

Dinámica de cambio espacio-temporal de uso del suelo de la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México

Rosalía Castelán Vega*
Jesús Ruiz Careaga**
Gladys Linares Fleites**
Ricardo Pérez Avilés*
Víctor Tamariz Flores**

Recibido: 28 de noviembre de 2006
Aceptado en versión final: 25 de mayo de 2007

Resumen. En México se presentan procesos de cambio de uso del suelo muy rápidos; no obstante, no existe información confiable y detallada sobre estos procesos. El objetivo de este trabajo fue evaluar los cambios espaciales de uso del suelo en la Subcuenca del río San Marcos, Puebla, así como generar una base de datos que permita cuantificar y caracterizar estos cambios durante los años 1976, 1993 y 2000. El estudio se basa en la interpretación de fotografías aéreas, documentos oficiales e históricos, análisis cartográfico del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y del Inventario Forestal Nacional (IFN), así como verificación en campo. Finalmente, se generaron mapas de uso del suelo, tasas de cambio, una matriz de transición y una de probabilidad de permanencia. El análisis de los datos mostró una reducción importante de la masa forestal durante las últimas tres décadas. Entre 1976 y 2000, la superficie de bosque mesófilo de montaña disminuyó 62.65%, la de selvas 62% y la de pastizal cultivado 29.51%; en contraste, se incrementaron las áreas destinadas a pastizal inducido (7.3%), cultivos anuales (73.62%) y permanentes (151%); finalmente, las zonas urbanas aumentaron 547% en la región.

Palabras clave: Deforestación, SIG, fragmentación de bosques.

Dynamics of spatial and temporal change of land use in the San Marcos river subwatershed, Puebla, Mexico

Abstract. In Mexico, there appears to be a very rapid process of change of land use. Nevertheless, there does not exist reliable and detailed information about these processes. The aim of this work was to evaluate spatial changes of land use in the San Marcos river subwatershed in Puebla, as well as to generate a database that allows to quantify and character-

* Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Complejo Ciudad Universitaria, Edificio 76. Col. San Manuel, 72570, Puebla, Puebla. E-mail: crumara@hotmail.com.

** Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 14 Sur 6301, Col. San Manuel, 72590, Puebla, Puebla. E-mail: jruiz@siu.buap.mx, gladys.linares@icbuap.buap.mx, cs000305@siu.buap.mx, jtamariz@siu.buap.mx.

ize these changes for the years 1976, 1993 and 2000. Study is based on the interpretation of aerial photographs, official and historical documents, cartographic analysis from the National Institute of Statistics and Geography (INEGI), and the cartography of the Forest National Inventory, as well as verification on field. Finally, land use maps, change rates, a transition matrix and a probability of permanence matrix of land use were generated. Analysis of this information showed an important reduction of the forest mass during the last three decades. Between 1976 and 2000, the mesophyll mountain forest area diminished 62.65%, tropical rainforests 62%, and cultivated grassland 29.51%; in contrast, areas destined to induced grassland increased in 7.3%, areas destined to agricultural annual and permanent cultures increased in 73.62% and 151%, respectively. Finally, urban zones increased in 547%.

Key words: Deforestation, GIS, Forest fragmentation.

INTRODUCCIÓN

La transformación acelerada de las superficies forestales en áreas de uso agropecuario o urbano ha sido uno de los procesos más comunes en varias regiones del país durante los últimos 30 años (Landa *et al.*, 1998; Velásquez *et al.*, 2002; Salazar *et al.*, 2004). La disminución de la vegetación (asociada frecuentemente con la sobreexplotación) puede ocasionar diversas alteraciones en una región, tales como la reducción de la recarga de mantos acuíferos, el incremento de la tasa de erosión, el aumento de la tasa de azolve de presas y lagos, el aumento de inundaciones causadas por el desbordamiento de ríos y el cambio de las condiciones climáticas locales (Masera, 1996; Ordóñez *et al.*, 2000). Por lo que en la actualidad, los estudios sobre los procesos dinámicos de los cambios de uso del suelo y deforestación son importantes y necesarios, ya que proporcionan información del comportamiento y las tendencias de los procesos de degradación, en los que intervienen factores ecológicos y socioeconómicos (Kaimowitz y Angelsen, 1998; Velásquez *et al.*, 2002; Priego *et al.*, 2004; Guerra y Ochoa, 2006).

En la subcuenca del río San Marcos, el acelerado crecimiento poblacional, aunado a las también crecientes expectativas de desarrollo, constituyen una enorme presión de uso sobre los recursos naturales. Esto no sólo se traduce en la intensificación de cultivos en áreas agrícolas, sino también en su expansión hacia zonas marginales y con bajo potencial; además de estimular el sobrepastoreo y la extracción

de leña, favoreciendo de esta manera la deforestación (Castelán, 2003; Meli, 2003; Ruiz *et al.*, 2005). Estos problemas ambientales se reflejan en la pérdida de los recursos naturales y favorecen la ocurrencia de deslaves, generando cuantiosos daños materiales y la pérdida de vidas humanas (Vitousek *et al.*, 1997; Mateo y Ortiz, 2001).

Una manera confiable para medir el grado de conversión ambiental antropogénica es a través del estudio de la dinámica espacio-temporal de uso del suelo, ya que permite conocer las modificaciones en la vegetación debido al uso humano, así como la distribución e incremento (o decremento) de las tierras dedicadas a actividades antrópicas, ya sea productivas o como asentamientos humanos (Berry *et al.*, 1996; Priego *et al.*, 2004; Reyes *et al.*, 2006). En este sentido, el objetivo de este trabajo fue evaluar los cambios espaciales de uso del suelo en la subcuenca del río San Marcos, Puebla; así como generar una base de datos que permita cuantificar y caracterizar estos cambios durante los años 1976, 1993 y 2000.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y descripción del área en estudio

La subcuenca del río San Marcos se localiza al noroeste del estado de Puebla, enmarcada dentro de las coordenadas geográficas: 20°03' y 20°34' de latitud Norte y 97° 24' y 98°17' de longitud Oeste del Meridiano de Greenwich (INEGI, 2000a; Figura 1); cuenta con una super-

ficie de 70 376.6 hectáreas y abarca territorio de los municipios: Naupan, Jalpan, Pahuatlán, Tlacuilotepec, Xicotepec de Juárez, Venustiano Carranza y Zihuateutla de la Sierra Norte del estado de Puebla, y Coyutla y El Espinal del estado de Veracruz.

