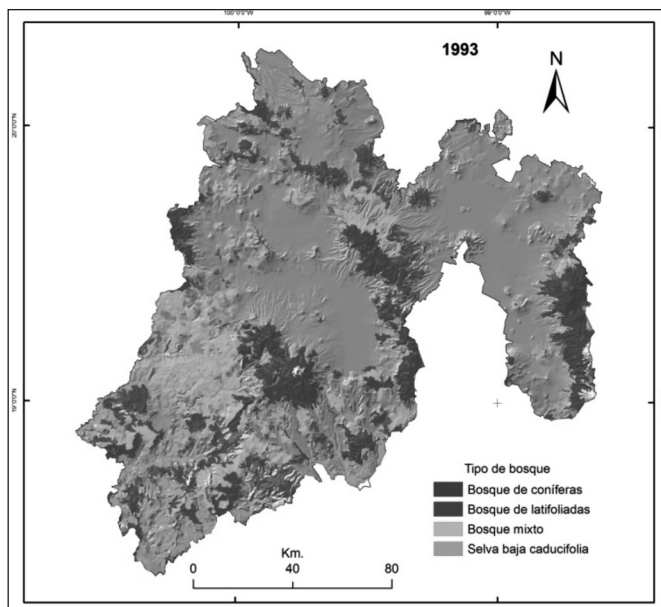
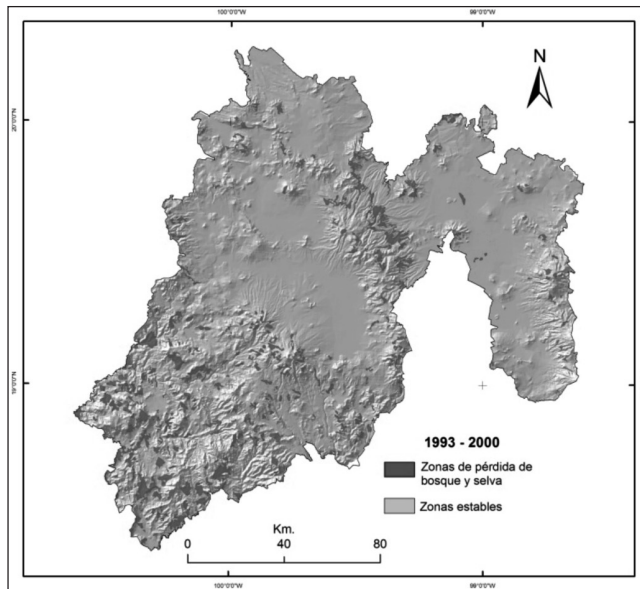


Figura 3
PÉRDIDAS DE BOSQUES Y SELVA ENTRE 1993 Y 2000 EN EL ESTADO DE MÉXICO



Para comprender cuáles son los principales factores que han incidido en el proceso de pérdida de bosques y selvas en la zona de estudio, se recopilieron datos estadísticos a nivel de municipio, por lo que se determinó desagregar la información en dos unidades espaciales: a nivel municipal y a nivel de píxel.

De acuerdo a la información obtenida se seleccionaron 80 variables potenciales que representarían los factores relacionados con la pérdida de cobertura forestal. Con estas variables se realizó análisis de correlación de *Pearson*, con el fin de medir la intensidad de la asociación entre las variables explicativas. Con este método finalmente se seleccionaron 38 variables no correlacionadas entre sí y con mayor poder explicativo.

Tomando en consideración estudios previos sobre el tema y la clasificación de Geist *et al.* (2006), se organizaron las variables en seis grandes grupos: a) socioeconómicas, b) tenencia de la tierra, c) disponibilidad de crédito y subsidios, d) producción forestal, e) biofísicas y f) proximidad (tabla 1). Si bien se buscó que las variables independientes estuvieran relacionadas con la mayor cantidad de factores, la limitación de información no permitió incluir factores relacionados con los aspectos tecnológicos.

El primer grupo de variables independientes describe los aspectos socioeconómicos. Usando la variación que tuvo la población entre dos fechas se intentó encontrar la relación entre la pérdida de la superficie forestal y la presión demográfica. Para evaluar de alguna forma el impacto cultural y los niveles de pobreza que existen en la zona de estudio, se emplearon las variables que miden la variación de la población indígena, la población que se dedica a actividades primarias y el índice de marginación a nivel municipal.

Tabla 1
DESCRIPCIÓN DE LAS VARIABLES MEDIDAS A NIVEL MUNICIPAL

Variables	Descripción	Factores	Fuente
Dependientes			
PBCON	Pérdida de bosque de coníferas entre 1993 y 2000		1
PBLAT	Pérdida de bosque de latifoliaidas entre 1993 y 2000		1
PBMIX	Pérdida de bosque mixto entre 1993 y 2000		1
PSBC	Pérdida de selva baja caducifolia entre 1993 y 2000		1
PTOTAL	Pérdida total de bosques y selvas entre 1993 y 2000		1
Independientes			
Socioeconómicas			
POBTOT	Variación de la población (1990 y 2000)	d	2
DENPOB	Densidad de población (1990 - 2000)	d	2
PHLIND	Variación de la población que habla alguna lengua indígena (1990 y 2000)	g	2
PEAPR	Variación de la población económicamente activa con actividades primarias (1990 y 2000)	d	2
VIULCC	Variación del número de viviendas que usan leña como combustible (1990 y 2000)	c	2
HOEUSA	Porcentaje de hogares con emigrantes en USA (1995)	d	2
INMARG	Índice de marginación municipal (1995)	e	3
Tenencia de la tierra			
SUPTOEJI	Variación en la superficie total de ejidos (1990 y 2000)	b	4
EJIACAG	Variación del número de ejidos con actividades agrícolas (1991 y 2001)	b	4
EJIACGA	Variación del número de ejidos con actividades ganaderas (1991 y 2001)	b	4
EJIACRE	Variación del número de ejidos con actividades recreativas (1991 y 2001)	b	4
EJIACFO	Variación del número de ejidos con actividades forestales (1991 y 2001)	b	4
SUPTICOM	Porcentaje de superficie de tierras con régimen social (1991)	f	5
SUPTIPRIV	Porcentaje de superficie de tierras con régimen privado (1991)	f	5
Disponibilidad de crédito y subsidio			
UPAGCREB	Porcentaje de unidades de producción agroforestal con créditos bancarios (1991)	f	5
UPAGSUBP	Porcentaje de unidades de producción agroforestal con subsidios del PRONASOL (1991)	f	5
Producción forestal			
PASYCAR	Variación de la producción de los aserraderos y carpinterías (1993 y 1998)	c	6
PINMUMA	Variación de la producción de las industrias de muebles de madera (1993 y 1998)	c	6
PINCYPP	Variación de la producción de las industrias de celulosa papel (1993 y 1998)	c	6
AUTAPFO	Porcentaje de autorizaciones para aprovechamiento forestal (1998 y 1999)	f	6
Biofísicas			
PPANAPO	Porcentaje de píxeles en áreas naturales protegidas	f	7
PPAMEN1500	Porcentaje de píxeles con altitud menor a 1500 metros	h	8
PPA1501-2500	Porcentaje de píxeles con altitud entre 1500 y 2500 metros	h	8
PPA2501-3500	Porcentaje de píxeles con altitud entre 2501 y 3500 metros	h	8
PPAMAY3500	Porcentaje de píxeles con altitud mayor a 3500 metros	h	8
PPPEMEN15	Porcentaje de píxeles con pendiente menor a 15%	h	8
PPPE15-30	Porcentaje de píxeles con pendientes entre 15 y 30%	h	8
PPPEMAY30	Porcentaje de píxeles con pendiente mayor a 30%	h	8
PPAAPAS	Porcentaje de píxeles de áreas con alto potencial agrícola de los suelos	h	9
PPABPAS	Porcentaje de píxeles de áreas con bajo potencial agrícola de los suelos	h	9
PPANPAS	Porcentaje de píxeles de áreas con nulo potencial agrícola de los suelos	h	9
Proximidad			
DMANAPO	Distancia media a áreas naturales protegidas	f	7
DMAAGR	Distancia media a áreas agrícolas	b	1
DMAPAS	Distancia media a áreas de pastizal	b	1
DMHIDRO	Distancia media a hidrografía	h	9
DMCARRE	Distancia media a carreteras federales y estatales	a	9
DISTLOCMA	Distancia media a localidades con menos de 2500 habitantes	a	9

