

Predicción del cambio de cobertura y uso del suelo. El caso de la ciudad de Morelia

Erna Martha López Granados*
Gerardo Bocco*
Manuel Eduardo Mendoza Cantú*

Recibido: 10 de enero de 2000
Aceptado en versión final: 19 de junio de 2000

Resumen. En este trabajo se describen patrones de cambio de uso de suelo en una ciudad de rápido crecimiento en México en los últimos 35 años, con la utilización de fotografías aéreas de 1960, 1975 y 1990. También se realizan modelos predictivos para conocer la dirección del cambio de uso de suelo en los próximos treinta años, mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG), cadenas de Markov y análisis de regresión. En este artículo estamos particularmente interesados en explorar tanto relaciones entre crecimiento urbano y afectación del paisaje; como de crecimiento urbano y poblacional. Los resultados indican que la ciudad de Morelia creció 600% de 1960 a 1997, además los pronósticos realizados con el modelo markoviano tienen un bajo nivel de predicción en la zona en estudio; en cambio las regresiones lineales realizadas entre el tamaño de la población y la superficie urbano permitieron construir un modelo más robusto y con mayor poder predictivo con respecto al crecimiento de la ciudad. El acercamiento utilizado puede ser extrapolado a áreas similares caracterizadas por crecimiento urbano y cambio de cobertura.

Palabras clave: Cambio de uso de suelo, crecimiento urbano, sistemas de información geográfica, cadenas de Markov y análisis de regresión.

Prediction about changes in land-use. The case of Morelia

Abstract. The research described herein investigates the patterns of land-use change in a mid-sized, fast-growing city in Mexico during the last 35 years. It uses aerial photographs from 1960, 1975 and 1990 as well as Geographic Information Systems (GIS). Interest focuses in exploring the relationships between urban growth and its effects on landscape, as well as between urban expansion and population growth. Results indicate that the city of Morelia increased 600% in size from 1960 to 1997. Predictive models of Markov Chains and linear regression analysis have been used to predict the direction of land use change in the next 30 years. The Markovian model has a low prediction level for changes in land cover and land use in the study area. However, linear regression analyses for the relationship between population size and urban surface allow the construction of a more robust model with a better predictive power regarding city growth. The approach used here could be extrapolated for similar areas characterized by urban growth and changes in land cover.

Key words: Land-use change, urban growth, Geographic Information System, Markov Chains and regression analyses.

INTRODUCCIÓN

En la década comprendida entre los años de 1980 y 1990, la mitad de la población mundial habitaba en ciudades; para el año 2050, se estima que más del 60% de la población se encontrará establecida en zonas urbanas y el tamaño de las ciudades en los países en desarrollo crecerá en 160% (Ramachandran, 1992). Una forma de monitorear la transformación rural - urbana es mediante el análisis del cambio en el uso del suelo.

Un estudio de la cobertura y uso del terreno

supone analizar y clasificar los diferentes tipos de cobertura y usos asociados, que el hombre practica en una zona o región determinada (Anderson *et al.*, 1976). Su importancia radica en que, a escala global, regional y local, cambios en el uso del terreno están transformando la cobertura a un paso acelerado. No obstante, los datos cuantitativos: en dónde, cuándo y por qué cada cambio toma lugar globalmente, están aún incompletos, y, algunas veces, estos datos son inexactos (Meyer y Turner, 1994). De igual forma, el conocimiento de los procesos del cambio de cobertura son aún fragmentarios para estimar el pleno impac-

* Instituto de Ecología-UNAM, Campus Morelia, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Ex Hacienda San José de la Huerta, 58190 Morelia, Michoacán. E-mail: gbocco@ate.oikos.unam.mx; mmendoza@ate.oikosunam.mx

to de estos cambios en sistemas naturales y humanos (Lambin, 1997). Por tal motivo, los estudios sobre este tema son fundamentales.

El objetivo de este trabajo es la cuantificación de las tendencias espaciales y temporales del crecimiento de la ciudad de Morelia, y la formulación de un modelo predictivo del crecimiento de la ciudad en un período de 30 años.

Dada la importancia de conocer los patrones de expansión de la mancha urbana, se plantea como hipótesis que el crecimiento de la ciudad de Morelia es predecible en función del incremento poblacional de la ciudad en los últimos 50 años.

Considerando la relación entre crecimiento urbano y crecimiento poblacional en otras ciudades del país, no debería de esperarse una relación lineal entre el crecimiento de la población y el área urbanizada. Lo anterior, debido a cambios en la estructura urbana y en los usos del suelo, así como a cambios en la relación entre tamaño de la población y número de viviendas. En el caso de la ciudad de Morelia, por ejemplo, debe tenerse en cuenta la implantación, a partir de los años ochenta, de actividades comerciales y de servicios (como supermercados y centros comerciales), que requieren superficies proporcionalmente mayores a las que requieren el comercio y los servicios tradicionales. En lo que respecta a la relación entre población y viviendas, a partir de los años setenta se observa en las áreas urbanas una reducción significativa del tamaño medio de los hogares y un aumento en la formación de nuevos hogares, que es superior a la tasa de crecimiento de la población; ambas tendencias tienen como implicación una mayor producción de viviendas significativamente superior a la tasa de crecimiento de la población y, por consiguiente, necesidades de suelo para uso habitacional significativamente superiores a las que sugeriría el crecimiento absoluto de la población. (Duhau, comunicación personal, 1999).

En el caso de la zona metropolitana de la Ciudad de México, por ejemplo, la tasa de

crecimiento anual medio de la población fue de 2.6% entre 1970 y 1990, en tanto que la del número de viviendas fue de 3.5% para el mismo período; y para el lapso de 1990-1995, la primera fue de 2.1% y la segunda de 3.9% (Cruz, 1998).

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se basa en la comparación secuencial y en la ayuda de un estereoscopio de espejos para el análisis de 71 fotos aéreas pancromáticas (Figura 1), con una escala aproximada de 1:25 000 (1960), 1:50 000 (1975) y 1:25 000 (1990); el área en estudio cubre una superficie de 187.5 km² (Figura 2). También se empleó una subescena de la imagen digital de satélite Landsat TM, con una resolución de 30m x 30m por pixel, correspondiente al mes de septiembre de 1997. La imagen digital se utilizó para definir la mancha urbana de la ciudad de Morelia en dicho año.

El material cartográfico necesario para la elaboración de la investigación consistió en la cartografía topográfica a escala 1:50 000 y cartas temáticas sobre geología y edafología elaboradas por INEGI (escala 1:50 000), así como en las cartas de crecimiento urbano y zonas económicas elaboradas por el gobierno del estado de Michoacán (escala 1:40 000). La escala de restitución del presente trabajo es de 1:50 000, debido a que el mapa base de la zona en estudio corresponde a esta escala. La información demográfica utilizada en el trabajo se obtuvo de los censos elaborados por INEGI en los años de 1940, 1960, 1970, 1980 y 1990 (INEGI, 1990 y 1993).

La generación y manipulación de la información espacial se realizó en un SIG, ILWIS (Integrated Land and Water Information System) versiones 1.41 (ILWIS, 1993) y 2.1 (ILWIS, 1997), diseñado por el Instituto de Levantamientos Aeroespaciales y Ciencias de la Tierra (ITC) en Enschede, Países Bajos.

El análisis geomorfológico siguió parcialmente el procedimiento de levantamiento geomorfológico utilizado por el ITC (Verstappen y Van Zuidam, 1991) y criterios diferenciadores de

las clases taxonómicas en el sentido de Zinck (1988). Las características que distinguen a las unidades de relieve utilizadas en su delimitación y que forman parte de la leyenda y descripción fueron: litología, estructura, tipo de suelo, uso de suelo y vegetación.

Las unidades de relieve están ligadas a los paisajes geomorfológicos definidos por Bocco *et al.* (1996) en función de criterios morfo-gráficos y morfométricos. En esta investigación se diferenciaron ocho clases de relieve: a) laderas inclinadas rectilíneas. b) laderas

suaves e irregulares, c) laderas suaves y redondeadas, d) elevaciones suaves e irregulares, e) piedemonte, f) planicie aluvial, g) superficie cumbral y h) valle acumulativo.

La leyenda que se utilizó para realizar la fotointerpretación de la cobertura y el uso de suelo, contiene ocho clases: a) Bosque mixto; b) Plantaciones de eucalipto; c) Pastizales; d) Matorrales; e) Pastizales - Matorrales y Matorrales - Pastizales; f) Cultivos; g) Zona urbana de la ciudad de Morelia, y h) Otras zonas urbanas (López Granados, 1999).

