

PREDICCIÓN ESPACIAL DE CAMBIOS DEL USO DE SUELO EN TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

SPATIAL PREDICTIONS OF LAND USE CHANGES IN TEXCOCO, ESTADO DE MEXICO STATE

Ramiro Pérez-Miranda¹, J. René Valdez Lazalde², Francisco Moreno Sánchez¹,
Antonio González Hernández¹ y Juan I. Valdez Hernández²

RESUMEN

El estudio de la dinámica del uso del suelo permite conocer el usufructo, manejo y aprovechamiento que el hombre hace de la naturaleza, además de realizar la predicción de su tendencia que fundamente la toma de decisiones para el mejor empleo del territorio. La metodología aplicada en el trabajo que se describe consistió en detectar cambios en el uso del suelo mediante el análisis de fotografías aéreas e imágenes satelitales de 1993 y 2004. Posteriormente, se recurrió a conceptos y técnicas de evaluación multicriterio espacial, lógica difusa, autómatas celulares y cadenas de Markov para modelar el escenario del cambio de uso al 2014. Los resultados para el periodo 1993-2004 indican un aumento en la extensión del uso urbano de 173 ha, minero de 92 ha, cuerpos de agua de 3 ha y una disminución en los usos agrícolas de 182 ha, pastizal inducido de 64 ha, bosque 14 ha, en áreas de reforestación 7 ha y pastizal natural 1 ha. La proyección para el 2014 señala incrementos en la superficie urbana 154 ha, minería 81 ha y pastizal natural 13 ha; las áreas que se reducirán son: la agrícola 165 ha, pastizal inducido 56 ha, bosque 23 ha, y reforestación 6 ha. Los usos urbano y minero crecerían en perjuicio de los agrícola, pastizal inducido, y en menor medida, hacia el bosque y las zonas de reforestación. El uso urbano crece a una tasa anual de 15.7 ha y 15 ha en el primer periodo y para el proyectado, respectivamente.

Palabras clave: Análisis multicriterio, autómatas celulares, cadenas de Markov, crecimiento urbano, SIG, uso de suelo.

ABSTRACT

The study of the dynamics of land use allows to study the use, handling and use man makes of nature, and allows the prediction of the tendency for making appropriate decisions for the occupation of the territory. The methodology was to detect changes in land use by analyzing aerial photographs and satellite images from 1993 and 2004. Subsequently appealed to concepts and techniques of spatial multicriteria evaluation, fuzzy logic, cellular automata and Markov chains to model the use change scenario for 2014. The outcomes identified for the period 1993-2004 indicate an increase in the use urban extension 173 has, a miner of 92 ha, water bodies of 3 ha and a decrease in agricultural use of 182 ha, 64 ha grassland induced, forest 14 ha, 7 ha reforestation and natural grassland of 1 ha. The projection for 2014 show increases in 154 ha urban, mining and natural pasture 81 ha 13 ha, the uses are agriculture would be reduced 165 ha, 56 ha induced grassland, forest 23 ha, and reforestation 6 ha. Urban and mining applications grow on agricultural uses, induced grassland, and to a lesser extent, into the forest and reforestation. Urban use is growing at an annual rate of 15.7 ha and 15 ha in the first period and projected, respectively.

Key words: Multicriteria analysis, cellular automata, Markov chains, urban growth, GIS, land use.

Fecha de recepción: 2 de febrero de 2009.

Fecha de aceptación: 3 de marzo de 2011.

¹ Centro de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales. (CENID-COMEF) INIFAP.
Correo-e: perez.ramiro@inifap.gob.mx

² Programa Forestal, Colegio de Postgraduados.

INTRODUCCIÓN

Los estudios de dinámica de uso del suelo contribuyen a conocer el tipo de manejo y aprovechamiento que el hombre hace de la naturaleza en un territorio. En años recientes los países han reconocido la importancia de realizarlos para analizar, entender y tomar decisiones en la formulación de políticas de planificación (Dale, 1997; Flores *et al.*, 2005). Particularmente, el cambio de uso hacia el urbano genera problemas para la población, dado que provoca una demanda de agua; origina contaminación ambiental, congestionamientos viales, cambios de la temperatura, crecimiento poblacional, conflictos sociales y competencia por el uso de la tierra (Losada *et al.*, 1998; Romero y López, 2000; Ayuntamiento de Texcoco, 2003; Jáuregui, 2004).