FACTORES

- a = Ampliación de infraestructuras
- b = Expansión agrícola
- c = Extracción de madera
- d = Demográficos
- e = Económicos
- f = Políticos e institucionales
- g = Culturales
- h = Otros factores

FUENTE

- 1 = Elaboración propia a partir de datos del INE.
- 2 = Censos de Población y Vivienda de 1990 y 2000. INEGI
- 3 = Datos del Colegio Mexiquense a partir de datos del COESPO
- 4 = Censos Ejidales de 1991 y 2001. INEGI
- 5 = Censo Ejidal de 1991. INEGI
- 6 = Censos Económicos de 1994 con datos referentes a 1993. INEGI
- 7 = Elaboración propia a partir de datos de la SEMARNAT
- 8 = Elaboración propia a partir del MDT escala 1:250 000. INEGI
- 9 = Elaboración propia a partir de datos del Colegio Mexiquense

El segundo grupo busca encontrar la relación entre la pérdida de bosque y/o selva y algunas variables que miden la expansión agrícola y ganadera. Las variables que miden el porcentaje de superficie de tierras con régimen comunal y privado buscan encontrar como los derechos sobre la tenencia de la tierra afectan de manera indirecta en la pérdida de bosques y selvas. Con el tercer grupo se trata de investigar como las políticas gubernamentales, particularmente las de fomento productivo, pueden inducir a los agentes a cambiar ciertos usos del suelo específicos.

Las variables del cuarto grupo buscan de manera directa encontrar la relación entre la extracción de madera comercial de manera legal y la eliminación de la superficie forestal. El aumento, o en su caso disminución de la producción de la industria maderera, determinará si afecta o no a las áreas boscosas de la entidad.

Los aspectos biofísicos son considerados como otros factores que pueden condicionar los usos y coberturas del suelo de modo mixto, ya que algunas veces actúan de manera directa y otras lo hacen de forma indirecta. En el caso de la altitud, se obtuvieron cuatro rangos altitudinales de acuerdo a la fisiografía del estado. Los rangos de pendiente se obtuvieron tomando en consideración el relieve y características topográficas de la entidad, así como la distribución de los bosques y selvas. La variable que mide el potencial agrícola de los suelos busca correlacionar como la calidad de suelo puede influir en el cambio de la cobertura del suelo.

Finalmente las variables de proximidad medidas en distancias euclidianas buscan la relación de la ampliación de la frontera agrícola y de las infraestructuras como las carreteras y los asentamientos humanos con la pérdida de bosque y selva.

3. Técnicas de análisis

A) Regresión Lineal Múltiple (RLM)

La RLM está basada en el ajuste de una ecuación lineal a un conjunto de datos y es una de las más empleadas y usuales en todas las ciencias (Bosque y Moreno, 1994).

Se realizó un análisis de correlación de *Pearson* entre todas las variables explicativas, descartando aquellas que presentaron valores de correlación mayores a 0.80 (Bocco *et al.* 2001). También y debido a que algunos de los casos (municipios) tienen un porcentaje de pérdida igual a cero, las variables dependientes fueron normalizadas mediante una función logarítmica $\ln(y_i+1)$, buscando con esta transformación una mayor certeza en la linealidad de los modelos (Pérez, 2005; Montgomery *et al.* 2005).

La robustez de cada uno de los modelos fue validada de la siguiente manera: la ausencia de multicolinealidad se verificó utilizando el índice de tolerancia y el factor de inflación de la varianza (FIV). Según Pérez (2005) un FIV grande y un índice de tolerancia pequeño pueden indicar posible presencia de colinealidad. Para verificar la correlación serial de los residuos se aplicó la prueba de Durbin Watson, que establece un valor cercano al 2 para evitar problemas de autocorrelación.¹

1 El estadístico Durbin-Watson toma valores entre 0 y 4: alrededor de 2 indica no presencia de correlación serial; cercano a 0 autocorrelación positiva; y, cercano a 4 autocorrelación negativa. Usualmente se considera que entre 1,5 y 2,5 debería existir independencia entre los residuos.

Si bien la RLM es un método frecuentemente usado en los modelos de cambio de uso y cobertura del suelo (Lesschen *et al.* 2005), muestra limitaciones cuando se aplica a datos espaciales. Los resultados obtenidos mediante estos métodos son estadísticas que se aplican a nivel «global», lo que significa que los resultados obtenidos mediante estos métodos son un conjunto de relaciones que se comportan de manera similar en el territorio (Fotheringham *et al.* 2000). En realidad este análisis «global» genera un «promedio» o una «síntesis» de los resultados, lo cual no deja de ser una limitante sobre todo cuando se trata de información de tipo geográfico.

B) *Regresión Logística (RL)*

Esta técnica está indicada en situaciones en las que la variable dependiente toma únicamente dos valores que indican la pertenencia a uno de dos grupos, normalmente etiquetados como 0 y 1 (Menard, 2002). Así también, cuando se almacena, gestiona y representa información geográfica en un SIG raster, se tiene la ventaja de utilizar como unidad de observación espacial al píxel, lo que no sería posible con algún otro método. En muchos de los trabajos revisados sobre cambio de uso del suelo y deforestación, la regresión logística tiene gran aceptación (Rosero-Bixby y Palloni, 1998; Geoghegan *et al.* 2001; Mas *et al.* 2002; Soares-Filho *et al.* 2002; Serra *et al.* 2005), en parte debido a que este método (a diferencia de la RLM) descansa en supuestos estadísticos menos rígidos.

Para construir los modelos de RL se tomó como variable dependiente dicotómica la pérdida de bosque o selva, la cual tomó un valor de 0 cuando un píxel no tenía pérdida de bosque o selva y un valor de 1 cuando sí la tenía. Las mismas variables utilizadas en las regresiones anteriores fueron espacializadas a nivel de píxel, sólo que en este caso el ajuste de los modelos se realizó en un software SIG que tiene como principal limitante el número máximo de variables independientes a utilizar.² Por este motivo se realizó una selección de variables tomando en consideración su grado de correlación y, para evitar problemas de multicolinealidad, se descartaron aquellas variables que tuvieran coeficientes de correlación mayores a 0,80.

Las variables nominales se convirtieron a variables binarias (*dummy*). Aunque su uso puede provocar alguna pérdida de información, esta transformación es imprescindible en un análisis de regresión logística (Ebdon, 1982). La variable FRAG_ECOL (fragilidad ecológica) se codificó con valor 1 para las zonas del territorio que presenta niveles altos de fragilidad en sus ecosistemas y 0 donde no las hay. Esta variable se retomó del Programa de Ordenamiento Territorial del Estado de México y se obtuvo utilizando como indicadores la vegetación, el relieve, la pendiente y tipo de suelo (GEM, 1999). Por su parte la variable correspondiente a las áreas naturales protegidas se separó en los tres tipos de protección más importantes que existen en el estado (estatal, federal y reserva ecológica), con el fin de observar si cada nivel administrativo cumple con la obligación legal de proteger estos espacios naturales.