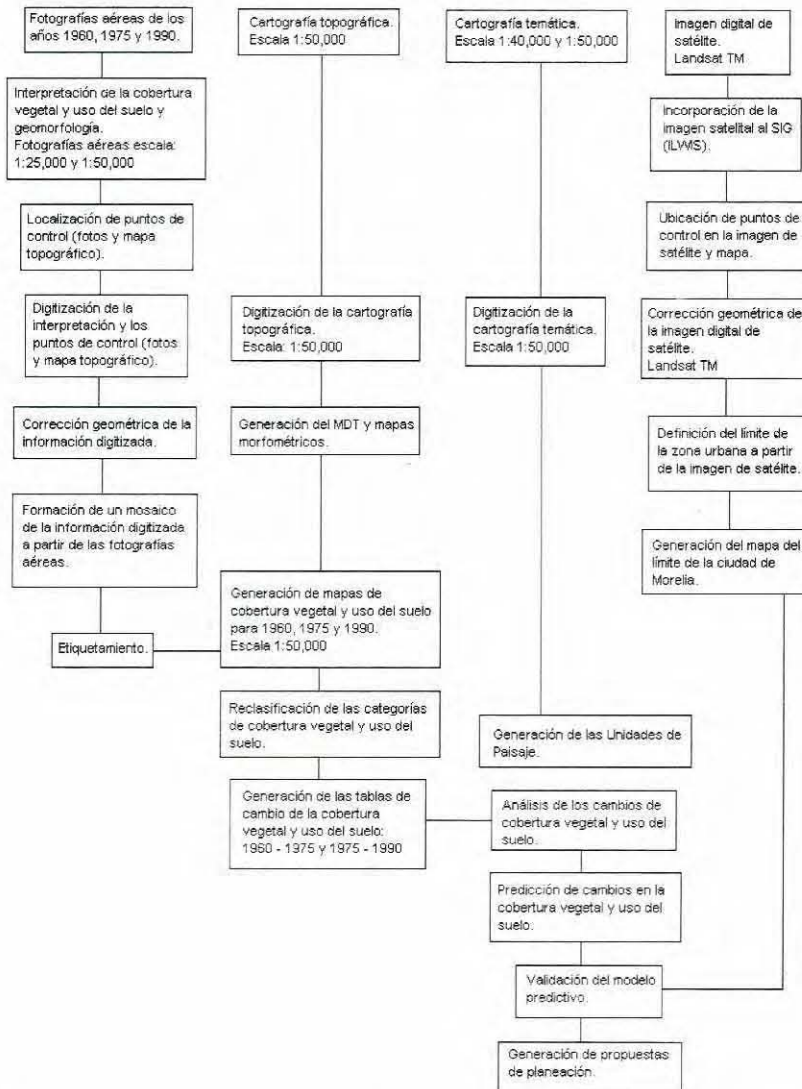


Figura 1. Diagrama de flujo de la secuencia de pasos metodológicos seguidos en la investigación.

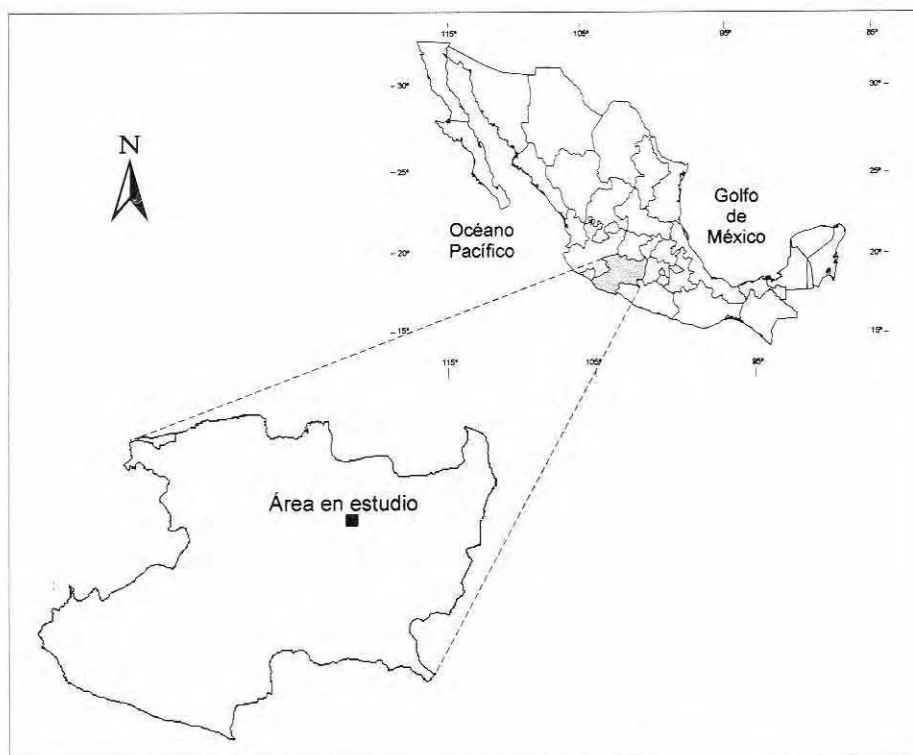


Figura 2. Área en estudio.

Digitización

Una vez realizada la fotointerpretación de la cobertura y uso de suelo y relieve, así como su validación en campo, se procedió a su digitización en un modelo vectorial dentro del SIG. Posteriormente, los arcos digitizados se restituyeron automatizadamente dentro del sistema, a fin de generar las bases de datos de los mapas digitales de cobertura de tres años (1960, 1975 y 1990) y del relieve.

La corrección geométrica de las bases de datos se realizó por medio de la restitución fotogramétrica por monoploteo, aplicando ecuaciones de colinealidad tridimensional para establecer los seis parámetros que definen la orientación exterior o absoluta del centro de toma de cada fotografía aérea y la posterior corrección de cada uno de los puntos que conforman los segmentos fotointerpretados (ILWIS, 1993; López Blanco *et al.*, 1995) con ayuda del MDT para conocer la altura de cada uno de los puntos de control.

Una vez terminada la corrección geométrica de los arcos, se realizó un mosaico controlado con los segmentos que contienen la interpretación de la cobertura vegetal y uso del terreno (unión de los archivos vectoriales). Las bases de datos espaciales de cada uno de los mosaicos controlados fueron editadas en el SIG, a fin de unir todos los segmentos de la base de datos. Posteriormente, se realizó el proceso de poligonización y etiquetamiento en las unidades espaciales. Finalmente, con objeto de validar la calidad espacial de la base de datos se realizó la verificación de polígonos siguiendo la técnica descrita por Bocco y Riemann (1997).

Análisis de regresión

Con los datos de población de los censos realizados por INEGI y el área de la mancha urbana calculada en este trabajo, se realizó el análisis de regresión entre crecimiento de la mancha urbana y crecimiento de la población.

Además, con objeto de fortalecer el modelo se exploró el comportamiento entre la tasa de crecimiento y el tiempo, considerando los datos de población de la ciudad en los años de 1940, 1955, 1960, 1970, 1980 y 1990.

El crecimiento urbano de la ciudad de Morelia se predijo en función del incremento poblacional al año 2005; este modelo fue validado para 1997, con la superficie de la mancha urbana extraída de la imagen digital de satélite de esa fecha.

Matrices de Markov

El análisis del crecimiento urbano de la ciudad de Morelia se realizó a partir de la elaboración de matrices de Markov de primero y segundo orden. Las matrices de Markov son tablas con arreglos simétricos que contienen en uno de los ejes los tipos de vegetación y usos del suelo en el año base y, en el otro eje, las mismas categorías en el segundo tiempo. De esta forma, cada una de las celdas de la diagonal principal de la matriz representa la superficie (ha) de cada clase de uso del suelo que permaneció en la misma categoría en el período considerado, mientras que el resto de las celdas estiman la superficie de una determinada cobertura o tipo de uso de suelo que pasó a otra categoría, permitiendo entender la dinámica de cambio en la cobertura y uso de suelo a nivel local o regional (Aaviksoo, 1995; Bocco *et al.*, 2001).

A partir de las matrices descritas se elaboraron matrices de probabilidad de transición para cada una de las clases de cobertura/uso seleccionadas. Se supuso que la probabilidad de transición (P_{ij}) de cada clase de la matriz es proporcional a la superficie remanente de la misma clase entre 1960 - 1975 y 1975 - 1990. Su expresión matemática es:

$$P_{ijA} = S_{ij} (1960) / S_j (1975)$$

$$P_{ijB} = S_{ij} (1975) / S_j (1990)$$

Donde S_{ij} es la superficie del elemento "ij" de la matriz de transición de cobertura/uso del suelo en 1960 (o 1975) y " S_j " la superficie de la clase de cobertura/uso del suelo "j" en 1975 (o 1990). De esta manera, para cada categoría de uso de suelo "j".

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

Al elevar al cuadrado la matriz de transición se obtiene una matriz de segundo orden, la cual estima los cambios en superficie de cada clase de cobertura y uso de suelo para un tiempo determinado.

RESULTADOS

Calidad de la base de datos

Durante la realización de este trabajo se evaluó el grado de error en cada una de las fases de la investigación: a) digitización de la interpretación realizada en las fotos, b) corrección fotogramétrica y c) etiquetamiento de los polígonos.

a) Digitización de la interpretación realizada en las fotos. El promedio del error de captura de la digitización de la interpretación fotográfica se calculó para cada año del trabajo, el promedio de los valores sigma obtenidos es menor a uno, lo que significa que la magnitud del error es aceptable (ILWIS, 1997).

b) Corrección fotogramétrica. Se definió como umbral en la corrección fotogramétrica un error medio cuadrático (EMC) menor a 50 m; es decir, menos de un milímetro en el papel, considerando un mapa base a escala 1:50 000. El promedio del error medio cuadrático fue menor a 25 m para los años 1960 y 1975 y menor de 30 m para 1990, de tal manera que la confiabilidad de la corrección geométrica por medios automatizados se encuentra dentro de los niveles de error aceptables para el tipo de escala utilizada (menor a 50 m).

c) Calidad del etiquetamiento de los polígonos. Las clases presentes en la zona de estudio se

generalizaron; es decir, fueron reclasificadas para manipular la información de forma más clara y sencilla. Las 18 clases existentes de cobertura y uso de suelo se reagruparon y se presentan en ocho clases de cobertura vegetal y uso del suelo para cada año, a excepción de 1960, cuando no existe la clase plantaciones de eucalipto. La verificación del etiquetamiento se realizó en cada una de las bases de datos de cobertura vegetal y uso del suelo sin generalizar. Se delimitaron 479 polígonos en 1960, 304 en 1975 y 713 en 1990, en total 1 496 polígonos en los tres años del trabajo. Se verificó el 25% de los polígonos totales (379 polígonos), y se registraron 11 errores en los tres años verificados (uno en la clase bosques mixtos, tres en pastizales, dos en la clase matorral - pastizal, uno en la clase de bosques mixtos, dos en pastizales y dos en cultivos). El muestreo de los polígonos terminó cuando todas las clases no generalizadas estuvieron representadas en el muestreo por lo menos una vez, si éstas se conformaban de cuatro o menos polígonos, o bien, los valores de confianza fueran superiores al 97% (es decir, si se toman al azar 100 puntos, 97 de ellos serán correctos).