En la últimas tres décadas el municipio de Texcoco ha tenido un crecimiento poblacional promedio anual de 4.07%, para alcanzar una población de 209,308 habitantes y una densidad aproximada de 500 habitantes km² (Ortiz, 2000; INEGI, 2005). La densidad de población se incrementó en 70% de 1990 a 2000 (Ayuntamiento de Texcoco, 2003), y con ello la demanda de bienes y servicios por parte de la sociedad, así como los problemas asociados al cambio de uso del suelo urbano: escasez de agua, deterioro de los ecosistemas, alteraciones en la función y capacidad de la tierra. El crecimiento de la mancha urbana en la municipalidad ha sido desordenado expandiéndose hacia áreas de usos agrícola, forestal y pastizales. La extracción de materiales para la construcción (uso minero) cubre superficies agrícolas, forestales y zonas cercanas a los centros urbanos (Muro, 1996; Ayuntamiento de Texcoco, 2003; Moreno, 2007). Lo anterior es producto de las insuficientes políticas de planeación en el desarrollo territorial del municipio y una deficiente toma de decisiones en el manejo de los recursos naturales. El municipio ha tenido importantes cambios sociales y económicos, con fuerte desarrollo de la economía en el sector terciario, que cada vez crece hacia la parte oriente, la cual presenta un gran potencial para la ocurrencia de cambios de uso de la tierra (Moreno, 2007).

Los cambios de uso de suelo y vegetación han sido motivo de estudio en América Latina, durante la última década. Así, en Chile se detectaron desplazamientos de la frontera agrícola por el uso urbano y afectaciones de los bosques por nuevas áreas de agricultura (Briceño, 2003).

En el caso particular de México, Velázquez *et al.* (2002) registraron que los asentamientos humanos, cultivos, pastizales inducidos y cultivados aumentaron su superficie, mientras que las selvas, vegetación hidrófila, pastizales naturales, matorrales y bosques disminuyeron. Castelán *et al.* (2007) consignan una reducción de la masa forestal para el periodo 1976 y 2000, en la cuenca del río San Marcos, Puebla. En el Estado de México se citan pérdidas en la superficie forestal de coníferas,

INTRODUCTION

Studies about land-use dynamics help to know the kind of management and harvest that man makes out of nature in some place. In recent years, countries have acknowledged the importance to do them in order to analyze, understand and take decisions in the organization of planning politics (Dale, 1997; Flores *et al.* 2005). Land change in particular towards urban use, provokes problems for the population, since it gives way to demands of water, starts environmental pollution, social conflicts and competition for land use (Losada *et al.*, 1998; Romero and López, 2000; Ayuntamiento de Texcoco, 2003; Jáuregui, 2004).

In the last three decades, Texcoco has had an average annual population growth of 4.07% and population is made up of 209,308 inhabitants and around 500 inhab. km² (Ortiz, 2000; INEGI, 2005). Population density increased by 70 per cent from 1990 to 2000 (Ayuntamiento de Texcoco, 2003), and with the demand for goods and services as well as problems linked to urban land use change: lack of water, ecosystems deterioration, land function and ability alterations. The growth of urban territory in the municipio has been with no order at all, and it has expanded towards crop lands, forests and grasslands. The extraction of materials for the building sector (mining) covers croplands, forests and areas nearby urban sites (Muro, 1996; Ayuntamiento de Texcoco, 2003; Moreno, 2007). This is the results of poor planning politics relater to territorial development of the municipio and an inefficient decision taking about the management of natural resources. The municipio has had important social and economic changes, with a strong economy development in the tertiary sector that slowly extends to the East; thus, that part of Texcoco municipio shows a great potential for land use change (Moreno, 2007).

Land use and vegetation changes have been a topic of interest in Latin America during the last decade. Thus, in Chile were detected displacement of the crop border due to urban use and damages to forests because of new agriculture areas (Briceño, 2003).

In Mexico in particular, Velázquez *et al.* (2002) recorded that housing, crops, induced and cultivated grasslands increased their area, while tropical forests, hydrophilous vegetation, natural grasslands, scrubs and forests diminished their extent in the country. Castelán *et al.* (2007) determined a reduction of forest mass for the 1976 and 2000 period in San Marcos river basin, Puebla State. In Estado de México State, the loss of forest lands with hardwoods, softwoods and mixed forests are stated for the 1993-2002 period, even if there are some recovery cases; specifically for Texcoco, it is observed that the urban use grows over the crop surface in an outstanding way (Palma *et al.*, 1999a).

latifoliadas y bosque mixto para el período 1993-2002, aunque existe, en algunos casos, recuperación. Específicamente, para el municipio de Texcoco se observa que el uso urbano crece sobre la superficie agrícola de manera significativa (Palma *et al.*, 1999a).