Las variables dependientes para los modelos de RL fueron: la pérdida de bosque de coníferas, bosque de latifoliadas, bosque mixto, selva baja caducifolia y la suma de los anteriores (conjunto).

² El algoritmo LOGISTICREG de Idrisi Andes acepta como máximo 20 variables independientes incluyendo el intercepto.

La RL es un método similar a la RLM, pero está adaptada para modelos en los que la variable dependiente es dicotómica (expr. 1).

$$\ln\left[\frac{p}{1-p}\right] = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (1)$$

Donde p representa la probabilidad de que un píxel sea transformado a una cobertura o uso diferente al de bosque y selva; x_1, x_2, \dots hasta x_n son las variables explicativas contempladas en el análisis y β son los parámetros estimados por el método de regresión logística.

Los coeficientes de RL pueden utilizarse para estimar la razón de las ventajas de la probabilidad de éxito o de fracaso (*odds ratio*) de cada variable independiente del modelo (Pérez, 2005). Al igual que otros modelos de regresión, los de RL 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.

En el caso de la RL no hubo problema de utilizar variables independientes de tipo biofísico, pero las variables socioeconómicas, al estar agregadas a nivel municipal, sí mostraron algunas dificultades. El proceso de conversión a formato raster de estas variables presentó una alta autocorrelación espacial, ya que todos los píxeles que pertenecen a un municipio tienen el mismo valor. Para minimizar lo anterior y también como una forma de validar los modelos, se utilizó el porcentaje de píxeles clasificados correctamente (%PCC). En los mapas raster, la cantidad de píxeles con valor 0 por lo general es mucho mayor que la de píxeles con valor 1, para obtener mejor un balance en el número de píxeles de los modelos se utilizó una muestra espacial sistemática y aleatoria, de tal manera que el total de valores con 1 y 0 (pérdida y no pérdida) fuera similar y excluyendo del análisis los bosques y selvas existente en el tiempo 1 (1993). De esta forma también se logró reducir la influencia de la autocorrelación espacial (Cheng y Masser, 2003; Verburg *et al.* 2004).

Por otro lado, para validar la calidad del ajuste de los modelos se utilizó el estadístico ROC (*Relative Operating Characteristic*). 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). No existen reglas generales para juzgar los valores ROC en los estudios de cambio de uso y cobertura del suelo, pero algunos consideran que cualquier valor por arriba de 0,7 es considerado aceptable, mientras que valores arriba de 0,8 son excelentes y de 0,9 son excepcionales (Hosmer y Lemeshow, 2000).

IV. RESULTADOS

1. Regresión Lineal Múltiple

Los resultados de los modelos ajustados de la RLM se muestran en la tabla 2. En la primera columna se muestra el coeficiente estimado beta (β), en la segunda columna y para

poder comparar la intensidad de la relación entre las variables se muestra el mismo coeficiente pero estandarizado (βStd) y, en la tercera columna se indica el nivel de confianza de las variables seleccionadas (p -valor $<0,10$).

De los cuatro modelos, sólo el del bosque de latifoliadas tiene una calidad baja en su ajuste, ya que sólo explica el 50% de la variabilidad de los datos; por su parte, el modelo correspondiente al bosque de coníferas presenta un ajuste aceptable del 60%, mientras que el resto de los modelos tienen un buen ajuste, llegando el modelo conjunto a explicar el 85% de la varianza.

Estos ajustes podrían considerarse como aceptables en comparación con los reportados en otros trabajos similares. Por ejemplo, el modelo realizado por Alix-García (2007), obtiene el 14% de la variabilidad de los datos. Por su parte Bocco *et al.* (2001), obtienen en su modelo para bosques un R^2 de 0,04, en el modelo para selvas un R^2 de 0,05 y en el modelo que agrupa a ambas coberturas un R^2 de 0,16. En el caso de Blackman *et al.* (2003) lo máximo que obtienen en los modelos que elaboran es un 10% de la varianza de los datos. No obstante, otros trabajos obtienen buenos resultados, con un R^2 ajustado de 0,79 (Reyes *et al.* 2003), e incluso R^2 mayores a 0,90 (Leyva y Herrera, 2003).

Cuando se utilizan datos geográficos en modelos estadísticos es más complicado cumplir con todos los supuestos requeridos. No obstante, se realizaron diferentes pruebas estadísticas para determinar posibles problemas de autocorrelación y colinealidad entre las variables explicativas. Las dos últimas filas de la tabla 3 muestran los dos indicadores usados para este fin, el estadístico Durbin Watson (DW) y el factor de inflación de la varianza (FIV), los cuales se encuentran en valores aceptables. Para verificar el supuesto de la normalidad, se realizó un análisis gráfico de los residuos.

Los modelos que más variables significativas seleccionaron fueron el bosque mixto y el modelo conjunto, mientras que el modelo de la selva baja caducifolia asumió menor cantidad de variables significativas. A pesar del gran número de variables seleccionadas, sólo las variables relacionadas con la variación del número de ejidos con actividades forestales (EJIACFO) y la distancia media a áreas agrícolas (DMAAGR) resultaron significativas para todos los modelos. Más aún, el signo del parámetro estimado de estas variables no fue el esperado en todos ellos.

Tabla 2
RESULTADOS DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE (MUNICIPIOS)

VARIABLES	MODELOS														
	B CONÍFERAS			B LATIFOLIADAS			B MIXTO			SELVA BAJA CADUCIFOLIA			CONJUNTO		
	β	β Std	Sig.	β	β Std	Sig.	β	β Std	Sig.	β	β Std	Sig.	β	β Std	Sig.
INTERCEPTO	-2.247		0.000	-1.581		0.008	-1.761		0.000	-0.436		0.001	-1.539		0.111
Socioeconómicas															
DENPOB	1.786	0.11	0.078	-2.063	-0.16	0.021									
VIULCC							0.191	0.24	0.001	0.127	0.23	0.000	-0.995	-0.07	0.084
HOEUSA	0.166	0.23	0.010												
Tenencia de la tierra															
EJIACGA							0.472	0.37	0.001						
EJIACFO	0.627	0.51	0.000	-0.282	-0.30	0.002	0.245	0.44	0.002	-0.116	-0.16	0.000	0.378	0.12	0.000
SUPTICOM	-0.280	-0.16	0.018	0.334	0.18	0.043	0.742	0.38	0.000						
SUPTIPRIV				0.806	0.38	0.001							0.341	0.14	0.002
Disponibilidad de crédito y subsidio															
UPAGCREB				-0.367	-0.20	0.047							-0.273	-0.13	0.024
UPAGSUBP	0.589	0.36	0.000				-0.265	-0.32	0.003	0.138	0.12	0.021	0.038	0.23	0.000
Producción forestal															
AUTAPFO				-0.668	-0.19	0.009				0.279	0.11	0.006	-0.403	-0.10	0.011
Biofísicas															
PPANAPO	0.017	0.13	0.073				-0.024	-0.17	0.009				-0.013	-0.09	0.064
PPAMEN1500	-0.040	-0.23	0.002				0.076	0.40	0.000	0.056	0.42	0.000			
PPA1501-2500													-0.009	-0.10	0.021
PPA2501-3500	0.016	0.22	0.003				-0.122	-0.21	0.002				-0.052	-0.13	0.006
PPAMAY3500	0.167	0.32	0.000	-0.113	-0.21	0.009							0.021	0.11	0.059
PPPEMEN15							0.118	0.42	0.000	0.058	0.23	0.000	0.283	0.54	0.000
PPPE15-30	0.110	0.44	0.000	0.254	0.57	0.000									
PPPEMAY30				-0.175	-0.51	0.001	0.016	0.16	0.007						
PPANBPAS							-0.195	-0.33	0.000	0.071	0.17	0.003	-0.060	-0.10	0.044
PPANPAS															
Proximidad															
DMAAGR	0.0001	0.21	0.002	-0.0002	-0.40	0.000	-0.0001	-0.13	0.059	-0.0001	-0.27	0.002	-0.0002	-0.35	0.000
DMCARRE							0.000	0.14	0.010						
R ² (ajustado)	0.60			0.50			0.72			0.84			0.85		
Durbin - Watson	1.800			2.091			1.967			1.942			2.099		
FIV <	2.324			2.888			2.935			2.772			2.750		