Formas de relieve

Las formas de relieve mejor representadas en el área son: las laderas suaves y redondeadas, localizadas principalmente en la parte norte y sur de la zona en estudio, con una superficie de 6 096 ha (32.5%); la planicie aluvial se encuentra en la porción central y sudoeste del área y cubre una superficie de 5 151 ha (27.5%), y por último, las laderas inclinadas y rectilíneas que ocupan 3 003 ha (16%) y se localizan en la porción este del área en estudio. Las unidades de paisaje diferenciadas en este estudio se basan en las unidades relativamente estables del relieve que se caracterizaron con anterioridad.

Cambios de cobertura vegetal y uso del suelo

El análisis espacial de la información examina el comportamiento de las categorías de cobertura-uso, considerando el área y el porcentaje de cobertura de las clases generalizadas para cada tiempo (Cuadro 1 y Figura 3).

Cuadro 1. Cobertura vegetal y uso del suelo en 1960, 1975 y 1990 en la zona en estudio

Clase	1960			1975			1990		
	Número de polígonos	Superficie ha	% de cobertura	Número de polígonos	Superficie ha	% de cobertura	Número de polígonos	Superficie ha	% de cobertura
Bosques	74	847	4.5	32	712	3.8	91	1 788	9.5
Plantaciones de eucalipto	0.0	0.0	0.0	2	77	0.4	4	353	1.9
Pastizal	112	2 562	13.7	35	1 451	7.7	58	729	3.9
Matorral	46	412	2.2	19	788	4.2	34	823	4.4
Matorral - Pastizal	124	2 230	11.9	45	2 790	14.9	144	1 603	8.5
Cultivos	14	11 392	60.8	13	10 627	56.7	29	7 588	40.5
Morelia	25	1 004	5.3	70	1 713	9.1	260	5 081	27.1
Otros asentamientos urbanos	84	303	1.6	88	592	3.2	93	787	4.2
Total	479	18 750	100.0	304	18 750	100.0	713	18 750	100.0

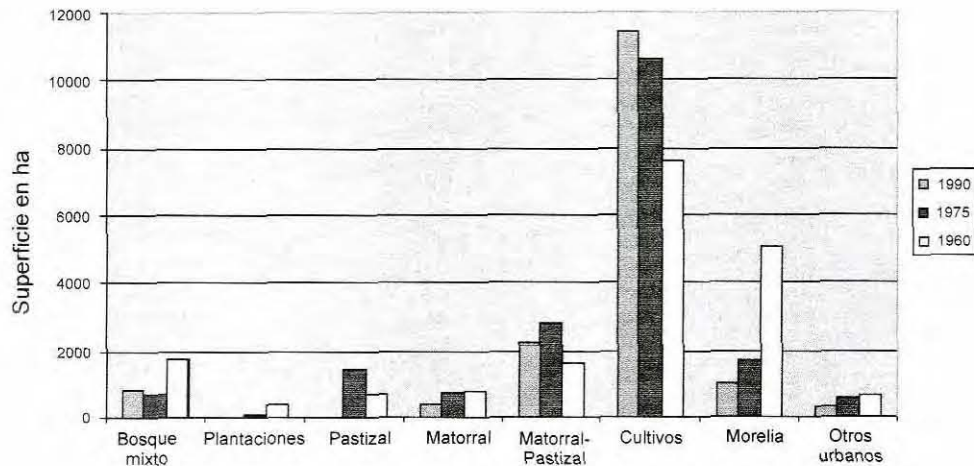


Figura 3. Distribución de la superficie de las clases de cobertura vegetal y uso del suelo por clase y por año.

La categoría "cultivos" cubre la mayor parte de la zona en estudio durante los tres años. Esta clase se localiza en todas las unidades de relieve, a excepción de las laderas suaves e irregulares; sin embargo, los mayores porcentajes se ubican principalmente en la planicie aluvial y en las laderas suaves redondeadas.

La superficie de la clase "cultivos" decreció en toda la zona en estudio, esta categoría presenta el menor número de polígonos (clase con menor fragmentación durante los diferentes años, Cuadro 1). La zona en estudio, por las características geomorfológicas y edáficas que presenta, se ha dedicado por un largo período a la agricultura de riego y de temporal; por esta razón, los cultivos son la clase mejor representada.

La extensión de la clase "bosques" aumentó de 1960 a 1990 (Cuadro 1). En la interpretación de las fotografías correspondiente a 1975, se observa que existe un matorral cerrado en ese lugar, que para 1990 se ha convertido en un bosque formado principalmente por encinos, árbol que de acuerdo con la bibliografía, es conocido por su capacidad de regeneración a partir de los tocones (Figuras 4, 5, 6).

En 1960 no existía la categoría de "plantaciones" de eucalipto en la zona en estudio, en 1975 es posible distinguir algunas zonas con plantaciones que perduran hasta la actualidad. Las plantaciones de eucalipto se localizan principalmente en laderas inclinadas rectilíneas y laderas suaves redondeadas.

La ciudad de Morelia experimentó un crecimiento importante en el tiempo del estudio (Cuadro 2 y Figura 7). La superficie de cambio es de 709 ha de 1960 a 1975, y de 3 368 ha de 1975 a 1990.

La clase "otros asentamientos urbanos" crece en forma limitada al paso de los años, porque el incremento de la clase queda encubierto por la expansión de la ciudad de Morelia, ya que al extenderse ésta, absorbe a las poblaciones que la rodean (Figuras 4, 5, y 6).

Cambios de cobertura y uso del suelo en Morelia

La ciudad de Morelia es la clase que experimentó la expansión más importante dentro del área en estudio (Cuadro 1). El incremento en superficie de 1960 a 1975 es de 71% y, de 1975 a 1990, de 197% (con respecto al tamaño de la ciudad en 1975; Figuras 7, 8 y 9).

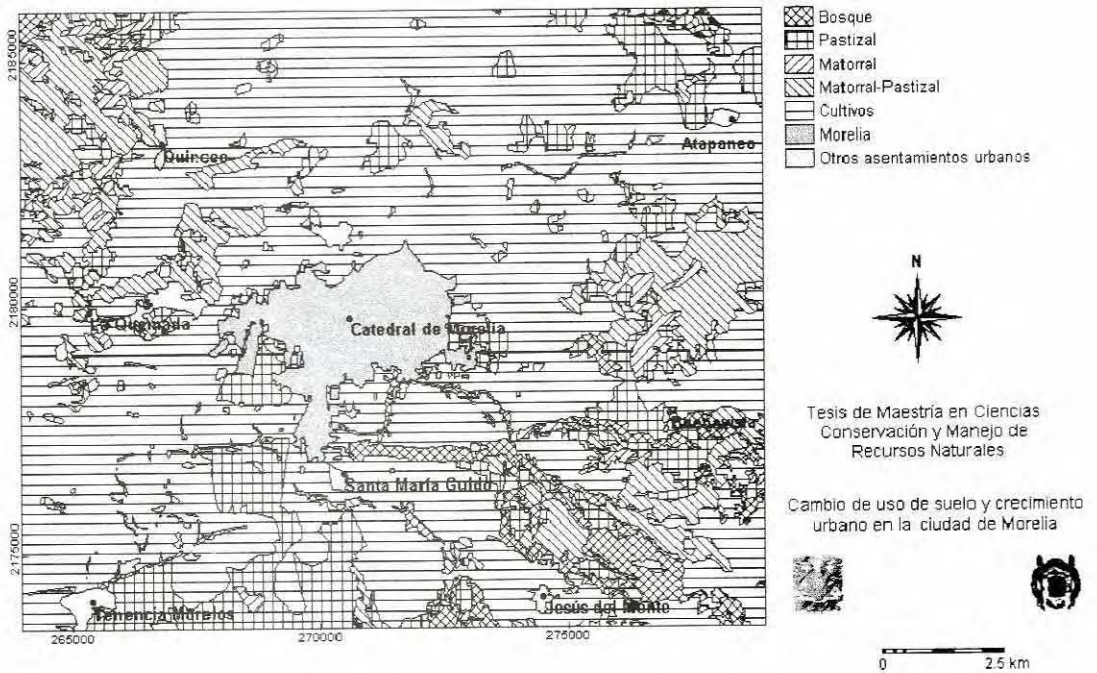


Figura 4. Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo en 1960
 (Fuente: Interpretación de fotografías aéreas a escala 1:25 000).