Presenta tres tipos de clima, los cuales son: al oeste, templado húmedo con lluvias todo el año, pasando por el semicálido subhúmedo al centro y, finalmente, al este cálido húmedo con lluvias todo el año. Cuenta con precipitaciones promedio de 3 000 mm anuales. La vegetación dominante es el bosque mesófilo de montaña y la selva alta perennifolia. Se encuentra dominada por una topografía montañosa al oeste y ligeramente ondulada al este, con altitudes que van desde los 200 msnm hasta los 2 000 msnm.

Los suelos presentes son leptosoles, regosoles, calcisoles y luvisoles en las partes más altas; los vertisoles se distribuyen en las áreas con menor altitud y sujetas a inundaciones (ISRIC, 1994; Ruiz *et al.*, 2005).

Evaluación espacial y temporal de uso del suelo

El área en estudio se delimitó con base en fotomapas escala 1:20 000 (INEGI, 1984a), tomando en cuenta los límites geomorfológicos de la subcuenca. Para la evaluación de los cambios de uso del suelo, la información espacial y tabular se estructuró en una base geográfica digital, con este propósito se utilizó la estructura de datos definida por Moolenaar (1989a

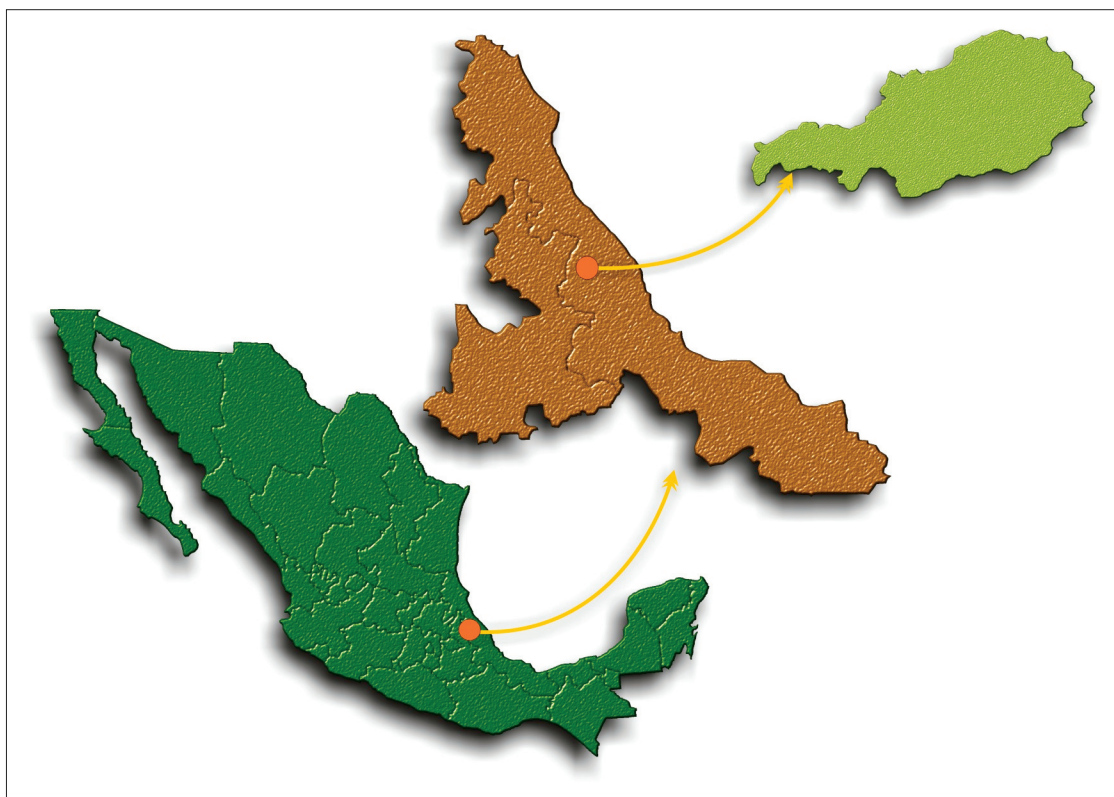


Figura 1. Localización de la subcuenca del río San Marcos.
Fuente: INEGI, 2000a.

y b), la cual consiste en que cada punto, línea o área de un mapa tenga información sobre la localización (datos geométricos) y el contenido (información temática), con un identificador único. Las cartas digitales adquiridas del INEGI de uso del suelo y vegetación Series I (1976) y II (1993), y del INF (2000) (IGEO-INE, 2002), fueron analizadas en formato nativo del programa Arc View (Shapefile), (ESRI, 1999).

El trabajo de campo consistió en recorridos y verificación de 40 sitios, los cuales se seleccionaron en el mapa del año 2000, considerando trabajo de campo previo, la extensión de la vegetación, usos del suelo y unidades geomorfológicas. En cada sitio se describió el perfil del suelo y se obtuvieron las coordenadas con un posicionador geográfico. Además, se realizaron entrevistas en cada sitio a productores de la región para conocer los usos del suelo actual, y de años anteriores.

La cartografía de uso del suelo de la subcuenca, de las tres fechas, se elaboró con base en los datos de campo y fotografías aéreas pancromáticas blanco y negro de INEGI (1973, 1984b y 2000b) a escala 1:75 000. Para cada fecha analizada se fotointerpretó una subescena que

cubre una superficie aproximada de 70 376.6 ha. Se utilizó una escala de restitución de 1:50 000, debido a que los mapas base de la zona en estudio corresponden a esta escala. Este procedimiento se fundamentó en un estricto control de calidad en la precisión posicional de los rasgos geográficos, así como en sus atributos.

Una vez definidas las áreas útiles se procedió a la interpretación, para lo cual se consideraron criterios que permitieran reconocer los elementos a identificar en función del tamaño, forma, textura y patrón de las fotos aéreas. Previamente, se elaboró una primera leyenda de uso del suelo, misma que fue reagrupada en las clases que se presentan en el Cuadro 1.

Todos los documentos cartográficos fueron realizados con el sistema de información geográfica Arc View 3.2a. Con objeto de contar con bases de datos confiables se verificó la calidad del etiquetamiento y clasificación de los polígonos con base en la técnica descrita por Bocco y Riemann (1997), la cual describe la verificación en términos binomiales de criterio éxito-fracaso, misma que puede ser representada como un experimento de Bernoulli, con dos posibles resultados: correcto (donde la

Cuadro 1. Leyenda jerárquica de uso del suelo (1976-2000)

Formación	Uso del suelo	Clave
Bosques	Bosque mesófilo de montaña	BM
	Bosque mesófilo de montaña con vegetación secundaria arbustiva	BM/VSa
Pastizal	Pastizal cultivado	PC
	Pastizal inducido	PI
Selvas	Selva alta perennifolia	SAP
	Selva alta perennifolia con vegetación secundaria arbustiva	SAP/VSa
Cultivos	Permanentes	CP
	Anuales	CA
Asentamientos urbanos	Zonas urbanas	ZU

etiqueta del polígono en la base de datos digital corresponde a la dada en el mapa en papel) o incorrecto (donde el polígono fue incorrectamente etiquetado).