Los signos positivos en los coeficientes de regresión indican que la variable incide en el aumento de la pérdida de bosque.

En México, los ejidos con actividades forestales son manejadas por ejidatarios a través de empresas forestales comunitarias y se supone que sus habitantes se benefician del bosque y tienen un papel activo en la conservación de las tierras forestales que tradicionalmente han usado y poseído (Klooster y Ambinakudige, 2007). No obstante, los resultados obtenidos en estos modelos, muestran que la degradación del bosque existe dentro de este tipo de ejidos, lo que indica que este tipo de actividad no está siendo sostenible con estos tipos de bosque.

La variable porcentaje de píxeles con pendientes entre 15 y 30% (PPPE15-30) se comportó de manera similar en cuatro de los modelos con excepción de la selva baja caducifolia, incidiendo además de manera positiva en todos. De igual forma, el porcentaje de hogares con emigrantes en Estados Unidos (HOEUSA) se comportó muy semejante en tres modelos; sin embargo el signo del parámetro resultó contrario a lo esperado, ya que se esperaba que esta fuerza laboral desplazada hacia el vecino país del norte dejara de ejercer presión sobre el recurso forestal. Por otra parte, las pérdidas del bosque de latifoliadas y de la selva baja caducifolia se están dando principalmente en zonas cercanas a las zonas agrícolas (DMAAGR), no así en el bosque de coníferas y en el bosque mixto.

Una de las diferencias que muestran los modelos ajustados se relaciona con las variables referentes con la producción de la industria maderera. Se puede observar como sólo en la selva baja caducifolia, el aumento de las autorizaciones para aprovechamiento forestal (AUTAPFO) impacta en la pérdida de la cobertura forestal, mientras que en los otros modelos no es significativa o bien no incide de manera directa en la pérdida.

Si se revisan los valores estandarizados de cada uno de los modelos obtenidos, observamos que la pérdida del **bosque de coníferas** está relacionada con la densidad de población (DENPOB), lo que confirma la importancia del factor demográfico en la pérdida de este tipo de bosque. No deja tampoco de ser significativo que las áreas naturales protegidas (PPANAPO) no cumplen su función preservadora, al menos en este tipo de bosque.

La pérdida del **bosque de latifoliadas** se está dando principalmente en superficies de tierras con régimen privado (SUPTIPRIV). Este resultado indica de alguna forma que las políticas de privatización que sufrieron los ejidos en el campo mexicano a principios de la década anterior no han sido del todo adecuadas. Sin embargo, si observamos el valor estandarizado de las unidades de producción agroforestal que obtuvieron subsidios (UPAGSUBP), se deduce por qué las tierras con régimen social (SUPTICOM) también inciden de manera positiva. A pesar de que el modelo revela que ambos regímenes de propiedad inciden en la pérdida del bosque de latifoliadas, sigue habiendo propuestas que apuestan por la capacidad regulatoria de los mercados, haciendo de la privatización de los bienes comunes la alternativa privilegiada de acceso a los recursos naturales y única capaz de hacer viables las prácticas de cuidado ambiental (Merino, 2004).

En el caso del **bosque mixto** las pérdidas también están relacionadas con la superficie de tierras con régimen social (SUPTICOM). Aunque también la pendiente y la altitud siguen condicionando de manera importante la pérdida de bosque mixto. La relación positiva del porcentaje de píxeles de áreas con bajo potencial agrícola de los suelos (PPABPAS) indica que estas áreas se están deforestando o alterando para abrir espacios agrícolas, sin tomar en cuenta que los rendimientos de estas tierras decaerán después de poco tiempo.

En el modelo de la **selva baja caducifolia** se aprecia que el factor que más influye son los ejidos con actividades ganaderas (EJIACGA). En el caso del porcentaje de píxeles de

áreas con nulo potencial agrícola de los suelos (PPABPAS) indica una acción similar al bosque mixto donde se detectan áreas que se están deforestando o alterando para abrir espacios agrícolas.

El **modelo conjunto** que agrupa las cuatro categorías anteriores muestra un nivel de explicación bastante bueno (85%); de hecho es el más alto de todos los modelos ajustados. De manera conjunta, y según los coeficientes estandarizados, la pérdida de bosques y selvas se está presentando sobre todo en las zonas con pendientes entre 15 y 30% (PPPE15-30) y cercanas a áreas agrícolas (DMAAGR). Asimismo los subsidios otorgados por el gobierno para actividades agroforestales (UPAGSUBP), las superficies de tierras con régimen privado (SUPTIPRIV) y los ejidos con actividades forestales (EJIACFO) son factores que influyen en la pérdida de estas coberturas vegetales.

Finalmente, es importante señalar que los espacios naturales protegidos cumplen su función de manera general en el estado de México, salvo en el caso del bosque de coníferas. Las carreteras existentes en la zona de estudio, en esta escala de trabajo, no influyen en la pérdida del bosque y selva. Los resultados muestran además que los créditos bancarios que solicitan las unidades de producción agroforestal no tienen un impacto en la pérdida de las coberturas forestales, así como tampoco la variación del número de viviendas que usan leña o carbón como combustibles.

2. Regresión Logística

Para estudiar las variables a nivel de píxel se calibraron cinco modelos de regresión logística. La tabla 3 muestra los resultados de los modelos ajustados por este método. En la primera columna se presenta el coeficiente estimado, en la segunda el coeficiente estandarizado y en la última el exponente del coeficiente también llamado *odd ratio*, siendo tres formas diferentes de expresar exactamente lo mismo (Menard, 2002).

Si se grafican los coeficientes estandarizados (*beta*) se observa con claridad como las variables de proximidad son las que inciden con mayor fuerza en todos los modelos (figura 6), mientras que las variables relacionadas con aspectos de la tenencia de la tierra tienen también un rol importante en la pérdida de la cobertura forestal; por ejemplo, el porcentaje de superficie de tierras con régimen privado (SUPTIPRIV) tiene un peso considerable en todos los modelos ajustados. En cuanto a la variación en el número de ejidos con actividades recreativas (EJIACRE) y la producción de los aserraderos y carpinterías (PASYCAR), tienen una relación positiva con la variable dependiente, pero en algunos modelos el peso de los coeficientes no es muy grande. Lo mismo sucede con los factores biofísicos como la altitud y la pendiente, aunque en este caso la dirección de la relación es negativa en todos los modelos.