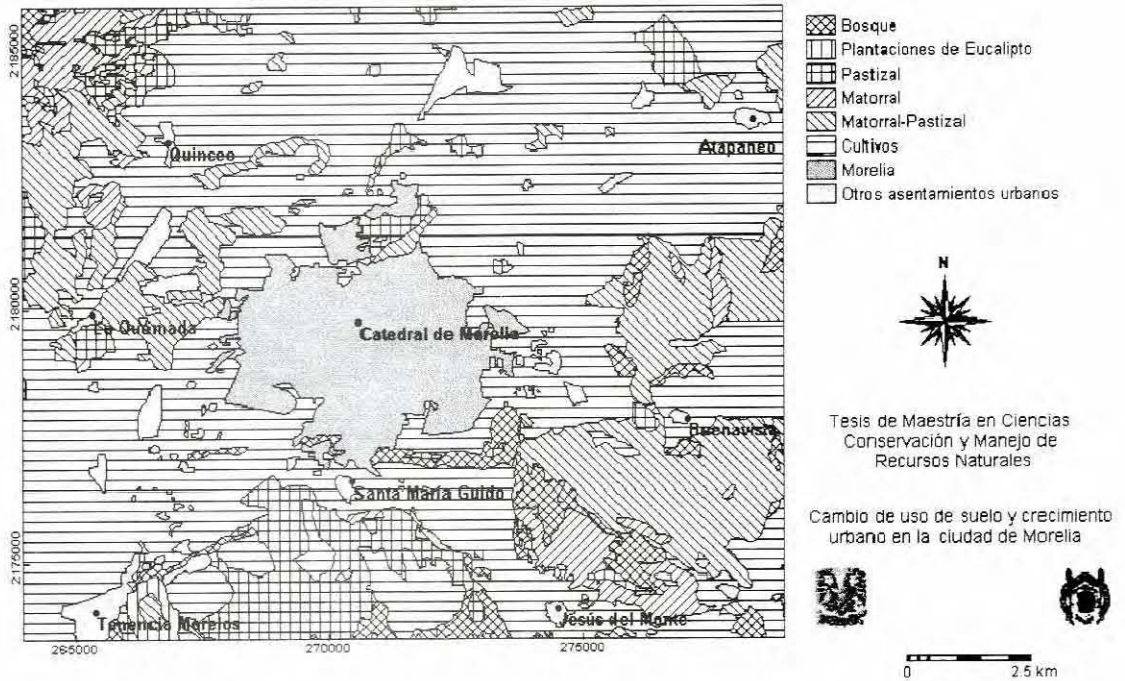


Figura 5. Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo en 1975
 (Fuente: Interpretación de fotografías aéreas a escala 1:25 000).

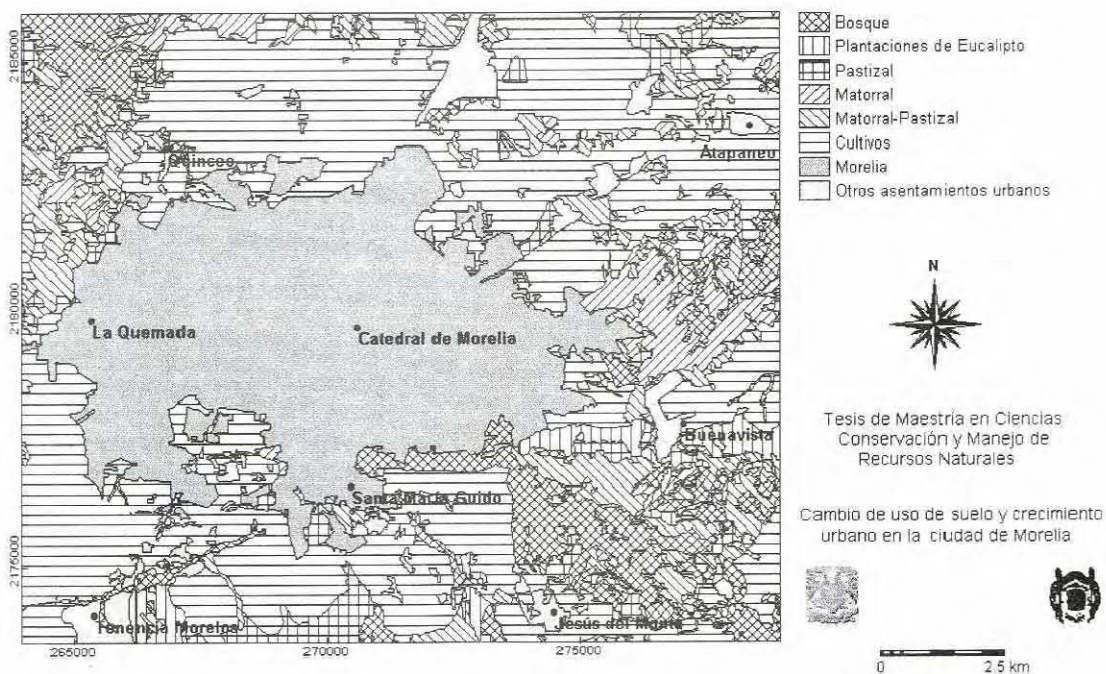


Figura 6. Mapa de cobertura vegetal y uso de suelo en 1990 (Fuente: Interpretación de fotografías aéreas a escala 1:25 000).

Cuadro 2. Distribución del relieve en la mancha urbana de Morelia

Formas de relieve	Superficie							
	1960		1975		1990		1997	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Laderas inclinadas rectilíneas	5	0.4	22	1.3	125	2.5	157	2.6
Laderas suaves redondeadas	574	57.2	661	38.6	1 375	27.1	1728	28.9
Elevaciones suaves e irregulares	0	0.0	79	4.6	634	12.5	635	10.6
Piedemontes	0	0.0	0	0.0	529	10.2	644	10.8
Planicie Aluvial	407	40.5	923	53.9	2 314	45.5	2 656	44.5
Superficie cumbral	0	0.0	8	0.5	66	1.3	100	1.7
Valle acumulativo	19	1.9	20	1.2	38	0.8	51	0.9
Total	1 004	100.0	1 713	100.0	5 081	100.0	5 972	100.0

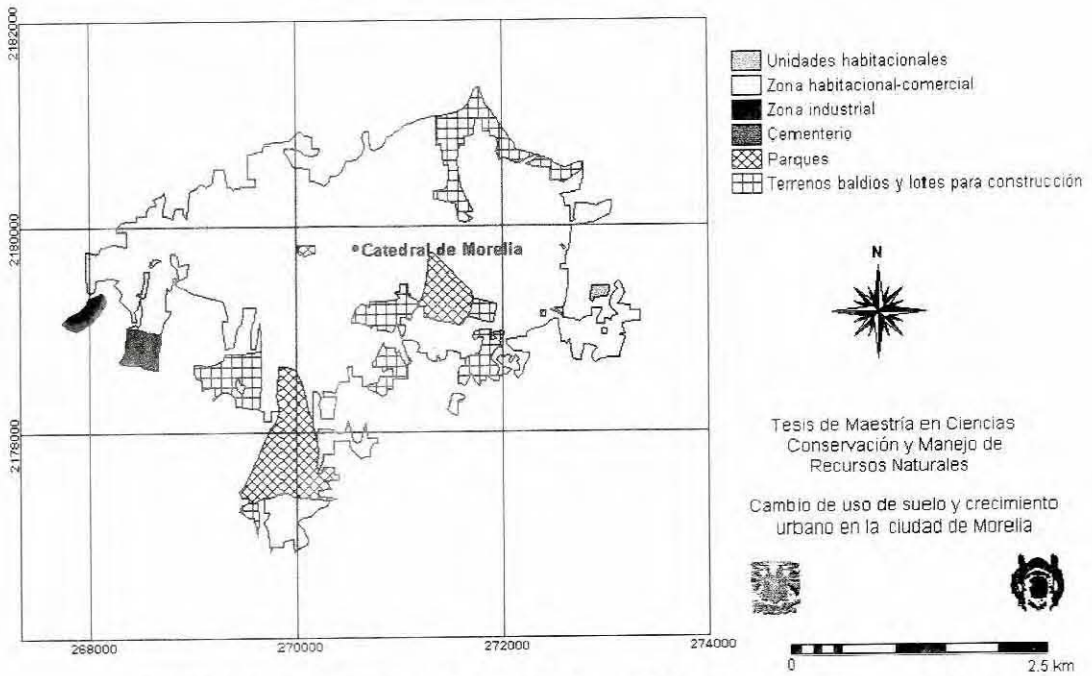


Figura 7. Cobertura y uso de suelo en la mancha urbana de Morelia en 1960
 (Fuente: Interpretación de fotografías aéreas a escala 1:25 000).

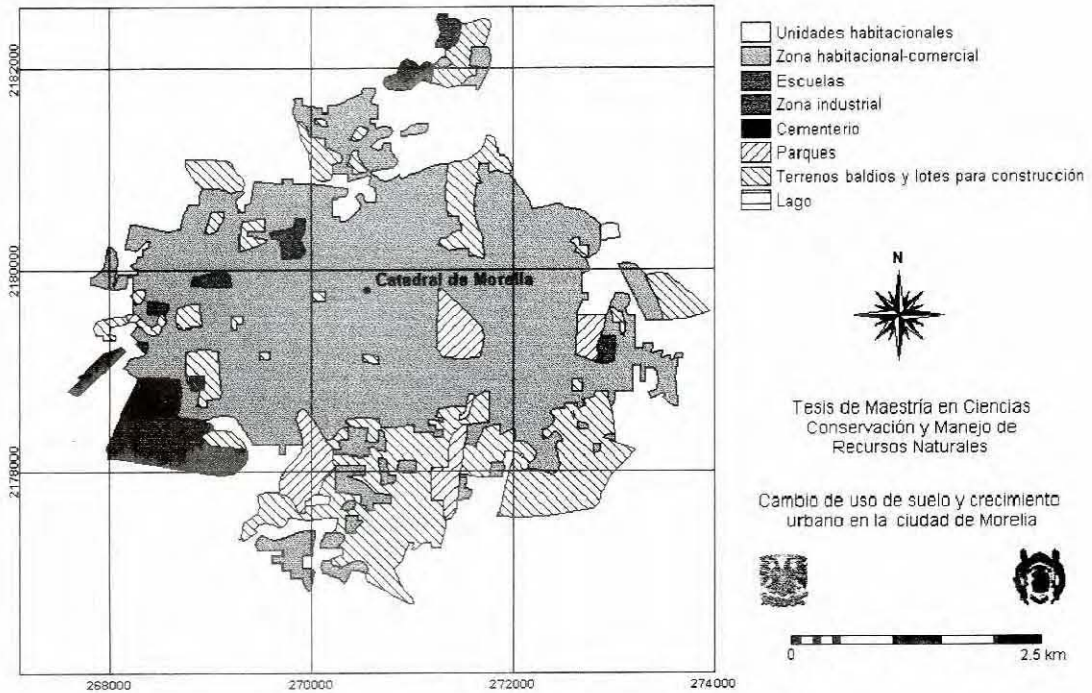


Figura 8. Cobertura y uso de suelo en la mancha urbana de Morelia en 1975
 (Fuente: Interpretación de fotografías aéreas a escala 1:25 000).