El análisis de las tasas de cambio de uso del suelo se realizó con la siguiente ecuación utilizada por la FAO (1995):

$$t = 1 - [1 - (S_1 - S_2 / S_1)]^{1/n}$$

Donde t es la tasa de cambio, S_1 y S_2 son las superficies de uso del suelo en el tiempo inicial y tiempo final, respectivamente. La variable n equivale a la amplitud del periodo evaluado.

Con el fin de analizar detalladamente la dinámica de cambio de uso del suelo se construyó una matriz de transición, la matriz se describe como una tabla con arreglos simétricos que contiene en uno de los ejes las clases de uso del suelo en el primer año base y en el otro eje (segundo año) estas mismas clases. De esta forma, cada una de las celdas de la diagonal principal de la matriz representa la superficie en hectáreas de cada clase de uso que permaneció en la misma categoría durante el periodo considerado, mientras que en el resto de las celdas se estima la superficie de un determinado uso que pasó a otra categoría (López, 1999), lo que permite entender la dinámica de cambio a nivel local y/o regional.

A partir de la matriz de transición se elaboró la matriz de probabilidad de permanencia para cada una de las clases seleccionadas. Esta matriz surge de dividir cada una de las celdas de la matriz de transición que representan la superficie en hectáreas de cada clase de uso del suelo entre el total de la superficie de la clase analizada (*Ibid*).

Se consideró que la probabilidad de permanencia (P_{ij}) de cada clase de la matriz es proporcional a la superficie remanente de la misma clase entre 1976 y 2000. Su expresión matemática es:

$$P_{ij} = S_{ij} (1976) / S_j (2000)$$

donde:

S_{ij} = Superficie de "ij" de la matriz de transición de uso del suelo en 1976.

S_j = Superficie de la clase de uso del suelo "j" en 2000.

$$\sum P_{ij} = 1$$

La interpretación se realizó utilizando las siguientes clases de probabilidad: 0-33% (baja), 34-66% (media) y 67-100% (alta; Sánchez *et al.*, 2003).

RESULTADOS

El uso del suelo en la subcuenca ha experimentado cambios sustanciales (Cuadro 2). Entre 1976 y 2000 se perdieron más de 9 400 ha de vegetación natural. La situación es especialmente crítica en el caso de las selvas, que aportan el 63% de la cifra. Los terrenos dedicados a la ganadería (pastizales) redujeron su superficie en casi 9 500 ha, debido a la expansión de áreas agrícolas, ya que los cultivos permanentes (café) aumentaron su superficie en poco más de 8 700 ha y los anuales (maíz, frijol y chile) se incrementaron en más de 9 600 ha. Finalmente, las zonas urbanas presentaron un constante desarrollo que favoreció su crecimiento en 539 ha durante este periodo.

Para comprender a mayor detalle la dinámica de cambio espacio-temporal de uso del suelo en la subcuenca, a continuación se desglosa el análisis en dos periodos: el primero que comprende de 1976 al año 1993; y el segundo de 1993 al 2000. El Cuadro 3 muestra las tasas de cambio para cada periodo y en las Figuras 2 y 3 se observa la distribución espacial del uso del suelo de los mismos.

Durante el primer periodo (1976-1993), la masa boscosa pasó de 4 939.76 a 2 082.36 ha con una razón de cambio de -9.91% anual, disminuyendo la superficie del bosque mesófilo en 1 835.61 ha y la del bosque secundario en 1 027.79, este decremento se dio primordialmente por el avance de la superficie agrícola

Cuadro 2. Dinámica de cambio de uso del suelo, 1976-2000

Uso del suelo	Superficie (ha)					
	1976	%	1993	%	2000	%
BM	2 981.1	4.24	1 145.49	1.63	1 073.74	1.53
BM/VSa	1 958.66	2.78	936.87	1.33	771.09	1.10
PC	32 474.35	46.14	18 888.73	26.84	22 890.98	32.53
PI	1 735.85	2.47	1 475.9	2.10	1 862.47	2.65
SAP	4 659.99	6.62	3 645.32	5.18	2 650.04	3.77
SAP/VSa	7 599.73	10.80	8 712.49	12.38	3 267.74	4.64
CP	5 766.87	8.19	18 453.62	26.22	14 474.85	20.57
CA	13 101.51	18.62	16 729.27	23.77	22 747.59	32.32
ZU	98.54	0.14	388.91	0.55	638.1	0.91
<i>Total</i>	<i>70 376.6</i>	<i>100</i>	<i>70 376.6</i>	<i>100</i>	<i>70 376.6</i>	<i>100</i>

para el cultivo de especies perennes y por el establecimiento de zonas urbanas, de tal manera que los bosques únicamente estaban representados en el 2.96% de la subcuenca para 1993.

Las selvas sufrieron una deforestación menor con respecto a los bosques durante

este periodo, ya que la tasa de cambio fue ligeramente negativa para la selva alta perennifolia (-1.46% anual) con un total de 1 014.67 ha deforestadas, debido a la introducción de cultivo de café y en menor escala de maíz. La selva secundaria tuvo una tasa positiva de 0.82%, equivalente a un incremento de 66 ha

Cuadro 3. Tasa de cambio de uso del suelo, 1976-2000

Uso del suelo	Cambio (ha)		Cambio (%)		Tasa de cambio	
	1976-1993	1993-2000	1976-1993	1993-2000	1976-1993	1993-2000
BM	-1 835.61	-71.75	-2.61	-0.10	-5.58	-0.92
BM/VSa	-1 021.79	-165.78	-1.45	-0.24	-4.33	-2.74
PC	-13 585.62	4 002.25	-19.30	5.69	-3.20	2.78
PI	-259.95	386.57	-0.37	0.55	-0.97	3.38
SAP	-1 014.67	-995.28	-1.44	-1.41	-1.46	-4.45
SAP/VSa	1 112.76	-5 444.75	1.58	-7.74	0.82	-13.07
CP	12 686.75	-3 978.77	18.03	-5.65	7.23	-3.41
CA	3 627.76	6 018.32	5.15	8.55	1.48	4.49
ZU	290.37	249.19	0.41	0.35	8.59	7.33