Si comparamos estos resultados con los obtenidos mediante RLM, se observa que las áreas naturales protegidas del estado de México no cumplen con su objetivo de conservar los ecosistemas forestales. Lo anterior se confirma con los datos obtenidos mediante RL, en la tabla 3 se muestra como el bosque de coníferas tiene coeficientes positivos en los tres tipos de espacios protegidos analizados. De igual forma, algunos estudios realizados dentro de algunas de estas zonas parecen coincidir con lo encontrado en este estudio, como en el caso de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca (Ramírez y Zubieta, 2005) y del Parque Nacional Nevado de Toluca (Franco *et al.* 2006).

Tabla 3
RESULTADOS DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN LOGÍSTICA

VARIABLES	B_CONIFERAS		B_LATIFOLIADAS		B_MIXTO		SELVA BAJA CADUCIFOLIA		CONJUNTO						
	β	Exp (β)	β	Exp (β)	β	Exp (β)	β	Exp (β)	β	Exp (β)					
INTERCEPTO	3.47169		3.26751		4.37981		3.83465		2.41326						
Socioeconómicas															
DENOB	-0.72170	-0.05	-0.56461	-0.03	1.04339	0.05	2.84	-0.06	0.20	0.39904	0.02	1.49			
Tenencia de la tierra															
EJIACAG	-0.53478	-0.06	0.40750	0.03	1.50	-0.32140	-0.02	0.73	0.11297	0.01	1.12	-0.13128	-0.01	0.88	
EJIACGA	0.02923	0.12	-0.04426	-0.08	0.96	0.01517	0.03	1.02	-0.01025	-0.03	0.99	0.01227	0.03	1.01	
EJIACRE	0.01164	0.02	0.06790	0.13	1.07	0.03771	0.07	1.04	0.05796	0.15	1.06	0.00597	0.01	1.01	
PASYCAR	0.02034	0.02	0.02366	0.10	1.02	0.04249	0.09	1.04	0.10917	0.38	1.12	0.01577	0.05	1.02	
SUPTICOM	-0.00037	-0.15	1.00	0.00009	1.11	1.00	0.00001	0.00	1.00	-0.00010	-0.12	1.00	0.00003	0.04	1.00
SUPTIPRIV	-0.00016	-0.23	1.00	-0.00006	-0.32	1.00	-0.00006	-0.23	1.00	-0.00009	-0.43	1.00	-0.00004	-0.18	1.00
Biofísicas															
ANP_EST	0.70452	0.10	2.02	-0.46933	-0.06	0.63	-0.41912	-0.04	0.66	-0.07073	-0.01	0.93	-0.08938	-0.01	0.91
ANP_NAC	0.76194	0.11	2.14	-0.17051	-0.01	0.84	0.54122	0.02	1.72	-0.11991	-0.02	0.89	-0.01773	0.00	0.98
ANP_RESEC	0.60969	0.05	1.84	-0.26171	-0.02	0.77	-1.04279	-0.05	0.35	-0.01122	0.00	0.99	-0.29700	-0.03	0.74
ALTITUD	-0.00062	-0.09	1.00	-0.00038	-0.08	1.00	-0.00080	-0.11	1.00	-0.00093	-0.09	1.00	-0.00066	-0.17	1.00
PENDIENTES	-0.06330	-0.13	0.94	-0.01589	-0.04	0.98	-0.04632	-0.11	0.95	-0.00928	-0.02	0.99	-0.04160	-0.10	0.96
FRAG_ECOL	0.58631	0.09	1.80	0.55358	0.08	1.74	0.16734	0.03	1.18	2.09427	0.32	8.12	0.62928	0.10	1.88
Proximidad															
DIST_PAST	-0.00015	-0.16	1.00	-0.00066	-0.45	1.00	-0.00035	-0.39	1.00	-0.00044	-0.23	1.00	-0.00044	-0.46	1.00
DIST_HIDRO	-0.00183	-0.41	1.00	-0.00212	-0.51	1.00	-0.00054	-0.13	1.00	0.00047	0.11	1.00	0.00005	0.01	1.00
DIST_CARRE	-0.00090	-0.69	1.00	-0.00016	-0.08	1.00	-0.00181	-0.67	1.00	0.00020	0.10	1.00	-0.00025	-0.31	1.00
DIST_LOCMA	-0.00054	-0.39	1.00	0.00006	0.02	1.00	-0.00159	-0.48	1.00	-0.00097	-0.30	1.00	-0.00067	-0.36	1.00
ROC	0.87		0.78		0.84		0.92		0.84		0.92		0.89		0.89
%PCC	89.76		96.90		94.09		95.68		86.09		86.09		86.09		86.09

También se puede apreciar como el bosque de coníferas no tiene la debida protección en los tres tipos de áreas naturales protegidas analizadas. Así también existen áreas que tienen alta fragilidad ecológica y donde el impacto ambiental provocado por los procesos de deforestación o alteración hace que su posible restauración presente grandes dificultades (GEM, 2000). La selva baja caducifolia es la que presenta con mayor intensidad este problema.

Siguiendo a Menard (2002) los resultados también pueden ser interpretados en términos de probabilidad. En este caso se puede observar como las variables de proximidad a zonas de pastizal, corrientes de agua, carreteras y localidades menores a 2.500 habitantes están relacionadas de alguna forma con los procesos de pérdida de las masas forestales (figura 4).

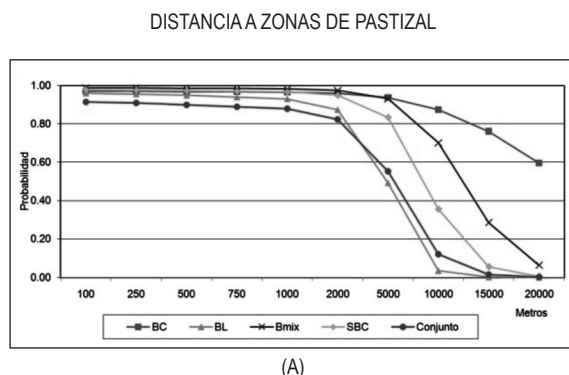
En todos los modelos ajustados los resultados muestran que los bosques y selvas que se encuentran a una distancia de aproximadamente 1.000 m. de las zonas de pastizal, presentan altas probabilidades de sufrir alguna pérdida. Después de 10 km es casi improbable que este fenómeno se produzca, con la excepción de los bosques de coníferas (figura 4a).

En el caso de la proximidad a las corrientes de agua, en los modelos correspondientes a los bosques de coníferas y de latifoliadas se observan altas probabilidades de pérdida hasta los 2 km, mientras que en la selva baja caducifolia y el modelo conjunto no se aprecian tendencias claras de su comportamiento (figura 4b).

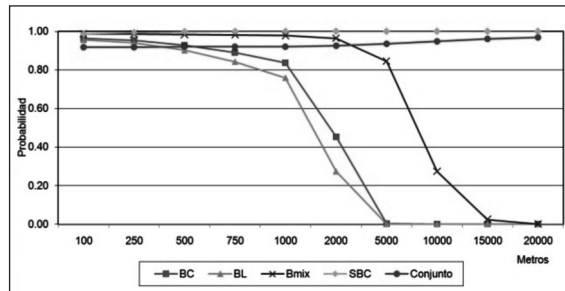
En casi todos los modelos, la cercanía a carreteras y a localidades menores a 2.500 habitantes, muestran que la probabilidad de que se presente una pérdida de masa forestal es mucho mayor en los primeros 1.000 m.; después de esta distancia la probabilidad disminuye considerablemente (figuras 4c y 4d). Estos resultados muestran un comportamiento similar al reportado por Dupuy *et al.* (2007) y Mas *et al.* (1996).