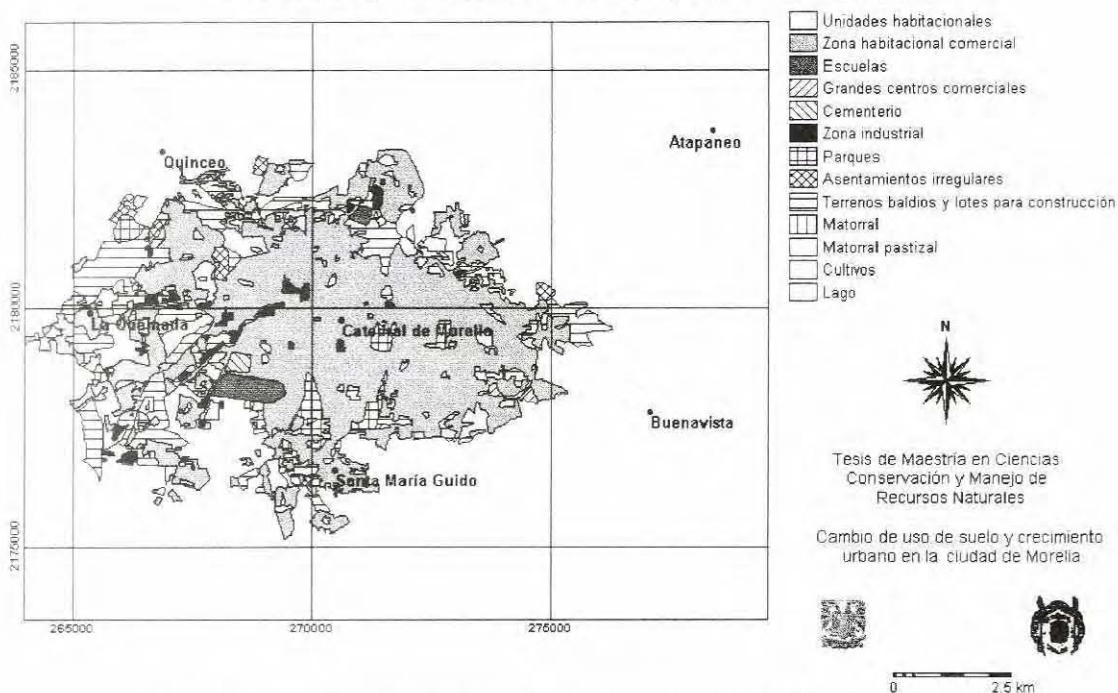


Figura 9. Cobertura y uso de suelo en la mancha urbana de Morelia en 1990.

En 1960 la ciudad de Morelia se encontraba ubicada principalmente sobre laderas suaves redondeadas y sobre la planicie aluvial. En 1975, al crecer la mancha urbana, la mayor parte de la ciudad se localizaba en la planicie aluvial y en laderas suaves redondeadas (Cuadro 2).

En 1990, casi la mitad de la categoría "clase urbana" se encuentra asentada en la planicie aluvial (46%); el porcentaje de ocupación de las laderas suaves redondeadas es de 25%, y la ciudad comienza a asentarse en elevaciones suaves e irregulares (12.5%) y en piedemontes (10%; Cuadro 2).

A pesar de que en años anteriores existían asentamientos en laderas inclinadas rectilíneas (1960), superficie cumbre (a partir de 1975) y valles acumulativos (a partir de 1960), las superficies de asentamientos urbanos en estas unidades de relieve crecieron en forma considerable para 1997 (Cuadro 2).

Considerando, de manera general, tanto las características de los suelos como los procesos geomorfológicos, el crecimiento de la

ciudad hacia la planicie tiene en consecuencia la pérdida de suelos con alta calidad para la actividad agrícola, los cuales se encuentran en la planicie aluvial y en los valles acumulativos. En general, el patrón de crecimiento de las zonas urbanas sobre terrenos agrícolas es similar al reportado para la mayoría de las ciudades en México (SEDESOL, 1992). Además, se incrementa el riesgo natural por la ocupación de laderas inclinadas, en las cuales los procesos geomorfológicos exógenos pueden aumentar y acelerarse. Las condiciones tectónicas presentes en la zona han ocasionado pérdidas materiales por la demolición de construcciones realizadas sobre fallas tectónicas, algunas de ellas sobre este tipo de laderas (Garduño *et al.*, 1998). Estructuras similares han sido reportadas por Garduño *et al.* (1998) en laderas suaves y redondeadas; así como en piedemontes volcánicos ubicados cerca de la ciudad de Morelia.

El mayor crecimiento que se ha registrado dentro de la ciudad ha sido en zonas habitacionales-comerciales, las cuales se han extendido de 790 ha en 1960 a 3 185 ha en 1990 (Cuadro 3, Figuras 7, 8 y 9).

Cuadro 3. Uso comparativo del tipo de cobertura y uso de suelo urbano de la ciudad de Morelia en 1960, 1975 y 1990

Tipo de cobertura y uso de suelo urbano	Superficie					
	1960		1975		1990	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Pastizales	1.2	0.1	0	0.0	42	0.8
Matorral	0	0.0	0	0.0	5	0.1
Matorral – Pastizal	0	0.0	0	0.0	16	0.3
Cultivos	0	0.0	0	0.0	138	2.7
Zona habitacional - comercial	791	78.7	1 115	65.1	3 185	62.7
Zona industrial	7	0.7	32	1.9	113	2.2
Cementerios	10	1.0	19	1.1	19	0.4
Parques	85	8.5	68	4.0	163	3.2
Unidades habitacionales	2	0.2	3	0.2	195	3.8
Terrenos baldíos	108	10.8	404	23.6	1 040	20.5
Escuelas	0	0.0	70	4.1	83	1.6
Asentamientos irregulares	0	0.0	0	0.0	62	1.2
Grandes centros comerciales	0	0.0	0	0.0	18	0.4
Lago	0	0.0	2	0.1	2	0.0

Los terrenos baldíos son la segunda categoría que ha aumentado con el tiempo, de 108 ha en 1960 a 1 040 ha en 1990. El mayor cambio que se detecta en el crecimiento de la ciudad de Morelia es el aumento en el número de clases y polígonos que la componen. La ciudad va aumentando su complejidad y fragmentación conforme pasan los años. En el año de 1960 únicamente existían siete clases de cobertura y uso de suelo en 25 polígonos; en el año 1975 se discriminaron 9 clases en 70 polígonos y en 1990 se identificaron 14 clases distintas en 260 polígonos (Cuadros 1 y 3, Figura 10).

En 1990 se presentaron las categorías de matorral, pastizal, matorral-pastizal y cultivos, clases que no se observaron en 1960 y en 1975, pero aparecen en 1990. El rápido crecimiento de la ciudad ocasionó que algunos polígonos que presentaban estos tipos de cobertura, quedaran incluidos en la ciudad, aún cuando no habían cambiado a la categoría eminentemente urbana (Cuadro 3, Figuras 7, 8 y 9).

Matrices de Markov

Se elaboraron matrices de Markov de primer orden, para conocer la probabilidad de cambio para periodos de 15 años (1960-1975 y 1975-1990).

En la matriz de Markov correspondiente al período 1960 - 1975 (Cuadro 4), las categorías que tienen mayor probabilidad de permanecer en el tiempo son, en orden descendente: Morelia (1.0), otros urbanos (0.86) y cultivos (0.81).

Cualquier tipo de cobertura y uso de suelo que se convierte a la clase urbana, queda permanentemente en esta clase, sin probabilidad de transformarse en otro tipo de cobertura (Lambin, 1997). La clase "otros asentamientos urbanos" presenta un valor alto de probabilidad de permanecer en el tiempo; sin embargo, no alcanza el máximo valor, porque tiene una probabilidad de 0.14 de convertirse a la ciudad de Morelia.