Para determinar y proyectar cambios de uso de la tierra se han propuesto diferentes métodos y técnicas, entre las cuales están las estadísticas de regresión multivariada (Palma *et al.*, 1999b; López *et al.*, 2001) y las cartográficas apoyadas por los sistemas de información geográfica y las cadenas de Markov (CM) (Paegelow, 2003; Sandoval y Oyarzum, 2004).

Los objetivos de esta investigación fueron: analizar los cambios de uso del suelo en el oriente del municipio de Texcoco y predecir el uso del suelo para el año 2014. Para ello, se recurrió a los conceptos y técnicas de la teoría de decisiones, en particular a la evaluación multicriterio, la lógica difusa, los autómatas celulares y las cadenas de Markov, todas herramientas agrupadas en un entorno de sistemas de información geográfica (SIG). A diferencia de otros modelos desarrollados (Palma *et al.*, 1999a; Herrera, 2001; Sandoval y Oyarzum, 2004), el aquí presentado incorpora el componente espacial de manera explícita para predecir los cambios en el uso del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en una superficie de 26,395 ha ubicadas en la parte oriente del municipio de Texcoco. Las coordenadas geográficas que enmarcan el área son 19°25'00" y 19°33'20" latitud norte, y 98°40'00" y 98°52'00" longitud oeste (Figura 1).

La metodología empleada consta de cuatro etapas: 1) elaboración de coberturas de uso del suelo para 1993 y 2004, 2) evaluación de cambios de uso del suelo, 3) evaluación multicriterio espacial para obtener mapas de potencialidad de cambio de uso y, 4) modelación del uso del suelo para el año 2014.

Elaboración de mapas de uso del suelo para 1993 y 2004

La cobertura de uso del suelo en el año 1993 se obtuvo mediante la interpretación de ortofotos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI): E14b21 fracciones D, E y F; y E14B31 fracciones A, B y C, con tamaño de píxel 2 m, las cuales fueron remuestreadas a 5 m con el software Arc Map 8.1®. Para la cobertura del año 2004 el proceso fue similar, solo que se usaron imágenes pancromáticas SPOT 5 con tamaño del píxel de 5 m. Se emplearon dos escenas: 1) 588/311 con fecha del 15 de octubre de 2004 y, 2) 589/311 con fecha 2 de febrero de 2004. El relativamente reducido

In order to determine and foresee changes in land use, several methods and techniques have been proposed, one of which are the multivariate regression statistics (Palma *et al.*, 1999b; López *et al.*, 2001) and the cartographic ones that are supported by geographic information systems and Markov chains (MC) (Paegelow, 2003; Sandoval and Oyarzum, 2004).

The aims of this research were: to analyze the land use changes of the Eastern part of Texcoco municipio and predict its land use for 2014. In this regard, concepts and techniques of decision theory were taken, specifically to the multiple-criteria assessment, diffuse logic, cellular automata and Markov chains, all tools gathered into geographic information systems (GIS). In contrast to other models (Palma *et al.*, 1999a; Herrera, 2001; Sandoval and Oyarzum, 2004), this shown here includes the spatial component in an explicit way to predict land use changes.

MATERIALS AND METHODS

The study was carried out on a 26,395 ha area at the Eastern part of Texcoco municipio. The geographic coordinates that limit the area are 19°25'00" and 19°33'20" North and 98°40'00" and 98°52'00" West (Figure 1).



Figura 1. Localización del área de estudio.

Figure 1. Study area.

Methodology is made-up of four stages: 1) Drawing up of land use cover for 1993 and 2004; 2) Assessment of land use changes; 3) Spatial multi-criteria assessment to get maps of land use potential and 4) Modeling of land use for 2014.

tamaño del área de estudio, aunado a la alta resolución espacial de las imágenes y al apoyo del mapa de uso de suelo y vegetación de INEGI escala 1:50,000 permitió identificar, de forma clara, los tipos de uso del suelo existentes en ambas fechas. La validación de las mismas se realizó a partir de la verificación en campo, con un muestreo al azar y la posterior edición de los mapas finales.

Las coberturas para ambas fechas se generaron en la proyección UTM con Datum WGS84. Se consideraron ocho categorías de uso de la tierra: urbano, agrícola, pastizal inducido, minería, pastizal natural, cuerpos de agua, reforestación y bosque.