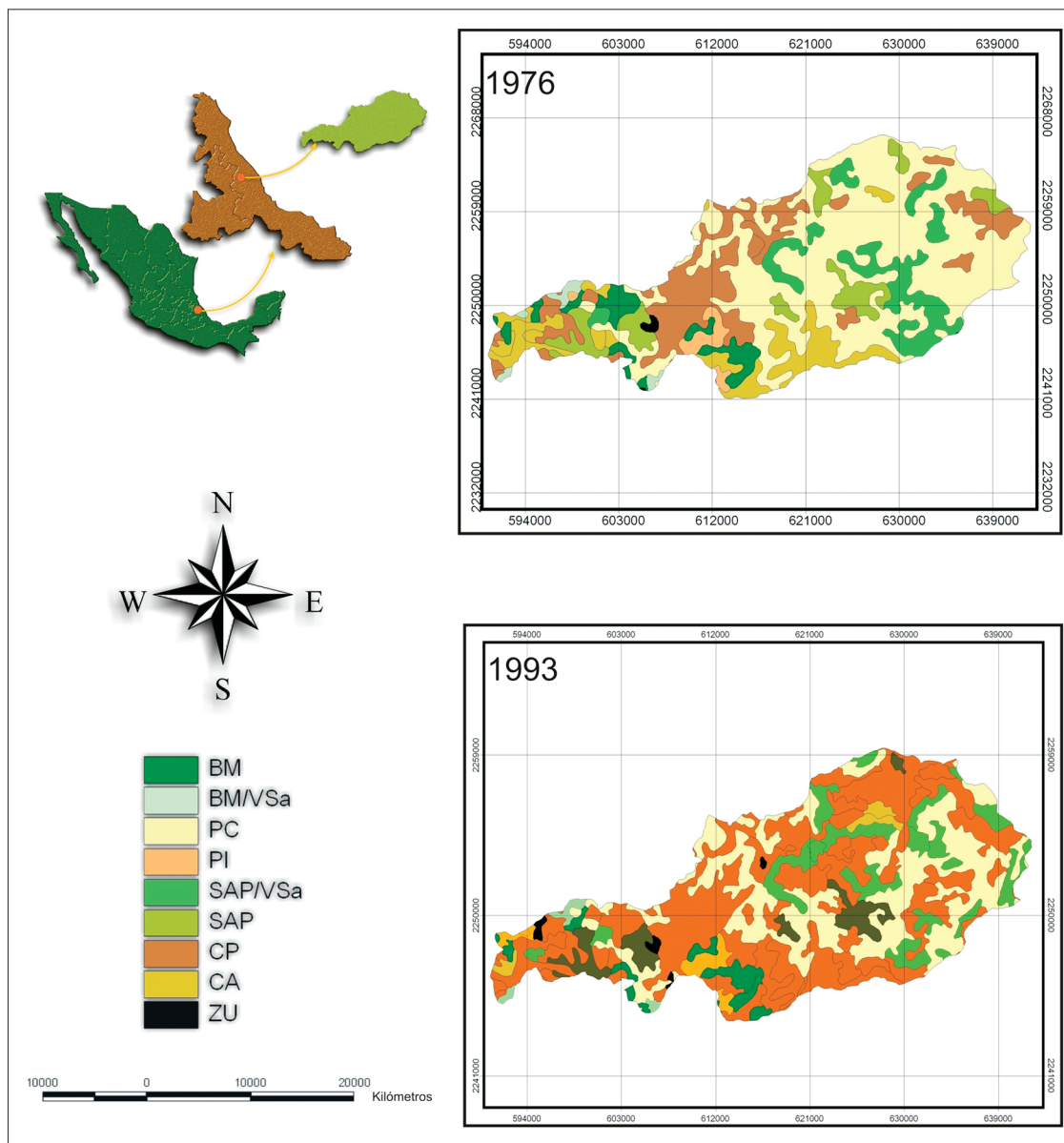


Figura 2. Comparativo espacial de uso del suelo, 1976-1993.