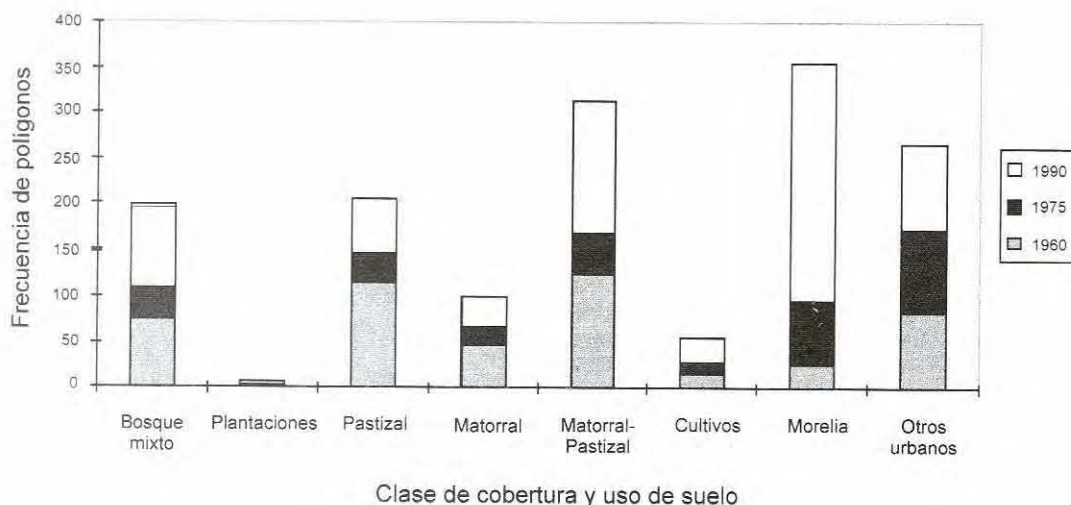


Figura 10. Distribución de los polígonos por clase y por año.

Los cultivos, a pesar de transformarse en las demás clases de cobertura y uso de suelo, tienen una probabilidad alta de permanecer de un tiempo a otro, en parte por ser la clase mejor representada en toda la zona de estudio en 1960 y en segundo lugar, porque las probabilidades de cambio que presenta son muy bajas (Cuadro 4, Figura 11).

Las clases que tuvieron una menor probabilidad de permanecer en el mismo tipo de cobertura-uso, son los pastizales, los matorrales y matorrales-pastizales; éstas unidades se comportaron de una forma más dinámica, por ser clases que funcionan como "fuente" de superficie hacia otras clases y porque también son "atractoras" (Cuadro 4, Figura 11).

Matriz de Markov de primer orden (1975 - 1990)

Las categorías que presentan las probabilidades más altas de permanencia, son: Morelia (1.0) y plantaciones de eucalipto (0.89; Cuadro 5, Figura 12). En este período las plantaciones de eucalipto se comienzan a transformar en la

categoría de matorral - pastizal y otros urbanos.

La probabilidad de transición de la clase cultivos aumenta del período 1960-1975 al de 1975-1990; lo anterior es producto de la disminución de tierras destinadas a la agricultura y al aumento de la superficie que cambia a otras categorías: bosque mixto, pastizal, matorral, Morelia y otros urbanos.

Al igual que en el período comprendido entre 1960 y 1975, las clases de pastizal, matorral y matorral-pastizal siguen comportándose de manera muy dinámica. El matorral tiene una probabilidad de 0.60 de convertirse en bosque y de 0.17 de pasar a matorral-pastizal. El pastizal, en cambio, tiene una probabilidad de 0.38 de pasar a cultivos y de 0.15 de convertirse en parte de la ciudad de Morelia (Figura 11).

La categoría de otros asentamientos urbanos presenta casi la misma probabilidad de permanecer en su misma clase, que de convertirse en la ciudad de Morelia (Cuadro 5, Figura 12).

Cuadro 4. Matriz de transición de 1960 a 1975

Clase	Bosque mixto	Plantaciones	Pastizal	Matorral	Matorral - Pastizal	Cultivos	Morelia	Otros urbanos
Bosque mixto	0.41	0.00	0.03	0.17	0.17	0.15	0.06	0.01
Plantaciones	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pastizal	0.05	0.03	0.28	0.03	0.23	0.31	0.06	0.02
Matorral	0.05	0.00	0.16	0.25	0.45	0.09	0.00	0.01
Matorral - Pastizal	0.04	0.00	0.07	0.18	0.51	0.18	0.00	0.02
Cultivos	0.01	0.00	0.04	0.00	0.06	0.81	0.04	0.03
Morelia	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
Otros urbanos	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.86
Sumatoria	0.56	1.03	0.57	0.64	1.42	1.53	1.31	0.94

Cuadro 5. Matriz de transición 1975-1990

Clase	Bosque mixto	Plantaciones	Pastizal	Matorral	Matorral - Pastizal	Cultivos	Morelia	Otros urbanos
Bosque mixto	0.67	0.00	0.04	0.04	0.10	0.05	0.06	0.03
Plantaciones	0.00	0.89	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.09
Pastizal	0.10	0.02	0.19	0.05	0.09	0.38	0.15	0.02
Matorral	0.60	0.00	0.07	0.10	0.17	0.04	0.01	0.01
Matorral - Pastizal	0.17	0.08	0.04	0.17	0.28	0.07	0.19	0.01
Cultivos	0.02	0.00	0.02	0.02	0.05	0.64	0.22	0.03
Morelia	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
Otros urbanos	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41	0.59

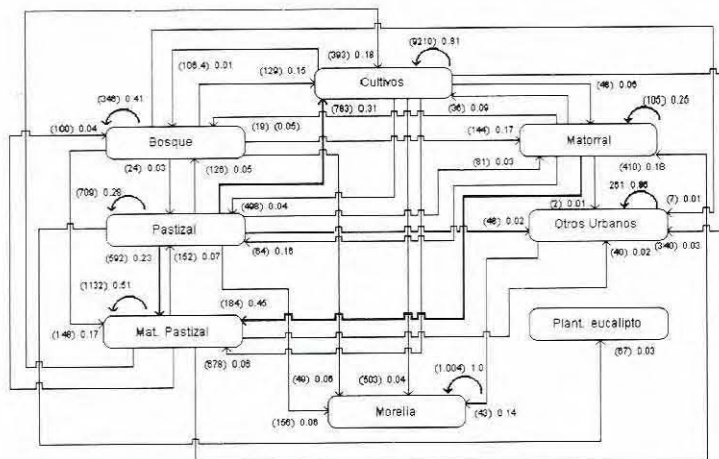


Figura 11. Diagrama de la matriz de Markov correspondiente al período de 1960 a 1975. Los números entre paréntesis representan la superficie de cambio (hectáreas) y el número que antecede al paréntesis significa la probabilidad de transformación de la clase. Las líneas gruesas representan las probabilidades de transición más altas.

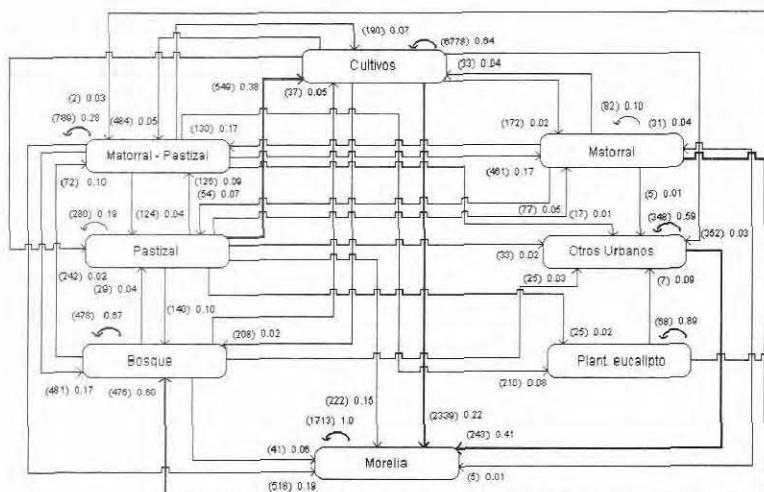


Figura 12. Diagrama de la matriz de Markov correspondiente al período de 1975 a 1990. Los números entre paréntesis representan la superficie de cambio (hectáreas) y el número que antecede al paréntesis significa la probabilidad de transformación de la clase. Las líneas gruesas representan las probabilidades de transición más altas.

Matrices de Markov de segundo orden

Considerando el período abarcado por los diferentes años de este trabajo (15 años), el tiempo de proyección utilizado es de 15 y 30 años. La matriz de transición de 1960 - 1975, se utilizó para predecir el año de 1990 y la matriz de 1960-1990, para predecir el cambio de cobertura-uso al año 2020.

Para realizar las proyecciones se crearon matrices de Markov de segundo orden y los valores de probabilidad obtenidos se convirtieron a unidades de superficie.

En la matriz de predicción realizada para 1990 (Cuadro 6) se observa que la superficie de cobertura de las clases bosque mixto, pastizal y cultivos tiende a decrecer. En cambio, las clases de plantaciones, matorrales, matorral-pastizal, Morelia y otros asentamientos urbanos aumentan su área.

La importancia de la matriz es básicamente la de comparar la información proyectada por la cadena de Markov, con la información obtenida por medio de las fotografías aéreas para el mismo año (1990); es decir, comparar la información observada (información real) contra la esperada (información obtenida con la cadena

de Markov de segundo orden), para conocer el porcentaje de confianza que ofrece la matriz en el resto de las proyecciones a realizar. En el Cuadro 7 se presenta el comportamiento numérico de los valores proyectados y reales.

Las clases que presentan las superficies menores en el año base (plantaciones de eucalipto, matorrales y otros urbanos), son las que en la proyección se acercan más a los datos reales (Cuadro 7). Por el contrario, las áreas con mayor superficie de cobertura en 1960, son las que más se alejan de los valores reales durante la proyección, en este caso son: el bosque mixto, el matorral-pastizal, los cultivos y la ciudad de Morelia (Cuadro 7).

En virtud de la delimitación de cobertura vegetal y uso del suelo en tres tiempos diferentes para la misma zona de estudio y con objeto de validar los resultados de las probabilidades calculadas bajo el modelo markoviano, se realizó una prueba de Xi cuadrada considerando las superficies de cada clase del año 1990 como valores observados, y a las probabilidades transformadas en superficie, resultado de haber corrido el modelo de Markov para un período de 15 años (elevar la matriz de transición del período 1960 - 1975 al cuadrado).