Evaluación de cambios de uso de la tierra

Las coberturas de uso del suelo se transformaron a formato ráster, con un tamaño de píxel de 10 m, acotadas por la capacidad de procesamiento del equipo de cómputo disponible. Posteriormente, se obtuvo una matriz de cambio de uso de la tierra entre las fechas 1993 y 2004.

Evaluación multicriterio espacial

El primer paso consistió en identificar y jerarquizar los criterios (variables) importantes que determinan los cambios en el uso del suelo. A continuación, se aplicó el proceso de evaluación multicriterio espacial (EMC) para ponderarlas con base en el juicio y experiencia de los tomadores de decisiones (Malczewski, 1999; Saaty, 1980). La EMC se instrumentó en un sistema de información geográfica (Arc Map 8.1®), con la finalidad de evaluar las alternativas existentes, a partir de criterios espaciales múltiples (coberturas criterio). Estos se clasificaron en factores y restricciones, de tal manera que un factor es un criterio que resalta o disminuye la potencialidad de una alternativa específica, para una actividad particular, mientras que una restricción limita las alternativas (Malczewski, 2004). Los factores se integraron mediante la regla de decisión (Saaty, 1980). Las restricciones se ejecutaron con la aplicación del álgebra Booleana (Barredo, 1996; Malczewski, 1999; Eastman, 2001). Las coberturas criterio y restricción empleadas en el modelo propuesto representan los factores relevantes de la realidad del paisaje urbano y rural de la región. Su determinación retomó la experiencia de trabajos de Paegelow *et al.* (2003) y Ghribi (2005).

Definición de mapas criterio relevantes.- Con la información cartográfica disponible se generó un modelo para predecir cambios de uso del suelo (Allen y Lu, 2003; Landis, 1995; Southworth, 1995; Wegener, 1994). Las coberturas restricción se definieron bajo la condición de ser áreas con baja potencialidad a cambiar de uso, en el corto y mediano plazo, tales como: 1) derecho de vías de caminos; 2) derecho

Drawing up land use maps for 1993 and 2004

Land use cover in 1993 was obtained from orthophoto interpretation of INEGI: E14B21 D, E and F fractions; and E14B31 A, B and C fractions, with a 2 m pixel size, which were re-sampled with a 5 m Arc Map 8.1™ software. For the 2004 covers, the process was similar, but SPOT 5 panchromatic images were used with a 5 m pixel size. Two scenes were used: 1) 588/311 dated October 15th, 2004, and 2) 589/311 dated February 2nd, 2004. The rather small size of the study area, added to the high spatial resolution of the images and the support of the land use and vegetation 1:50,000 map of INEGI, favored to clearly identify the soil types in both dates. Their validation was made from field work, with random sampling and a later edition of the final maps.

Covers for both dates came from a UTM projection with WGS84 Datum. Eight land use categories were considered: urban, cropland, induced grassland, mines, natural grassland, water, reforestation and forest.

Land use change assessment

Land use covers were transformed to raster format, with a 10 m pixel size, limited by the power to process data of the available computation equipment. Afterwards, a land use change matrix between the 1993 and 2004 dates was obtained.

Spatial multi-criteria assessment

The first step consisted of identifying and to organize the important criteria (variables) that determine land use change into a hierarchy. Then, a spatial multi-criteria assessment (SMA) process was applied to ponder them according to the wisdom and experience of decision makers (Malczewski, 1999; Saaty, 1980). The SMA was put into a GIS (Arc Map 8.1®), in order to assess the present options, from spatial multiple criteria (criterion covers). These were classified into factors and restrictions, in such a way that a factor is a criterion that outstands or diminishes the potential of a specific alternative, for a specific activity, while a restriction limits the alternatives ((Malczewski, 2004). Factors were integrated through the rescission rule (Saaty, 1980). Restrictions were accomplished with Boolean algebra (Barredo, 1996; Malczewski, 1999; Eastman, 2001). Criterion and restriction covers used in the proposed model represent relevant factors of urban and rural landscape of the region. Their determination came from the experience reported by Paegelow *et al.* (2003) and Ghribi (2005).