Por otra parte, se observa que la probabilidad de pérdida de bosques y selvas en todos los modelos es más alta en superficies privadas pequeñas mientras que en superficies privadas mayores a 1.000 hectáreas la probabilidad se reduce considerablemente (figura 5a). En el régimen comunal sucede lo mismo con el bosque de coníferas, pero en la selva baja caducifolia la alta probabilidad de pérdida se amplía hasta las 10.000 hectáreas (figura 5b).

Figura 4
PROBABILIDADES DE PÉRDIDA DE BOSQUE Y SELVA RESPECTO A LAS VARIABLES DE PROXIMIDAD

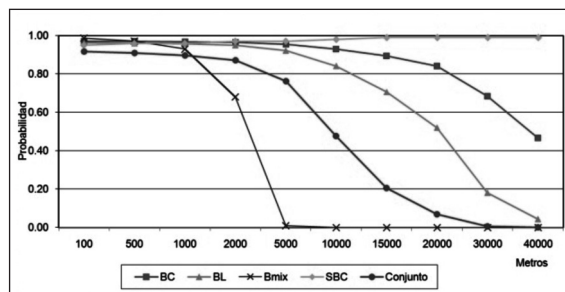


DISTANCIA A CORRIENTES DE AGUA



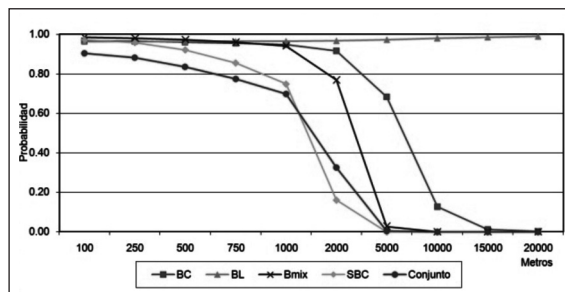
(B)

DISTANCIA A CARRETERAS



(C)

DISTANCIA A LOCALIDADES MENORES A 2500 HABITANTES



(D)

Si se consideran los datos de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), en México prácticamente no existen proyectos forestales en superficies mayores a las 10.000 ha, inclusive casi todas las plantaciones en desarrollo (90%) se ubican en un rango menor a 1.000 ha y una buena parte de ellos, 50 %, corresponden a un rango menor a 200 ha. Ello es un reflejo

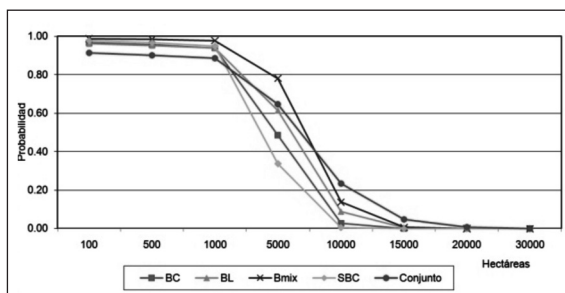
de la atomización que existe en la tenencia de la tierra, ya sea esta de propiedad privada, ejidal o comunal, que en casos extremos puede llegar a ser hasta de una o dos ha por propietario o usufructuario. Estos datos podrían estar relacionados con los resultados obtenidos en estos modelos de regresión.

En el caso de las variables biofísicas, la probabilidad de que se presenten pérdidas de alguna cobertura forestal disminuye conforme aumenta la pendiente del terreno, en el caso del modelo que ajusta los cuatro tipos en conjunto la probabilidad es de 0,50 en zonas con pendientes de 35%, mientras que en el modelo del bosque mixto esa misma probabilidad se presenta en zonas con un 60% de pendiente (figura 5c).

La altitud del terreno también muestra que la probabilidad de pérdida disminuye conforme aumenta la altitud. El caso más claro es la selva baja caducifolia, que tiene una probabilidad de pérdida de 0,90 a las 200 m. de altitud, para luego disminuir hasta 0,10 en los 1.500 m. de altitud. Algo lógico si recordamos que esta cobertura se localiza en altitudes del terreno muy bajas (figura 5d).

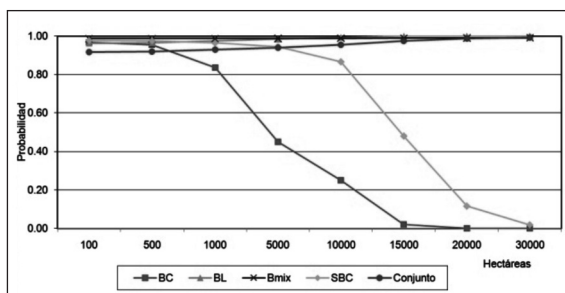
Figura 5
PROBABILIDADES DE PÉRDIDA DE BOSQUE Y SELVA RESPECTO A LAS VARIABLES DE TENENCIA DE LA TIERRA Y BIOFÍSICAS

SUPERFICIE DE TIERRAS PRIVADAS



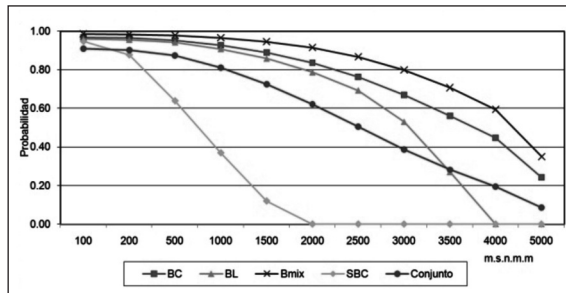
(A)

SUPERFICIE DE TIERRAS COMUNALES



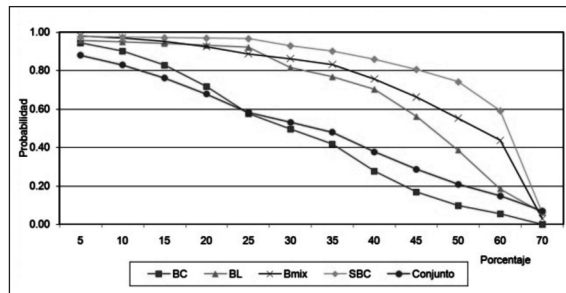
(B)

PENDIENTE DEL TERRENO



(C)

ALTITUD DEL TERRENO



(D)

Con respecto a la validación de los modelos, los resultados del estadístico ROC (tabla 3) ponen de manifiesto que todos los modelos tienen un ajuste de los datos muy bueno, con excepción del modelo del bosque de latifoliadas que podría considerarse como aceptable de acuerdo a Hosmer y Lemeshow (2000). En cuanto al porcentaje de píxeles clasificados correctamente (%PCC) todos los modelos resultaron con porcentajes mayores al 85%, lo que confirma que el uso del muestreo sistemático aleatorio y la máscara binaria ayudó a ajustar de mejor manera los modelos.

V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

1. Discusión

El trabajo utiliza dos unidades de observación espacial y dos técnicas estadísticas diferentes, lo que ha aportado resultados cuantitativos que miden el impacto positivo y/o negativo que tienen las variables empleadas sobre las cuatro tipos de cubiertas forestales. La regresión lineal múltiple analizó a escala municipal las variables que más inciden en los procesos de pérdida de bosque y selva, mientras que la regresión logística a escala de píxel contribuyó a entender más fácilmente la incidencia de las variables explicativas en términos de probabilidad sobre la pérdida de la masa forestal.

No obstante las bondades de los métodos estadísticos aplicados, existen desventajas que deben ser consideradas. Se deben explorar mecanismos para sortear problemas como la pérdida de información debido a la agregación de los datos, la autocorrelación espacial, la reexpresión de variables estadísticas, la no normalidad en la distribución de los datos en algunos modelos, entre otras. También se debe tomar en consideración que los métodos de RLM y RL no consideran en sus asunciones el comportamiento espacial de los datos geográficos.