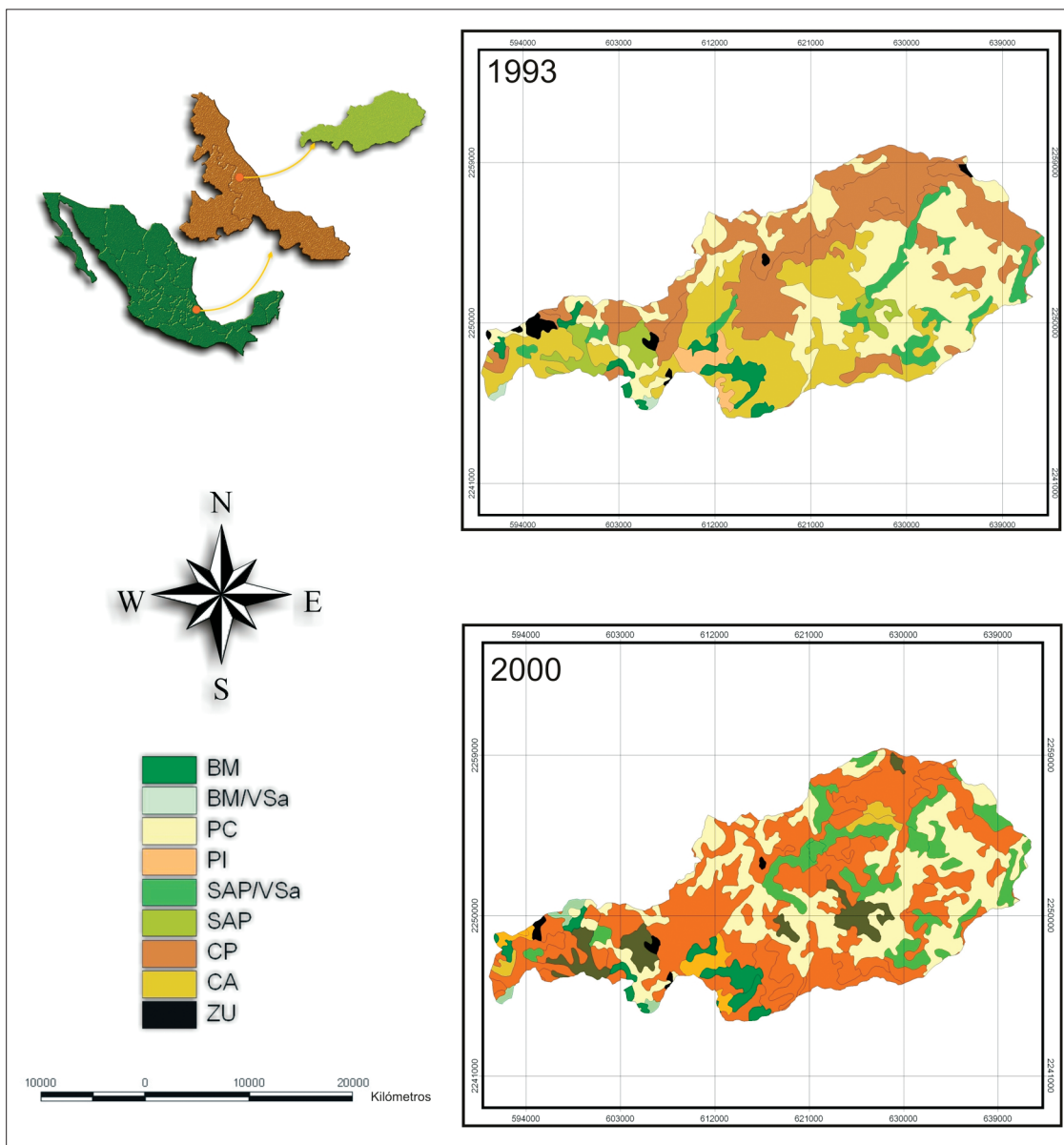


Figura 3. Comparativo espacial de uso del suelo, 1993-2000.

anuales para conformar un total de 1 112.76; este aumento se debió principalmente por el abandono de áreas de pastizal en la parte este que iniciaban un proceso sucesional bajo condiciones de clima cálido y semicálido.

La superficie ocupada por pastizal cultivado presentó una tasa de cambio negativa (-3.20%), de tal manera que para 1993 la superficie ocupada era de 18 888.73 ha; es decir, disminuyó su superficie 13 585.62 ha por la introducción de café. De igual manera, el pastizal inducido registró una pérdida de 259.95 ha durante este periodo, con una tasa de cambio de -0.37%.

Los cultivos anuales (maíz, frijol y chile) se incrementaron con una tasa de 1.48% al oeste de la zona en estudio, equivalente a 3 627.76 ha; aumentando su presencia dentro de la subcuenca de 18.62 a 23.77%, mientras que los cultivos permanentes pasaron de 5 766.88 a 18 453.62 ha, con una tasa de cambio de 7.23%, abarcando el 26.22% del total del área evaluada; y concentrándose en la parte centro-este de la subcuenca. Este significativo aumento se dio primordialmente por el fuerte apoyo brindado por el entonces Instituto Mexicano del Café (INMECAFE) para la introducción de este cultivo en la región, organismo que además era responsable del acopio, procesamiento y comercialización del aromático (Martínez, 2004).

Finalmente, el incremento de las zonas urbanas se dio principalmente en la porción centro-oeste de la subcuenca, pasando de 98.54 a 388.91 ha, y destacando por presentar la más alta relación de cambio (8.59%).

Durante el segundo periodo (1993-2000), la dinámica de cambio mantuvo la disminución de las áreas de bosque, aunque en mucho menor escala, ya que la superficie de mesófilo se redujo en 71.75 ha y la de bosque secundario en 165.78 ha; la tasa de deforestación fue de -3.66%. Este decremento en la deforestación de bosques se debió al abandono de parcelas que presentaban alto grado de erosión y que, por lo tanto, habían disminuido drásticamente su fertilidad (Castelán, 2003).

En contraste, las selvas fueron deforestadas a una tasa exorbitante (17.52% anual) pasando de 12 357.81 a 5 917.78 ha, resultando más afectada la selva secundaria, que perdió 5 444.75 ha; las actividades responsables de la mayor parte de estos cambios son, en primer lugar, la conversión de terrenos forestales a agrícolas con cultivos anuales, pues cerca de 860 ha de suelo sufrieron este proceso anualmente entre 1993 y 2000, incorporándose cultivos de maíz al este, y de maíz, frijol y chile al oeste de la subcuenca, sumando un total de 6 018.32 ha con una tasa de conversión de 4.49% anual; en segundo lugar, quien propició la eliminación de las selvas durante esta década fue la actividad ganadera, ya que es la responsable de la introducción de un total de 4 022.25 ha de pastizales cultivados al norte de la región, con una velocidad de 2.78% anual; mientras que los pastizales inducidos únicamente se acrecentaron en 386.57 ha (3.38% anual); finalmente, una pequeña porción de selva fue eliminada al noreste de la subcuenca por el aumento de zonas urbanas, las cuales se extendieron en 249.19 ha con una velocidad de 7.33% anual.

Especial atención requiere la reconversión de las áreas con cultivos permanentes a cultivos anuales durante este periodo, ya que éstas vieron reducida su superficie en 3 978.77 ha con una velocidad de -3.41% anual, este cambio se vio favorecido por varios factores de orden interno y externo, mismos que dieron lugar a una de las peores crisis experimentadas dentro del sector cafetalero; estos tres factores son: el rompimiento del Convenio Internacional del Café (CIC), la helada que se presentó en el mes de diciembre de 1989, y por último, la desaparición del INMECAFE.

El primero de ellos se da debido a la gran sobreoferta que existía del aromático en el mercado internacional, a las cuotas impuestas por los países miembros del CIC que no permitían exportar todo el café sino sólo una parte, y a la caída de los precios internacionales. La helada se presentó justo cuando la cosecha estaba en pleno repunte, y a pesar de que el fenómeno

duró sólo una noche y un día, esto fue suficiente para dañar toda la producción dentro de los próximos tres años, ocasionando la caída del precio en más del 50%, no redituando ningún tipo de utilidad a los productores de la región. Finalmente, es en este contexto cuando las causas de la crisis cafetalera empiezan a tomar cuerpo, ya que el gobierno decide la desaparición del Instituto, dejando a su suerte no sólo a la cafecultura regional de la subcuenca, sino a la cafecultura nacional (CEFP, 2001; Aguirre, 2003).