Definition of relevant criteria maps.- With the available cartographic information was designed a model to predict land use changes (Allen and Lu, 2003; Landis, 1995; Southworth,

de vía de líneas eléctricas de alta tensión; 3) zona de amortiguamiento de corrientes de agua; 4) zona arqueológica del cerro de Tetzcutzingo; 5) Parque Nacional Molino de Flores; 6) pendientes mayores al 40%; 7) minas de arena; 8) cuerpos de agua; 9) bosque y 10) pastizal natural. Las fuentes de información fueron las vectoriales de INEGI de la carta E14B21 y E14B31 escala 1:50,000, cartas topográficas digitales de INEGI: E14B21 y E14B31 escala 1:50,000, ortofotomapa de INEGI de 1993, modelo de elevación digital de INEGI y mapa de uso de la tierra de 2004 -generado en éste trabajo-. Una vez elaboradas las coberturas criterio se procedió a efectuar su estandarización.

Estandarización de mapas criterio.- Actividad necesaria para la normalización de los valores representados por los píxeles, es decir, una homogenización de unidades de las coberturas a una escala común de valores de 0 a 255. Lo anterior asegura la interpretación de los resultados obtenidos en manipulaciones posteriores. La estandarización se hizo de dos formas, en función de si los valores contenidos eran continuos o categóricos (Eastman, 2001). Para los primeros se usaron funciones de membresía (lógica difusa); para los mapas de tipo categórico se asignaron de manera directa a cada categoría.

Mapas continuos.- Las coberturas criterio con datos continuos inician su estandarización introduciéndolos al módulo DISTANCE de IDRISI[®]. Este calcula la distancia Euclidiana de cada celda hasta el conjunto de celdas objetivo más cercano. Las distancias son producidas en unidades de referencia especificadas en el archivo objetivo de documentación de las imágenes (Eastman, 2001). La unidad de medida de las coberturas criterio fue el metro. Posteriormente, las coberturas generadas se introdujeron al módulo FUZZY IDRISI[®], el cual utiliza funciones de membresía (lógica difusa) para definir el grado de pertenencia de un objeto (o píxel del mapa) a un determinado conjunto o fenómeno, en este caso para definir el grado o potencialidad de que un uso actual de la tierra cambie a un uso futuro predefinido.

La función de membresía describe y limita el nivel de pertenencia de los objetos a los conjuntos. Existen tres funciones básicas: lineal, forma de J y sigmoidal. Todas tienen puntos de control y de acuerdo a la función tendrá forma la curva con inflexiones representadas por letras A, B, C y D, las que están ordenadas en una escala de medida de pertenencia de baja (0) a alta (255) (Eastman, 2001). Así mismo, la forma de la función (curva) puede ser creciente, decreciente o simétrica.

Las curvas de inflexión simétricas están distribuidas en cuatro puntos en toda la función; en la creciente y decreciente, tres de los cuatro puntos están ubicados en una inflexión y el cuarto, puede estar en un punto que asciende o desciende.

1995; Wegener, 1994). Restriction covers were defined as they are areas with a low potential to change their use in the short and middle term, such as: 1) Right of pathways; 2) Right of high-tension transmission lines; 3) buffer zones of water currents; 4) Archaeological zone of Tetzcutzingo hill; 5) Molino de Flores National Park; 6) Slopes over 40 per cent; 7) Sand mines; 8) Bodies of water; 9) Forest and 10) Natural grassland. The sources were INEGI vectorial maps from 1:50,000 E14B21 and E14B31 maps, INEGI topographic digital 1:50,000 E14B21 and E14B31 maps, INEGI (1993) orthophotomap, INEGI digital elevation model and land use map (2004) here produced. Once the criterion covers were made, their standardization was performed.

Standardization of criterion maps.- This is necessary for the normalization of the values represented by pixels, that is, a homogenization of the units of the covers at a common scale of values from 0 to 255. This guarantees the interpretation of results in later handling. Standardization was made in two ways, according to the values being continuous or categorical (Eastman, 2001). For the first, membership functions were used (diffuse logic); for the categorical maps, they were directly assigned to each category.

Continuous maps.- Criterion covers with continuous data start their standardization by putting them into the IDRISI DISTANCE[®] module. It calculates the Euclidian distance of each cell up to the closest group of target cells. Distances are produced in reference units specified in the target file of the documentation of images (Eastman, 2001). The unit of measurement of the criterion covers was metrical. Afterwards, the generated covers were put into the IDRISI FUZZY[®] module, which uses membership functions (diffuse logic) to define the degree of belonging of an object (or map pixel) to a particular group or phenomenon, in this case to define the degree or potential that a present land use changes to a predetermined future use.

The membership function describes and limits the belonging level of the objects to the groups. There are three basic functions: linear, J form and sigmoidal. All have control points and, according to the function, it will have the curve form with inflexions represented by the A, B, C and D letters, which are ordered in a scale of measurement of low (0) to high (255) belonging (Eastman, 2001). Also, the form of the function (curve) may be increasing, decreasing or symmetrical.