Por otra parte, una de las desventajas de utilizar la RL es la alta autocorrelación espacial que se presenta en los datos agregados a nivel municipal. Para reducir este problema se realizaron mascararas binarias en todos los modelos mediante muestras espaciales aleatorias, de modo que el número de píxeles de 0 y 1 fueran lo más similar posible.

En cuanto a los resultados, y tomando en consideración los primeros tres coeficientes que presentan mayor peso en todos los modelos de RLM, se concluye que las variables biofísicas son las que más influyen en los procesos de deforestación, seguidas de la tenencia de la tierra y la disponibilidad de crédito y subsidio. Lo anterior demuestra que algunas de estas variables tienen que ver con factores relacionados con la expansión agrícola y factores políticos e institucionales. En el primer caso se considera una causa directa o inmediata de la deforestación, mientras el segundo lo es de forma indirecta o secundaria. Las variables biofísicas se consideran como otros factores que inciden de manera mixta en el proceso, a veces de forma directa y en otras de forma indirecta.

Los resultados de la RL, al ser medidos a nivel de píxel, resultaron más consistentes en las variables de proximidad, captando en este grupo nuevamente los factores relacionados con la expansión agrícola y los factores políticos e institucionales, además de variables que tienen relación con la ampliación de infraestructuras.

Si se analizan los resultados de los dos métodos utilizados en este trabajo desde la perspectiva del tipo o grupo de variables, se puede apreciar que no existe un patrón claro que muestre variables influyentes en el proceso de deforestación y sea significativo en los dos métodos. Sin embargo si se analiza desde la perspectiva de los factores que inducen el cambio, se observa que la expansión agrícola y los factores políticos e institucionales se muestran de manera significativa en los dos métodos de regresión utilizados. En cuanto al tipo de causas que inciden en los modelos, parece ser que las directas tienen mayor peso en la RL, tal vez debido al tipo de unidad de análisis, mientras que las causas mixtas tienen una incidencia mayor en el método de RLM.

Finalmente, el trabajo procura aportar elementos que ayuden a explicar en qué medida los factores aquí planteados están relacionados o son los responsables de los procesos de deforestación en el estado de México. Del mismo modo, los resultados muestran que la aplicación conjunta de métodos estadísticos y tecnología SIG, es una potente herramienta de análisis geográfico. Estos métodos podrían servir como base metodológica en futuros procedimientos de planificación forestal en la propia entidad y en otras regiones del país.

2. Conclusiones

El análisis estadístico propuesto en este trabajo aporta resultados cuantitativos que pretenden ayudar a entender mejor las causas y mecanismos de los cambios ocurridos en la cubierta forestal.

De los resultados obtenidos en los modelos de RLM, las variables que más influyen en la pérdida de la masa forestal son las de tipo biofísico, siendo la pendiente la más destacada en todos los modelos. En el estado de México la mayoría de los bosques templados se ubican en pendientes menores a 30%, por lo que era de esperarse que en estas zonas se presenten las pérdidas. Sin embargo, llama la atención que la deforestación de la selva baja caducifolia se localiza en pendientes mayores a 30%, es decir, en las zonas más montañosas del sur de la entidad, lo que muestra que la ubicación de las áreas agropecuarias que se están abriendo a costa de esta cobertura no es la más adecuada para soportar este tipo de uso del suelo.

Los resultados obtenidos mediante los modelos de RL muestran que las variables que tienen relación con factores de proximidad son los más influyentes. En este sentido, la probabilidad de perder zonas de bosque o selva en los primeros 2 km es elevada, sobre todo las que están más próximas a pastizales y carreteras. Asimismo, los resultados revelan que las superficies más pequeñas con régimen privado son las que presentan mayor probabilidad de ser deforestadas.

Por otra parte, las variables relacionadas con la tenencia de la tierra también tienen una influencia considerable en casi todos los modelos de RLM. Es interesante observar como un aumento en el número de ejidos que tienen actividades forestales se manifiesta positivamente en la pérdida del bosque de coníferas y del bosque mixto, y de forma negativa en el bosque de latifoliadas y la selva baja caducifolia. Aunque algunos consideran que en México cada día se avanza más en el manejo forestal sostenible de los bosques por parte de las comunidades de ejidatarios (Durán *et al.* 2007), los resultados de este estudio revelan que en algunas regiones del estado de México, la organización social tiene ciertas implicaciones en la pérdida de las coberturas del bosque y selva, si bien es cierto que se necesitan estudios más detallados para confirmarlo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de los Ecosistemas del Instituto Nacional de Ecología de México (INE) por haber cedido en formato digital la información cartográfica sobre la que realizó el presente estudio. Montserrat Gómez y Joaquín Bosque agradecen la financiación recibida del proyecto SIMURBAN (referencia SEJ2007-66608-C04-01) para realizar su actividad. El primer autor agradece la beca proporcionada por el Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) del gobierno de México para realizar sus estudios de Doctorado en la Universidad de Alcalá de Henares (España).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALIX-GARCÍA, J. (2007). «A spatial analysis of common property deforestation». *Journal of Environmental Economics and Management*. 53, pp. 141-157.
- BENITO DE PANDO, B. y PEÑAS DE GILES, J. (2007): «Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica», *GeoFocus* (Artículos), n° 7, p. 100-119, ISSN: 1578-5157.

- BLACKMAN, A., ALBERS, H., ÁVALOS, S. y CROOKS, L. (2003). «Land Cover in a Managed Forest Ecosystem: Mexican Shade Coffe». *Resources for the future*. Washington, D.C., pp.03-60.
- BOCCO, G., MENDOZA, M. y MASERA, O. (2001). «La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación», *Investigaciones Geográficas*. Boletín del Instituto de Geografía. UNAM. Num. 44, pp. 18-38.
- BOSQUE, J. y MORENO, A. (1994). *Prácticas de Análisis exploratorio y multivariante de datos*. Barcelona, Oikos Tau.
- CHAVES, E. y ROSERO, L. (2001). «Valoración del riego de deforestación futura en Costa Rica». *Uniciencia* 18, p.p. 29-38. Heredia, Costa Rica.
- CHENG, J. y MASSER, I. (2003): «Urban growth pattern modelling: a case study of Wuhan city, PR China», *Landscape and Urban Planning*, 62, 199-217.
- CHHABRA, A., GEIST, H., HOUGHTON, R., HABERT, H., BRAIMOH, A., XU, J., RAMANKUTTY, N., COOMES, O. y LAMBIN, E. (2006). «Multiples impacts of land use cover change». En: Lambin, E.F. y Geist, H.J., Eds. (2006). *Land use and land cover change. Local processes and global impacts*. Global Change-The IGBP Series. Berlín, Springer.
- CHOWDHURY, R. (2006). «Landscape change in the Calakmul Biosphere Reserve, Mexico: Modeling the driving forces of smallholder deforestation in land parcels». *Applied Geography*. 26, pp. 129-152
- DEININGER, W. y MINTEN, B. (1996). *Poverty, Policies and Deforestation: The Case of Mexico*, World Bank.
- DUPUY, J., GONZÁLEZ, J., IRIARTE, S., CALVO, L., ESPADAS, C., TUN, F. y DORANTES, A. (2007). «Cambios de cobertura y uso del suelo (1979-2000) en dos comunidades rurales en el noroeste de Quintana Roo». *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Núm. 62, pp.104-124.
- DURÁN, E., MAS, F. y VELÁZQUEZ, A. (2007). «Cambios en las coberturas de vegetación y usos del suelo en regiones con manejo forestal comunitario y áreas naturales protegidas de México». En: Bray, D., Merino, L. y Barry, D. (2007). *Los bosques comunitarios de México. Manejo sustentable de paisajes forestales*. Instituto Nacional de Ecología. (INESEMARNAT). México.
- EBDON, D. (1982). *Estadística para Geógrafos*. Barcelona. Oikos Tau.
- FOTHERINGHAM, S., BRUNSDON, C. y CHARLTON, M. (2000). *Quantitative Geography. Perspectives on Spatial Data Analysis*. SAGE Publications. London, England.
- FRANCO, S., REGIL, H., GONZÁLEZ, C. y NAVA, G. (2006). «Cambio de uso del suelo y vegetación en el Parque Nacional Nevado de Toluca, México, en el período 1972-2000», *Investigaciones Geográficas*. Boletín del Instituto de Geografía. UNAM. Núm. 61, pp. 38-57.
- GEIST, H. y E. 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, Belgium, LUCC International Project Office: 116.
- GEIST, H., MCCONNELL, W., LAMBIN, E., MORAN, E., ALVES, D. y RUDEL, T. (2006). «Causes and Trajectories of land use cover change». En: Lambin, E.F. y Geist,