Con la desaparición de este organismo, los efectos en la subcuenca no se hicieron esperar, principalmente en los precios del grano; los productores se enfrentaban totalmente sin respaldo y sin experiencia a una esfera de comercialización totalmente ajena a la que estaban acostumbrados, pues ya no existía el precio oficial que los defendiera, no tenían asegurada la venta de su producto y no recibían ningún estímulo para continuar con la producción, afectando totalmente su ya de por sí deplorable ingreso (Fernández, 1995). A estos hechos se suma la disminución del crédito bancario a los pequeños productores, la exclusividad de los créditos a propietarios privados que contaban con la garantía suficiente para respaldar los préstamos, así como la falta de inversiones extranjeras, ya que a pesar de que se incrementaron hasta el 27% en el país, no beneficiaron a los pequeños cafetaleros que tenían sus parcelas dentro de áreas marginales (DGOF, 2002).

Si a los pequeños y extemporáneos apoyos económicos gubernamentales, la baja de productividad y altos costos de producción se agrega el hecho de que el promedio de tenencia de tierra por cafecultor en la subcuenca era de dos hectáreas (CEFP, 2001; DGOF, 2002) y la aparición de plagas como la roya del café y la broca del grano, así como los altos costos para su combate por parte de los pequeños cafecultores, veremos que es entendible la reconversión de zonas cafetaleras a zonas de cultivos anuales (Aguirre, 2003).

Pero ¿cuál es la probabilidad de que los usos del suelo que se desarrollan en la subcuenca permanezcan como tales? El análisis estadístico mostró que durante estos 24 años evaluados en términos generales las variaciones fueron muy dinámicas (Cuadros 4 y 5).

Tanto el bosque mesófilo como el bosque secundario y la selva con vegetación secundaria presentaron una baja probabilidad de permanecer como tales (30, 28 y 13%, respectivamente). El primero de éstos presenta una clara tendencia a ser transformado en zonas agrícolas de especies permanentes (36%) y anuales (20%), y en menor medida, a transformarse en pastizales y áreas urbanas. El bosque secundario mantiene la misma dinámica de transformación, sólo que a diferencia del anterior, un 10% de su superficie logró establecerse como bosque mesófilo, debido a la disminución de la deforestación, aunque otro 10% se destinó a pastizales.

La selva alta perennifolia fue la que mantuvo la mayor superficie dentro de su clase con una probabilidad media de conservarse (44%). Pese a ello, se observa una marcada tendencia a cambiar a cultivos permanentes (34%) y en menor escala a anuales (11%), de igual manera, este tipo de vegetación aportó el 7% de su territorio al cultivo de pastizales para la actividad ganadera que en la subcuenca se desarrolló. La selva con vegetación secundaria evidencia una alta tendencia a ser deforestada para la introducción de cultivos permanentes (44%) y, en menor escala, aunque no menos importante, a cultivos anuales (39%); tan sólo el 4% logró establecerse como selva alta perennifolia.

La clase de cultivos permanentes fue muy dinámica durante el periodo analizado, ya que permaneció en casi el 30% de su superficie con el mismo uso, presentando una baja probabilidad de permanencia; está cambiando claramente a cultivos anuales (42%) y en mucho menor proporción a zonas urbanas (3%) y pastizales (4%). Por su parte, los cultivos anuales se mantuvieron en el 90% con el mismo uso, hecho que demuestra su alta probabilidad de

Cuadro 4. Matriz de transición de uso del suelo, 1976-2000

Uso suelo 1976	Uso suelo 2000									
	BM	BM/VSa	PC	PI	SAP	SAP/VSa	CP	CA	ZU	Total 1976
BM	879.83	0	205.24	115.26	0	0	1074.55	593.91	112.31	2981.1
BM/VSa	188.48	549.64	195.28	0	0	0	690.26	243.66	91.34	1958.66
PC	0	0	21 712.44	0	312.83	1 233.31	5 254.87	3 909.76	51.14	32 474.35
PI	0	0	135.26	1 420.59	0	0	0	180	0	1 735.85
SAP	0	0	326.19	0	2 061.53	126.14	1 599.74	526.39	20	4 659.99
SAP/VSa	0	0	0	0	275.68	968.16	3 365.57	2 990.32	0	7 599.73
CP	0	221.45	206.57	326.62	0	684.67	1 683.44	2 447.91	196.21	5 766.87
CA	5.43	0	110	0	0	255.46	806.42	11 855.64	68.56	13 101.51
ZU	0	0	0	0	0	0	0	0	98.54	98.54
Total 2000	1 073.74	771.09	22 890.98	1 862.47	2 650.04	3 267.74	14 474.85	22 747.59	638.1	70 376.6

permanencia cediendo una mínima superficie a las clases de cultivos permanentes (6%), selva secundaria (2%), pastizal cultivado (1%) y zonas urbanas (1%).

Las zonas urbanas mantuvieron un constante aumento, presentando alta probabilidad de permanecer con esta tendencia y favoreciendo

la eliminación del bosque mesófilo, así como ganando terreno a las áreas con cultivos.

La dinámica de cambios entre diferentes usos del suelo durante un periodo de tiempo determinado también puede ser visualizada como un flujo de terrenos que pasan de una forma de manejo a otra. En la Figura 4 se muestra

Cuadro 5. Matriz de probabilidad de permanencia de uso del suelo, 1976-2000

Uso del suelo 1976	Uso del suelo 2000									
	BM	BM/VSa	PC	PI	SAP	SAP/VSa	CP	CA	ZU	Total
BM	0.30	0	0.07	0.04	0	0	0.36	0.19	0.04	1.00
BM/VSa	0.10	0.28	0.10	0	0	0	0.35	0.12	0.05	1.00
PC	0	0	0.67	0	0.01	0.04	0.16	0.12	0	1.00
PI	0	0	0.08	0.82	0	0	0	0.10	0	1.00
SAP	0	0	0.07	0	0.44	0.03	0.34	0.11	0	1.00
SAP/VSa	0	0	0	0	0.04	0.13	0.44	0.39	0	1.00
CP	0	0.04	0.04	0.06	0	0.12	0.29	0.42	0.03	1.00
CA	0	0	0.01	0	0	0.02	0.06	0.90	0.01	1.00
ZU	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00	1.00