Las hipótesis que se manejaron para aplicar la prueba, fueron:

Ho: No existen diferencias significativas entre las superficies observadas y las esperadas bajo el modelo markoviano.

Ha: Existen diferencias significativas entre las superficies observadas y esperadas bajo el modelo markoviano.

Los datos calculados con *Statistica* para *Windows*, versión 4.5, proporcionaron un valor de χ^2 cuadrada de 6 677, con 7 grados de libertad y con un nivel de significancia de 0.95.

Los valores obtenidos superan ampliamente los valores de χ^2 cuadrada en tablas (20.278), por lo tanto se rechaza la hipótesis nula.

Se concluye que la predicción realizada con las Matrices de Markov para la zona en estudio no es confiable en el cálculo del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo; sin embargo, contribuyen al conocimiento de las tendencias generales de cambio.

A pesar de que estadísticamente las diferencias son significativas, el modelo de Markov es ampliamente utilizado en este tipo de análisis en varias regiones del mundo.

Cuadro 6. Proyección a 1990 del cambio de cobertura y uso del suelo, considerando como matriz base las probabilidades de transición del período de 1960 – 1975 (ha)

Clase	Bosque mixto	Plantaciones	Pastizal	Matorral	Matorral - Pastizal	Cultivos	Morelia	Otros urbanos	Sumatoria
Bosque mixto	157	0	55	124	213	203	78	17	847
Plantaciones	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pastizal	124	86	287	177	569	981	248	90	2 562
Matorral	24	1.7	49	66	160	93	9	8	412
Matorral - Pastizal	122	4.3	203	336	834	615	43	73	2 230
Cultivos	186	31	597	209	1047	7738	994	590	11 392
Morelia	0	0	0	0	0	0	1004	0	1 004
Otros urbanos	0	80	0	0	0	0	79	223	303
Sumatoria	613	124	1 191	912	2 823	9 630	2 455	1001	18 750

Cuadro 7. Superficies de cobertura observadas y esperadas en las diferentes categorías del estudio (ha)

Clase	1990 (observada)	1990 (esperada)	Diferencia entre las superficies observadas y esperadas
Bosque mixto	1 788	613	- 1 175
Plantaciones de eucalipto	353	124	- 229
Pastizal	729	1 191	+ 462
Matorral	823	912	+ 89
Matorral – Pastizal	1 603	2 823	+ 1 220
Cultivos	7 588	9 630	+ 2 042
Morelia	5 081	2 455	- 2 626
Otros asentamientos urbanos	787	1 001	+ 214

Predicción del crecimiento de la mancha urbana vs. crecimiento poblacional

Con intención de generar un modelo más robusto y confiable que permitiera predecir el crecimiento de la ciudad de Morelia en el tiempo, se procedió a evaluar la relación entre las variables del tamaño de la población (x) y la superficie de la mancha urbana (y) mediante un análisis de regresión lineal simple. Para tal fin se realizó un análisis de regresión no lineal (exponencial) que permitiera generar un modelo simple que indicara el comportamiento de la población con respecto al tiempo (Cuadro 8).

Cuadro 8. Información utilizada en la elaboración de la regresión de la población con respecto al tiempo

Año	Población
1940	44 304
1955	79 855
1960	100 828
1970	166 735
1980	300 637
1990	428 486

El análisis arrojó una relación positiva con un coeficiente de regresión (r) de 0.98 y un coeficiente de determinación (R^2) de 0.97, con una p del 0.99 a un nivel de significancia de 0.05. (Figura 13). El modelo predictivo es: $y = 8.977 \cdot 10^{35(0.047x)}$

Al conocer el comportamiento de la población se construyeron dos modelos de regresión, esta vez relacionando la población con el crecimiento de la mancha urbana de manera lineal y exponencial, considerando los datos del Cuadro 9. A pesar del pequeño número de pares de información para realizar la prueba estadística, es posible aplicar un modelo de regresión, siempre y cuando el coeficiente de regresión obtenido sea mayor de 0.878 con un nivel de significancia de 0.05 (Zar, 1996). La primer prueba dio como resultado un coeficiente de regresión (r) de 0.96 y un coe-

ficiente de determinación (R^2) de 0.93, con una p de 0.62 (Figura 14). De acuerdo con el modelo, el 93 % del crecimiento de la mancha urbana de la ciudad de Morelia se explica por el crecimiento poblacional. El modelo lineal predictivo es: $y = 664.551 + 0.013x$

La prueba de regresión exponencial realizada con los datos arroja un valor de r de 0.95 y de r^2 de 0.91, con una p de 0.39, la ecuación de regresión es: $y = 574.893^{4.996 \cdot 10^{-6}x}$ y la curva del modelo se representa en la Figura 15.

En este trabajo se prefirió utilizar el modelo de regresión lineal y no el exponencial por los siguientes motivos: en primer lugar, el comportamiento del crecimiento poblacional es exponencial y asumir que el crecimiento de la mancha urbana también se comporta con el mismo patrón de desarrollo, significaría que al realizar el modelo de predicción, entre dos variables que se relacionan de manera exponencial con la población, éstas tendrían una relación lineal. En segundo lugar, se considera que ante el reducido número de datos es preferible emplear modelos simples para realizar la predicción del crecimiento de la ciudad de Morelia.

Con la superficie de la ciudad de Morelia, delimitada sobre la imagen digital de satélite de septiembre 1997 y con predicción del tamaño de la población para el mismo año, se validó el modelo descrito anteriormente. La superficie estimada por el modelo es de 6 089 ha y la superficie observada en la imagen de satélite es de 5 970 ha; existe una diferencia de 119.0 ha. La diferencia entre lo observado y lo esperado es menor al 2% para el modelo de crecimiento de la mancha urbana.

Es importante aclarar que la regresión lineal entre el crecimiento del área urbanizada y el crecimiento de la población crea una situación no común en la mayoría de los asentamientos urbanos del país, por dos razones principales:

a) La ciudad de Morelia presenta cambios significativos en su estructura urbana (por ejemplo, establecimiento de grandes centros

comerciales, unidades habitacionales, etc.), que producen cambios en el consumo de suelo por habitante. En los países desarrollados se ha observado que nuevos servicios, infraestructuras y modalidades de consumo, *generan necesidades* de suelo crecientes (Duhau, 1998).

b) Los cambios en la estructura de la población implican que las tasas de crecimiento medio anual del número de viviendas sean bastante superiores a las tasas de crecimiento medio anual de la población (alrededor del 30% superiores), tendencia que se ha acentuado entre 1990 y 1995. Lo anterior significa que la demanda de suelo para usos habitacionales resulte mayor que la que sería esperable en términos del crecimiento de la población y obedezca al incremento en el ritmo de formación de nuevos hogares y la reducción del número promedio de habitantes por vivienda (Duhau, 1998).

Lo anterior permite deducir que el ritmo de

crecimiento poblacional no produce en todos los casos un incremento en el área urbana; en la mayor parte de las ciudades del país ocurre una densificación poblacional en la zona urbana (mayor número de habitantes viviendo en la misma área), sin embargo, la mancha urbana de la ciudad de Morelia crece casi al mismo ritmo que el crecimiento poblacional.

Con base en el modelo de regresión lineal previamente elaborado, se procedió a realizar una predicción del crecimiento de la mancha urbana de Morelia. La población estimada para el año 2020 es de 1 531 261 habitantes y el área urbana, modelada para el mismo año, es de 19 242 ha, tres veces más grande que la observada en 1997. Es importante mencionar que la estimación realizada debe tomarse con limitaciones, toda vez que los modelos basados en regresiones lineales, teóricamente deben utilizarse para interpolación de datos; sin embargo, ante la falta de otros modelos más adecuados, la extrapolación de datos por este medio es una alternativa viable.

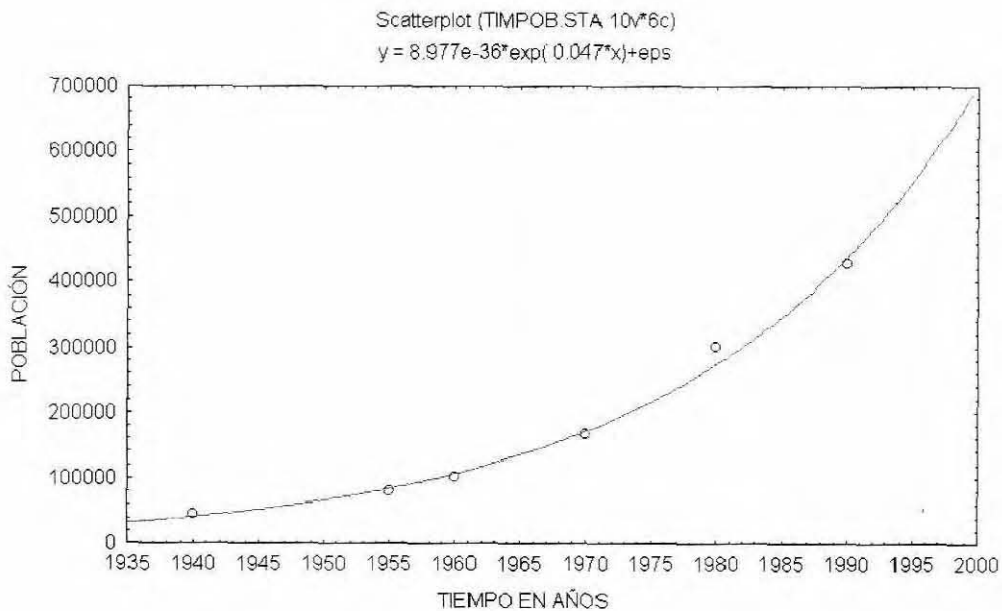


Figura 13. Diagrama de dispersión y curva de ajuste para la regresión exponencial entre el tiempo y la población $r = 0.97$.