The symmetrical inflection curves are distributed in four points in the whole function; in the increasing and decreasing, three out of the four points are located in an inflection and the fourth might be in a point that goes up or down. For further detail, it is advisable to review Burrough and McDonnell (1998) and Eastman (2001)). The function that was used in this research was the sigmoidal, as Eastman advised (2001); the decreasing and increasing forms were applied, since they describe the phenomenon that was studied (Table 1).

Dependiendo del número de curvas de inflexiones se requerirán los valores a utilizar Burrough y McDonnell, 1998; Eastman, 2001). La función utilizada en la investigación fue la sigmoideal, recomendada como la mejor por Eastman (2001); las formas aplicadas fueron decreciente y creciente, ya que son las que describen el fenómeno estudiado (Cuadro 1).

Coberturas categóricas.- En virtud de que las coberturas categóricas contienen información de conjuntos de clases, se procedió a realizar una estandarización por asignación (Eastman, 2001). La asignación fue de valores de 0 a 255 (las cifras grandes corresponden a una mayor conveniencia), y se usó el módulo ASSIGN de IDRIS®. En el caso de las coberturas de uso del suelo de 2004 los valores fueron 255 para el urbano, 230 para el agrícola, 200 al pastizal inducido, 100 a la reforestación, 80 al bosque y 0 para pastizal natural, cuerpos de agua y minero; para el mapa de pendientes se asignaron: 255 para el intervalo de 0-20%, 200 para el de 20-30%, 100 para de 30-40% y 0 para los superiores a 40%.

Category covers.- Since category covers have information of class groups, a standardization by assignation followed (Eastman, 2001). The assignation was of values from 0 to 255 (the highest numbers belong to a greater convenience), and the IDRISI ASSIGN® module was used. In the case of the land use cover of 2004, values were 255 for urban use, 230 for cropland, 200 for induced grassland, 100 for reforestation, 80 for forest and 0 for natural grassland, water bodies and mining; to the slope maps, 255 for the 0-20% interval, 200 for the 20-30%, 100 for the 30-40% and 0 for those over 40 per cent were assigned.

Based upon the prediction model that was used in this research supported on Eastman (2001), from that moment on two critical routes were taken, one that gathers six criterion maps were useful to prepare the target map of land use change potential and the other that put together land use categories. Both were inputs to continue the process of the land cover change prediction model and were carried out in IDRIS®.

Cuadro 1. Estandarizaciones de las coberturas criterio mediante lógica difusa (unidad de medida en metros).
Table 1. Standardizations of the criterion covers by means of diffuse logic (unit of measurements in meters).

Factores	Puntos de control	
	(Puntos de inflexión de la curva creciente)	
	C	D
Distancia a caminos	100	300
Distancia de acceso de red de agua potable	100	300
Distancia a agricultura	0	100
Distancia a pastizal inducido	0	200
Distancia a cuerpo de agua	20	100
Distancia a minería	0	80
Distancia a reforestación	50	200
Distancia a pastizal natural	0	100
Distancia a cuerpos de agua y ríos	10	60
Distancia a bosque	50	200

De acuerdo al modelo de predicción que se empleó en la investigación, basado en Eastman (2001), a partir de este momento se tomaron dos rutas críticas, una que aglutina seis mapas criterio, los cuales sirvieron para generar el mapa objetivo de potencialidad de cambio de usos y la otra agrupó las categorías de uso del suelo. Ambas fueron insumos para continuar el proceso del modelo de predicción de cambio de cobertura del suelo, y se llevaron a cabo en IDRIS®.

Ponderación de mapas criterio.- La toma de decisiones incorpora varios criterios, aunque no todos tienen el mismo peso (valor) y orden de importancia (Saaty, 1980). Dado que el total de los mapas criterio considerados no contribuyen o influyen de igual manera a que cierta área cambie de uso, particularmente a que se urbanice, fue necesario asignar valores de importancia o peso a cada uno de ellos. Estos se

Pondering of criterion maps.- Decision taking includes several criteria, even though not all have the same weight (value) and order of importance (Saaty, 1980). Since not all the criterion maps help or influence as well that a certain area changes its use, particularly that it gets urbanized, it was necessary to give importance values or weight to each one of them. These were calculated by means of the paired comparison matrix suggested by Saaty (1980), that it is made up by rows and columns with the criteria used in the model in which the comparison by pairs were made, one in regard to the rest and a value between 1 and 9 was given according to their importance (Eastman, 2001). Criteria were adjusted by means of IDRISI WEIGHT™ module (Table 2).

calcularon con la matriz de comparaciones pareadas propuesta por Saaty (1980), que se compone por filas y columnas. Con los criterios empleados en el modelo se hizo la comparación por pares, uno con respecto a los demás, y se otorgó un valor del 1 al 9 de acuerdo a su importancia (Eastman, 2001). La ponderación de los criterios se efectuó con el módulo WEIGHT de IDRISI® (Cuadro 2).