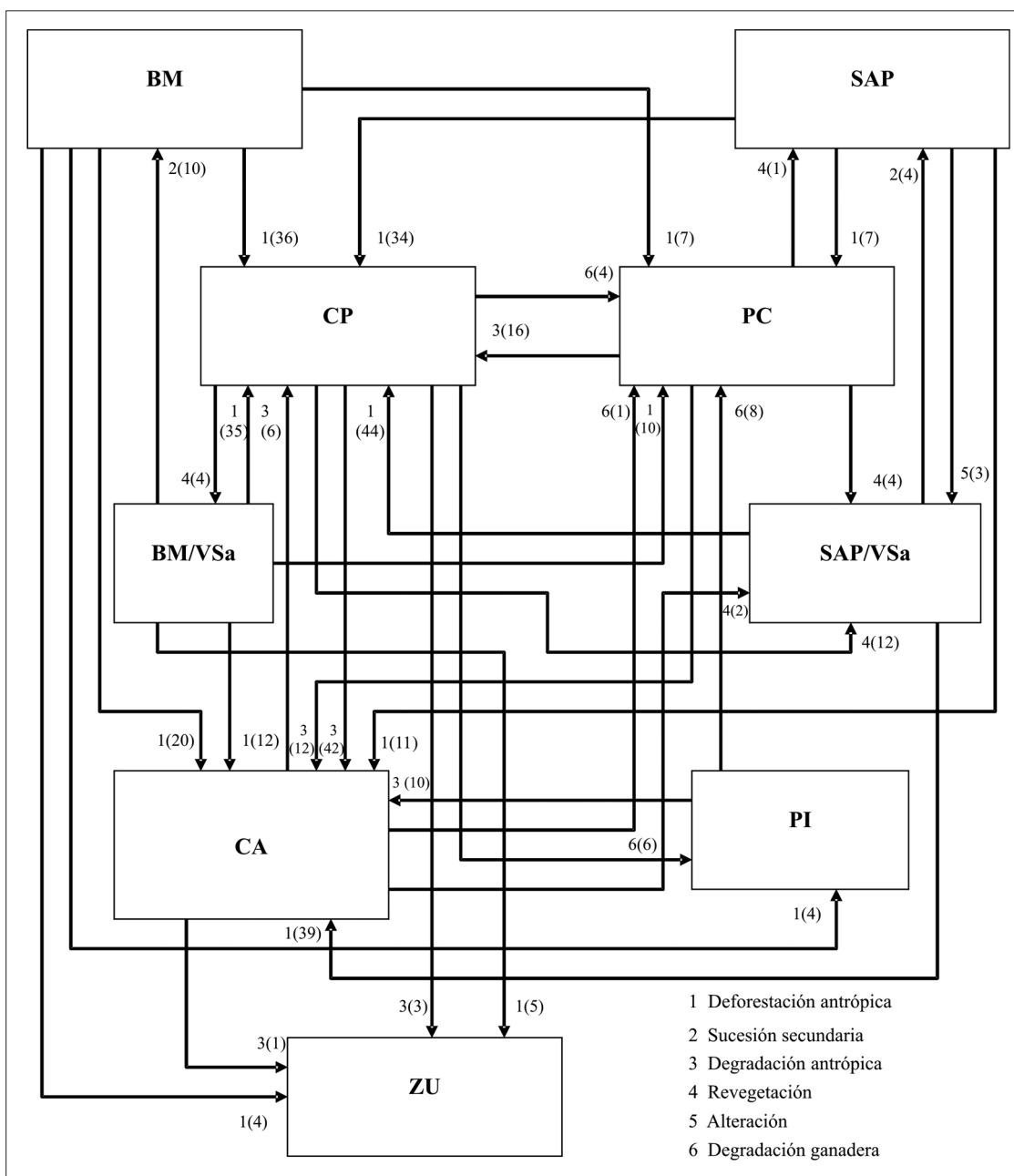


Figura 4. Modelo de cambio de uso del suelo. El modelo muestra las clases de uso empleadas (Cuadros 4 y 5), los principales procesos (números enteros) y tasas de cambio (en porcentaje entre paréntesis) durante el periodo 1976-2000.

de manera diagramática el diseño del modelo de cambio para la subcuenca, en él se muestran las clases de uso empleadas en los Cuadros 4 y 5, así como los principales procesos (números enteros) y tasas de cambio (en porcentaje entre paréntesis) para el periodo 1976-2000.

Utilizando este marco conceptual, es posible proyectar lo que sucedería de mantenerse o modificarse las tasas actuales. Los análisis muestran que aun cuando se detuviera por completo el cambio de uso del suelo por ganadería o agricultura, las bases de recursos se verían seriamente reducidas, ya que la vegetación primaria pasa a otro uso con una tasa superior a aquélla con lo que se recupera a su estado original. Para lograr mantener en el mediano plazo la cantidad de vegetación dentro de sus valores actuales, todas las tasas de deterioro ligadas a las actividades del hombre tendrían que reducirse en un 80%. Si bien la cifra no debe considerarse exacta, sí puede dar una idea de lo lejos que se encuentran las prácticas actuales de aquéllas que serían sustentables. El análisis también revela que la alteración (pasó de vegetación primaria a otro uso) es un proceso clave que regula la dinámica de todo el sistema de la subcuenca.

CONCLUSIONES

Tomando como base los resultados de este trabajo, se concluye que en la subcuenca del río San Marcos entre el periodo de 1976 al 2000 se eliminó el 62.65% de bosque mesófilo de montaña, mismo que mantiene baja probabilidad de permanecer como tal, ya que los programas establecidos por el gobierno han favorecido su deforestación para la introducción de cultivos como el café.

Las selvas han decrecido 62%, y al igual que los bosques, la selva secundaria presenta una baja probabilidad de permanencia por el aumento de cultivos anuales; en el caso de la selva alta perennifolia, la probabilidad de permanecer como tal es media; no obstante, la amenaza de desaparecer persiste por el aumen-

to de las zonas agrícolas y por el incremento de las áreas de pastizal dedicadas a la actividad ganadera.

El pastizal cultivado disminuyó su superficie 29.5% durante este periodo; sin embargo, en la última década ha presentado un crecimiento de 4 002.25 ha; hecho que determina su alta probabilidad de permanencia. El pastizal inducido, al igual que el anterior, presenta una probabilidad de 82% de quedarse como tal.

Los cultivos anuales muestran la probabilidad más alta de permanencia (90%), éstos se incrementaron en 73.62%; mientras que los cultivos permanentes aumentaron 151%, pese a esta cifra en la actualidad, la probabilidad de permanencia que presentan es de apenas 29%; las zonas urbanas representan el 0.91% de la superficie de la subcuenca; no obstante, han evidenciado un incremento de 547%; cabe recalcar que las áreas rurales son el principal tipo de comunidad dentro de la zona en estudio, mismas que muestran una marcada dispersión y, por lo tanto, una fuerte presión sobre los recursos naturales de la región.

Finalmente, al realizar un balance de las tasas de cambio de uso del suelo, puede observarse que son más elevadas entre 1993 y 2000, que las correspondientes al periodo 1976-1993, lo que significa que los procesos se están acelerando, por lo que urge el desarrollo y aplicación de programas sustentables, enfocados al aprovechamiento racional de los recursos naturales de la subcuenca.