- H.J., Eds. (2006). *Land use and land cover change. Local processes and global impacts*. Global Change-The IGBP Series. Berlín, Springer.
- GEM. Secretaría de Finanzas y Planeación (1993). *Panorámica Socioeconómica del Estado de México*. Toluca, México.
- GEM. Secretaría de Ecología (1999). *Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio del Estado de México*. Toluca, México.
- GEM. Poder Ejecutivo (2000). Estudio de Gran Visión 1999-2010. Toluca, México.
- GEOGHEGAN, J., SCHNEIDER, L., y VANCE C. (2001). «Temporal dynamics and spatial scales: Modeling deforestation in the southern Yucatan peninsular region». *GeoJournal*. 61: pp. 353-363.
- HOSMER, D. y LEMESHOW, S. (2000). *Applied Logistic Regression*, Second Ed. Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons Inc., New York, USA.
- ISAAC-MÁRQUEZ, R.; DE JONG, B; EASTMOND, A.; OCHOA-GAONA, S. y HERNÁNDEZ, S. (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. No. 42.
- KAIMOWITZ, D. y ANGELSEN, A. (1998). *Economic models of tropical of deforestation a review*. Center for International Forestry Research. Bogor, Indonesia.
- KLOOSTER, D. y AMBINAKUDIGE, S. (2007). «La importancia mundial del manejo forestal comunitario en México.» En: *Los bosques comunitarios de México. Manejo sustentable de paisajes forestales*. Instituto Nacional de Ecología (INE-Semarnat). Primera edición. México, D.F.
- LAMBIN, E. (1997) «Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions». *Physical Geography*, 21, pp. 375-393.
- LAMBIN, E. y GEIST, H. EDS. (2006). *Land use and land cover change. Local processes and global impacts*. Global Change-The IGBP Series. Berlín, Springer.
- LESSCHEN, J.; VERBURG, P. y STAAL, S. (2005). *Statistical methods for analysing the spatial dimension of changes in land use and farming systems*, LUCG Report Series 7, publicado por: The International Livestock Research Institute, Nairobi, Kenya y LUCG Focus 3 Office, Wageningen University, the Netherlands.
- LEYVA REYES, J. C. y HERRERA y HERRERA, B. (2003): «Análisis de la dinámica territorial en México y su interrelación con la dinámica poblacional, periodo 1980-2000», *Revista Chapingo, Serie ciencias forestales y del ambiente*, vol. 9, nº 1, pp. 77-87.
- MAS, J., SORANI V. y ALVAREZ R. (1996) «Elaboración de un modelo de simulación del proceso de deforestación», *Investigaciones Geográficas*. Boletín Especial del Instituto de Geografía. UNAM. Núm. 5, pp. 43-57.
- MAS, J., VELÁZQUEZ, A., CASTRO, R. y SCHMITT, A. (2002). «Una evaluación de los efectos del aislamiento, la topografía, los suelos y el estatus de protección sobre las tasas de deforestación en México». *R. Raega*, Curitiba, No. 6, pp. 61-73.
- MENARD, S. (2002). *Applied logistic regression analysis, Second Edition*. SAGE Publications.
- MERINO, L. y SEGURA, G. (2002). *El manejo de los recursos forestales en México (1992-2002)*. *Procesos, tendencias y políticas públicas*. En: La transición hacia el desarrollo sustentable. Perspectivas de América Latina y el Caribe. Coord. Enrique Leff.

- MERINO, P. (2004). *Conservación o Deterioro. El impacto de las políticas públicas en las instituciones comunitarias y en las prácticas de uso de los recursos forestales*. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). Primera ed., México, D.F.
- MONTGOMERY, D.; ELIZABETH P. y GEOFFREY V. (2005). *Introducción al análisis de regresión lineal*. Compañía Editorial Continental, México.
- PAN, K., WALSH, J., BILSBORROW, E. FRIZZELLE, G., ERLIEN M. y BAQUERO, F. (2004). «Farm-level models of spatial patterns of land use and land cover dynamics in the Ecuadorian Amazon». *Agriculture Ecosystems and Environment*. 101, pp. 117-134.
- PÉREZ, L. (2005). *Métodos Estadísticos Avanzados con SPSS*. Madrid, Thomson.
- PINEDA, N., BOSQUE SENDRA, J., GÓMEZ DELGADO, M. Y PLATA, W. (2009). «Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación». *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Núm. 69, pp.33-52.
- RAMÍREZ, I. y ZUBIETA, R. (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 D.F.
- REYES, H., CORTINA, S., PERALES, H., KAUFFER E. y FERNÁNDEZ, J. (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 del Instituto de Geografía, UNAM. Núm. 51, pp.88-106.
- ROSETO-BIXBY, L. y PALLONI, A. (1998). Población y deforestación en Costa Rica. En *Conservación del bosque en Costa Rica*. San José, Costa Rica: Academia Nacional de Ciencias y Programa Centroamericano de Población, 131-150.
- SANDOVAL, V. y OYARZUN, V. (2004). «Modelamiento y prognosis espacial del cambio en el uso del suelo». *Quebracho. Revista de Ciencias Forestales*. No. 011. Universidad Nacional de Santiago de Estero, Argentina, pp. 9-21.
- SERRA, P.; PONS, X. y SAURÌ, D. (2005). «Metodología para el análisis de las transformaciones paisajísticas de áreas rurales mediterráneas. Evolución, causas y consecuencias en el caso del Alto Ampurdán (Noreste de Cataluña)», *Anales de Geografía* 25, pp. 259-278.
- SOARES-FILHO, B., ASSUNÇÃO, R. y PANTUZZO, A. (2002). «Modeling the spatial transition probabilities of landscape dynamics in an amazonian colonization frontier». *BioScience*. Vol. 51. No. 12, pp. 1059-1067.
- VELÁZQUEZ, A., MAS, J. y PALACIO, J. (2002). «Análisis de cambio de uso del suelo. Mapas de análisis del cambio de uso del suelo». INE, SEMARNAT. Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 1-82.
- VERBURG, H; RITSEMA VAN ECK J; NIJS T DE y DIJST M J. (2004). «Determinants of land-use change patterns in the Netherlands» *Environment and Planning B: Planning and Design*. Vol. 31, p.p. 125-150.