Cuadro 2. Valores de ponderación de criterios para determinar la conveniencia del uso urbano.

Table 2. Values of criteria ponderation to determine the convenience of urban use.

Criterio	Peso (%)
Distancia a minas de arena	3.93
Distancia a cuerpos de agua y ríos	5.91
Uso del suelo	11.10
Pendiente del terreno	19.21
Distancia a vías de acceso	26.53
Distancia a red de agua potable	33.33

Evaluación multicriterio.- En el módulo MCE de IDRISI® se ingresaron los mapas criterio con sus respectivos pesos y mapas de restricciones. El algoritmo los agrega mediante el proceso conocido como combinación lineal ponderada para generar el mapa potencial (Eastman, 2001).

Modelado de cambios para el año 2014

Los mapas de uso del suelo de 1993 y 2004 fueron los insumos para las cadenas de Markov, mismas que originaron una colección de mapas de transición de cambios por categoría, además de las matrices de probabilidad de cambio y de áreas (Eastman, 2001). Este algoritmo calcula la probabilidad de que un área determinada adquiriera cierta condición (cambio) en un tiempo 2 (futuro) y, en función de su estado, en el tiempo 1 (pasado). El proceso se define como:

$$V_{t_2} = M \times V_{t_1}$$

Donde:

- V_{t_2} = mapa de salida (tiempo 2)
- V_{t_1} = mapa de categorías de entrada (tiempo 1)
- M = matriz de probabilidad de transición para el intervalo de tiempo (Δt)

$$(\Delta t): \Delta t = t_2 - t_1$$

Donde:

- t_2 es el tiempo 2
- t_1 es el tiempo 1

La matriz de probabilidad de transición describe la

Multi-criterion assessment.- In the IDRISI MCE™ were input the criterion maps with the corresponding weights and restriction maps (Eastman, 2001).

Modeling changes for the year 2014

The land use maps of 1993 and 2004 were the inputs for Markov chains, which generated a collection of the transitional maps of category change, in addition to the matrixes of probability changes and of areas (Eastman, 2001). This algorithms calculates the probability that one area gets some condition (change) in a time 2 (future), and in function of the state in the time 1 (past). The process is defined as:

$$V_{t_2} = M \times V_{t_1}$$

Where:

- V_{t_2} = exit map (time 2)
- V_{t_1} = entrance category map (time 1)
- M = probability of transition matrix for the time interval (Δt)

$$(\Delta t): \Delta t = t_2 - t_1$$

Where:

- t_2 is time 2
- t_1 is time 1

The probability of transition matrix describes the probability that a determined pixel keeps itself in the same state or changes to another one. This comes from the crossing of two images fitted for the proportional error. A product of the probability of transition matrix are the images of conditional probability, which show the probability of each type of cover keeps to an assigned class in the near future, and is limited to its present state.

Probability matrixes and probability of transition maps were generated with an IDRISI MARKOV® module, to which were added the land use maps of 1993 (time 1) and 2004 (time 2) (Johnston, 1998; Eastman, 2001 and Petit *et al.*, 2001).

Land use projection by means of cell automats and Markov chains (CAMC) starts from the presumption that the dynamics of the spatial elements (frequently pixels that represent some land surface) come from the actual state of the element, plus a factor of closeness brought by the condition of their closest neighbors (pixels that represent the adjacent land).

RESULTS AND DISCUSSION

Land use maps and change assessment

Results of the land use changes from 1993 to 2004 are shown in Table 3 and in figures 2 and 3. From the 26.395 ha that

probabilidad de que un píxel dado permanezca en el mismo estado o cambie a otro. Esta es derivada del cruce de dos imágenes ajustadas por el error proporcional. Producto de la matriz de probabilidad de transición son las imágenes de probabilidad condicional, que indican la probabilidad de que cada tipo de cobertura pertenezca a la clase designada en el futuro próximo, y está condicionada a su estado actual.