AGRADECIMIENTOS

Al Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas de la BUAP por facilitar el recurso económico para la adquisición del material digital empleado y al CONACYT por la beca-crédito otorgada.

REFERENCIAS

Aguirre, S. (2003), *La cafeticultura en México y en el mundo*, CONESPO, Puebla, México.

- Berry, M., R. O. Flamm, B. C. Hazen y R. L. MacIntyre (1996), *The land-use change and analysis system (LUCAS) for evaluating landscape management decisions*, IEEE Computational Science & Engineering, vol. 3(1), pp. 24-35.
- Bocco, G. y H. Riemmann (1997), *Quality assessment of polygon labeling, photogrammetric engineering & remote sensing*, vol. 63(4), pp. 393-395.
- Castellán, V. (2003), *Diagnóstico de la erosión de los suelos rojos de la Sierra Norte de Puebla. Alternativas de uso y manejo*, tesis de Maestría, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.
- CEFP (2001), *El mercado del café en México*, Cámara de Diputados, H. Congreso de la Unión, Centro de Estudios de las Finanzas Públicas, México.
- DGOF (2002), *Situación actual del mercado internacional del café*, AGERCA, Dirección General de Operaciones Financieras, México.
- ESRI (1999), *Arc View Ver 8 GIS*, Environmental Systems Research Institute, Inc.
- FAO (1995), *Forest resources assesment 1990*, Global synthesis FAO Forestry, Paper 124, Roma.
- Fernández, A. (1995), *Crisis de los cafetaleros poblanos, de 1989 a la fecha*, tesis de Licenciatura, Facultad de Economía, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.
- Guerra V. y S. Ochoa (2006), "Evaluación espacio-temporal de la vegetación y uso del suelo en la reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco (1990-2000)", *Investigaciones Geográficas*, Boletín, núm. 59, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 7-25.
- IGEO-INE (2002), *Inventario Nacional Forestal a escala 1:250 000*, Instituto de Geografía, UNAM-INE, SEMARNAT, México.
- INEGI (1973), *Fotografías aéreas blanco y negro*, escala 1:75 000.
- INEGI (1976), *Serie I de uso del suelo y vegetación a escala 1:250 000*, México [cd-rom].
- INEGI (1984a), *Fotografías aéreas blanco y negro*, escala 1:75 000.
- INEGI (1984b), *Fotomapas*, escala 1:20 000.
- INEGI (1993), *Serie II de uso del suelo y vegetación a escala 1:250 000*, México [cd-rom].
- INEGI (2000a), *Síntesis Geográfica del estado de Puebla y anexo cartográfico*, México [cd-rom].
- INEGI (2000b), *Fotografías aéreas blanco y negro*, escala 1:75 000.
- ISRIC (1994), *World referent base for soil resources*, FAO, International Soil Referente and Information Centre, Rome, Italy.
- Kaimowitz, D. y A. Angelsen (1998), "Economic models of tropical deforestation", *A Review Center for International Forestry Research*, no. 75, Malaysia, pp. 305-315.
- Landa, R., J. Meave and J. Carabias (1998), "Environmental deterioration in rural Mexico: an examination of the concept", *Ecological Applications*, vol. 7(1), pp. 316-329.
- López, G. (1999), *Cambio de uso de suelo y crecimiento urbano en la ciudad de Morelia*, tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, División de Ciencias y Humanidades, Facultad de Biología, Morelia, Michoacán, México.
- Martínez, C. (2004), *Comercialización de café en la región de Xicotepec (1986-1994)*, tesis de Maestría, Facultad de Economía, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.
- Masera, O. (1996), *Deforestación y degradación forestal en México*, Documento de Trabajo núm. 19, Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, Pátzcuaro, Michoacán, México.
- Mateo, J. y M. A. Ortiz (2001), "La degradación de los paisajes como concepción teórico-metodológica", *Serie Varia, Nueva época*, núm. 1, Instituto de Geografía, UNAM, México.

- Meli, P. (2003), "Restauración ecológica de bosques tropicales. Veinte años de investigación académica", *Interciencia*, núm. 8, pp. 581-589.
- Moolenaar, M. (1989a), "Single valued vector maps. A concept in geographic information systems", *GIS*, vol. 2(1), pp. 18-26.
- Moolenaar, M. (1989b), "Towards a geographic information theory", *ITC Journal*, vol. 1, pp. 5-11.
- Priego, Á., H. Cotler, A. Fregoso, N. Luna y C. Enríquez (2004), "La dinámica ambiental de la cuenca Lerma-Chapala", *Gaceta Ecológica*, núm. 71, INE-SEMARNAT, México, pp. 23-38.
- Ordóñez, F., O. Rosete, B. Masera y F. Jong (2000), *Dinámica de cambio en la cobertura forestal y uso del suelo asociada a los almacenes y emisiones de carbono: el caso de Santiago Tingambato, Michoacán*, tesis de Maestría, Centro de Investigación en Ecosistemas, UNAM, Morelia, Mich., México.
- Reyes, H., M. Aguilar, J. R. Aguirre e I. Trejo (2006), "Cambios en la cubierta vegetal y uso del suelo en el área del proyecto Pujal-Coy, San Luis Potosí, México, 1973-2000", *Investigaciones Geográficas*, Boletín, núm. 59, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 26-42.
- Ruiz, J., M. Riverol, V. Tamaríz y R. Castelán (2005), *Zonificación agroecológica de la Sierra Norte de Puebla*, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.
- Salazar C. E., J. Zavala, O. Castillo y R. Cámara (2004), "Evaluación espacial y temporal de la vegetación de la Sierra Madrigal, Tabasco, México (1973-2003)", *Investigaciones Geográficas*, Boletín, núm. 54, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 7-23.
- Sánchez, J., G. Bocco, J. Fuentes y A. Velázquez (2003), "Análisis de cobertura y uso del terreno en el contexto de su dinámica espacio-temporal", en Velázquez, A., A. Torres y G. Bocco (comps.), *Las enseñanzas de San Juan. Investigación participativa para el manejo integral de recursos naturales*, Instituto Nacional de Ecología, México, pp. 36-42.
- Velázquez, A., J. F. Mas, J. R. Díaz-Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, 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*, vol. 62, pp. 21-37.
- Vitousek, P., M. Mooney, J. Lubchenco and J. Melillo (1997), "Human domination of Earth's ecosystems", *Science*, no. 277, USA, pp. 494-499.