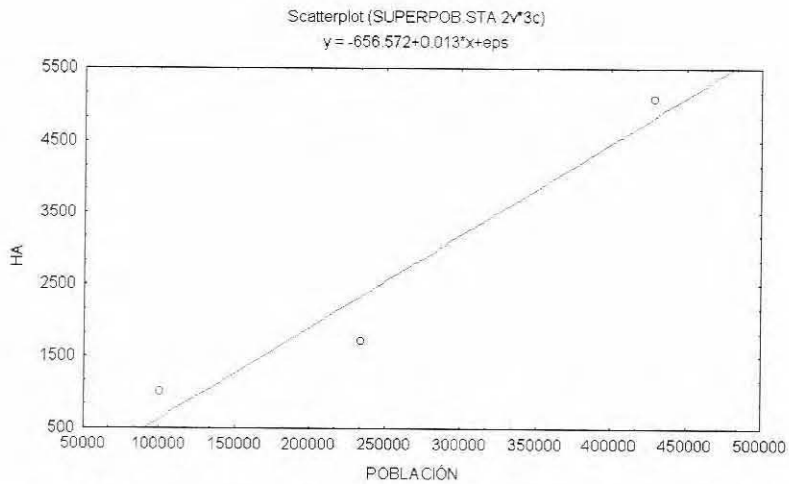


Figura 14. Diagrama de dispersión y curva para la regresión lineal entre la población y la superficie de Morelia $r = 0.96$.

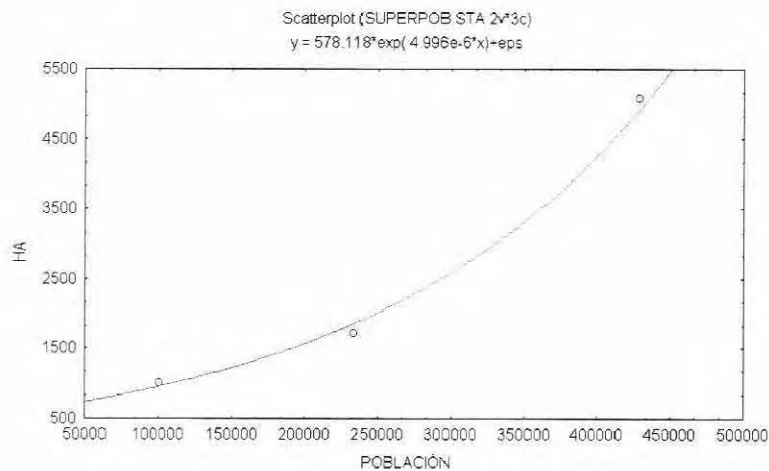


Figura 15. Diagrama de dispersión y curva de ajuste para la regresión exponencial entre la población y la superficie de Morelia $r = 0.95$.

CONCLUSIONES

El cambio de uso de suelo más importante ocurrido en la zona en estudio es el incremento de la superficie de la ciudad de Morelia, que crece 506% entre 1960 y 1990. La clase aumenta su cobertura en función de la reducción de la superficie de las clases, otros asentamientos urbanos y cultivos y en las unidades de relieve de planicie aluvial, laderas suaves redondeadas y elevaciones suaves e

irregulares. El mayor crecimiento que se ha dado dentro de la ciudad ha sido en las zonas habitacionales-comerciales, las cuales se han extendido de 790 ha en 1960 a 3 185 ha en 1990.

La información obtenida con las matrices de Markov de primer orden (1960 - 1975 y 1975 - 1990) permiten conocer que las clases atractoras más importantes son la ciudad de Morelia, las plantaciones y los cultivos,

siendo los pastizales, matorrales y matorrales-pastizales las clases más dinámicas.

Las áreas de las diferentes categorías de cobertura y uso de suelo observadas en las fotografías aéreas de 1990 (información observada), fueron comparadas con datos de la matriz de Markov de segundo orden (información esperada) y se concluye que, de acuerdo con la prueba de contingencia χ^2 cuadrada se demuestre el bajo poder predictivo del modelo markoviano en este estudio. En cambio, las regresiones lineales de población y superficie de la mancha urbana permitieron construir un modelo más robusto y con un mayor poder predictivo con respecto al crecimiento de la ciudad, aceptándose la hipótesis original de este trabajo.

RECONOCIMIENTO

Este trabajo se realizó dentro del Proyecto de Investigación: "Evaluación de los cambios de cobertura y uso de suelo en Michoacán (1975-1995). Lineamientos para la ordenación de su territorio (No. 9606042), auspiciado por el Programa SIMORELOS (CONACyT Regional). Se agradece a los revisores anónimos por sus valiosos comentarios y a los Drs. Emilio Duhau y Omar Masera por las sugerencias realizadas al manuscrito original. Se agradece también la colaboración del Biól. Vicente Salinas en la captura de algunos mapas utilizados en este trabajo. El primer autor agradece al CONACyT la beca-crédito proporcionada para la obtención de la tesis de grado.

REFERENCIAS

- Aaviksoo, K. (1995), "Simulating vegetation dynamics and land use in a mire landscape using a Markov Model", *Landscape and Urban Planning* 31:129 - 142.
- Anderson, J. R., E. E. Hardy, J. T. Roach y R. E. Witmer (1976), "A land use and land cover classification system for use with remote sensing data", *Geological Survey Professional Paper*, no. 964.
- Bocco, G., M. E. Mendoza y O. Masera (2001). "La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 44, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 18-38.
- Bocco, G., A. Velázquez, M. E. Mendoza, M. A. Torres y A. Torres (1996), *Informe Final, Subproyecto Regionalización Ecológica, Proyecto de Actualización del Ordenamiento Ecológico General del Territorio del País*, elaborado para el Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAP), pp. 1-95.
- Bocco, G. y H. Riemann (1997), "Quality assessment of polygon labeling", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 63, no. 4, pp. 393-395.
- Cruz Rodríguez, I. (1998), *La urbanización periférica reciente en la ZMCM. El caso de Tultepec, México, 1985-1997*, tesis de Maestría en Planeación y Políticas Metropolitanas, UAM-Azcapotzalco, México.
- Duhau, E. (1998), *Hábitat popular y política urbana*, UAM-Azcapotzalco, México.
- Duhau, E. (1999 comunicación personal), Profesor Investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, División de Ciencias Sociales y Humanidades, México.
- Garduño, V. M., E. Arreygue, S. Chiesa, I. Israde, G. Rodríguez y J. M. Ayala (1998), "Las fallas geológicas y sísmicas de la ciudad de Morelia y su influencia en la planificación de su territorio", *Ingeniería Civil*, vol. I, núm. 5, Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Morelia, México, pp. 4-12.
- ILWIS, Integrated Land and Watershed Management Information System (1993), *User's Manual*, International Institute for Aerospace and Earth Science (ITC), Enschede, The Netherlands.
- ILWIS, Integrated Land and Watershed Management Information System (1997), *User's Manual*, International Institute for Aerospace and Earth Science (ITC), Enschede, The Netherlands.
- INEGI (1990), *Morelia Perfil Sociodemográfico, XI Censo General de Población y Vivienda*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (1993), *Morelia, estado de Michoacán, Cuaderno estadístico municipal*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

- ☞ Lambin, E. F. (1997), "Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions", *Progress in Physical Geography* 21, 3:375-393.
- ☞ López Blanco, J., I. Valdez Muciño y J. Ugalde Rivera (1995), "Corrección fotogramétrica de segmentos digitizados de fotografías aéreas aplicando un SIG", *Boletín-SELPER*, núm. 30, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 6-24.
- ☞ López Granados, E. (1999), *Cambio de uso de suelo y crecimiento urbano en la ciudad de Morelia*, tesis de Maestría en Ciencias en Conservación y Manejo de Recursos Naturales, Facultad de Biología, UMSNH, México.
- ☞ Meyer, W. B. y B. L. Turner II (1994), *Changes in land use and land cover: a global perspective*, Cambridge, Cambridge University Press.
- ☞ Ramachandran, A. (1992), "Urbanization and Environment", *ITC Journal*, 4:389-393.
- ☞ SEDESOL (1992), *Programa de 100 Ciudades*, Secretaría de Desarrollo Social, México.
- ☞ Verstappen, H. TH. y R. A. Van Zuidam (1991), *El sistema ITC para levantamientos geomorfológicos. Una base para la evaluación de recursos y riesgos naturales*, ITC, publicación núm. 10, Enschede, The Netherlands.
- ☞ Zar, J. H. (1996), *Biostatistical Analysis*, Prentice Hall, New Jersey, USA.
- ☞ Zinck, J. A. (1988), *Physiography and soils*, Soil Survey Course, ITC, Enschede, The Netherlands.

CARTOGRAFÍA CITADA

☞ INEGI (1975), *Carta Topográfica, Morelia, E14-A23*, escala 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

☞ INEGI (1975), *Carta Topográfica, Cuitzeo, E14-A13*, escala 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

☞ INEGI (1975), *Carta Edafológica, Morelia, E14-A23*, escala 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

☞ INEGI (1975), *Carta Edafológica, Cuitzeo, E14-A13*, escala 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

☞ INEGI (1975), *Carta Geológica, Morelia, E14-A23*, escala 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

☞ INEGI (1975), *Carta Geológica, Cuitzeo, E14-A13*, escala 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.