Las matrices de probabilidad y los mapas de probabilidad de transición se generaron con el módulo MARKOV de IDRISI®, al cual se agregaron los mapas de uso del suelo del año 1993 (tiempo 1) y el 2004 (tiempo 2) (Johnston, 1998; Eastman, 2001 y Petit *et al.*, 2001).

La proyección del uso del suelo mediante autómatas celulares y cadenas de Markov (ACCM) parte del supuesto que la dinámica de los elementos espaciales (frecuentemente píxeles que representan cierta superficie de tierra) resulta del estado actual del elemento, más un factor de proximidad aportado por el estado de sus vecinos inmediatos (píxeles que representan superficie de tierra adyacente).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mapas de uso de la tierra y evaluación de cambios

Los resultados de los cambios de uso del suelo de 1993 a 2004 se muestran en el Cuadro 3 y en las figuras 2 y 3. De las 26,395 ha que componen la superficie total bajo estudio, en el año 1993, la parte correspondiente a bosque, agricultura y pastizal inducido era de 24,206 ha. Las 2,189 ha restantes correspondían a las áreas de reforestación, uso urbano, minería, pastizal natural y cuerpos de agua. Para el año 2004, 23,946 ha incluían al bosque, agricultura y pastizal inducido, en tanto que 2,449 ha integraban a los otros usos consignados.

Cuadro 3. Superficie y porcentaje por tipo de uso de la tierra en los años 1993 y 2004.
Table 3. Surface and land use type per cent in 1993 and 2004.

Año	Unidades	Bq	Pn	Pi	Mn	Ref	Ag	Urb	Ca
1993	ha	12,564	260	2,575	293	1,370	9,067	263	3
	%	47.6	0.99	9.76	1.11	5.19	34.35	1	0.01
2004	ha	12,550	259	2,511	385	1,363	8,885	436	6
	%	47.55	0.98	9.51	1.46	5.16	33.66	1.65	0.02

Bq = bosque; Pn = pastizal natural; Pi = pastizal inducido; Mn = minería; Ref = reforestación; Ag = agrícola; Urb = urbano; CA = cuerpos de agua.
Bq = forest; Pn = natural grassland; Pi = induced grassland; Mn = mining; Ref = reforestation; Ag = agriculture; Urb = urban; CA = water bodies.

En el año 2004, el uso urbano creció en una proporción de 173 ha, los cuerpos de agua 3 ha y la minería 92 ha. Las disminuciones se presentaron en el pastizal inducido con 64 ha, el agrícola 182 ha, reforestación 7 ha; el pastizal natural 1 ha y el bosque natural 14 ha.

make up the total surface under study, in 1993, the part that refers to forest, cropland and induced grassland is 24,206 ha. The remaining 2,189 ha belonged to reforestation, urban use, mining, natural grassland and water bodies. For 2004, 23,946 ha include forests, cropland and induced grassland, while the 2,449 ha included the other kinds of use already mentioned.

In 2004, urban use grew in 173 ha, water bodies, 3 ha and mining, 92 ha. Reductions were observed on induced grassland, with 64 ha, cropland, 182 ha, reforestation 7 ha, natural grassland 1 ha and natural forest, 14 ha.

Land use change dynamics from 1993 to 2004 is summarized in Table 4; interpretation is paired, the numbers of the diagonal correspond to the areas that kept stable in the interval of a date and another, those that are out of it are the transitions of the classes between 1993 and 2004. It is observed that in all classes there were changes, but the most dynamic were cropland, induced grassland and forest. Of the first one, 174 ha became urban, 74 ha mines, 23 ha forest, 5 ha induced grassland and 3 ha water bodies and reforestation. Of the second one, 59 ha changed to cropland, 31 ha to forest, 14 ha to mining and 4 ha to reforestation. The categories which increased their area were: urban, sand mines and water bodies.

Forest land decreased 14 ha, as well as reforestation, 7 ha. Thus, it is evident that in the assessed period the loss of forest cover has been affected in such an intense way. However, according to Table 4, the numbers indicate that the forest was affected by agricultural use in 29 ha, to the induced grassland in 38 ha and the natural grassland in 14 ha. On the contrary, the forest was improved, mainly by the cropland use with 23 ha, the induced grassland with 31 ha and natural grassland with 15 ha.

The positive change rates by year was for urban use (15.7 ha), mining (8.4 ha) and the water bodies (0.3 ha). The negative: cropland use (16.5 ha), induced grassland (5.8 ha), forest (1.3 ha), reforestation (0.6 ha) and natural grassland (0.1 ha).

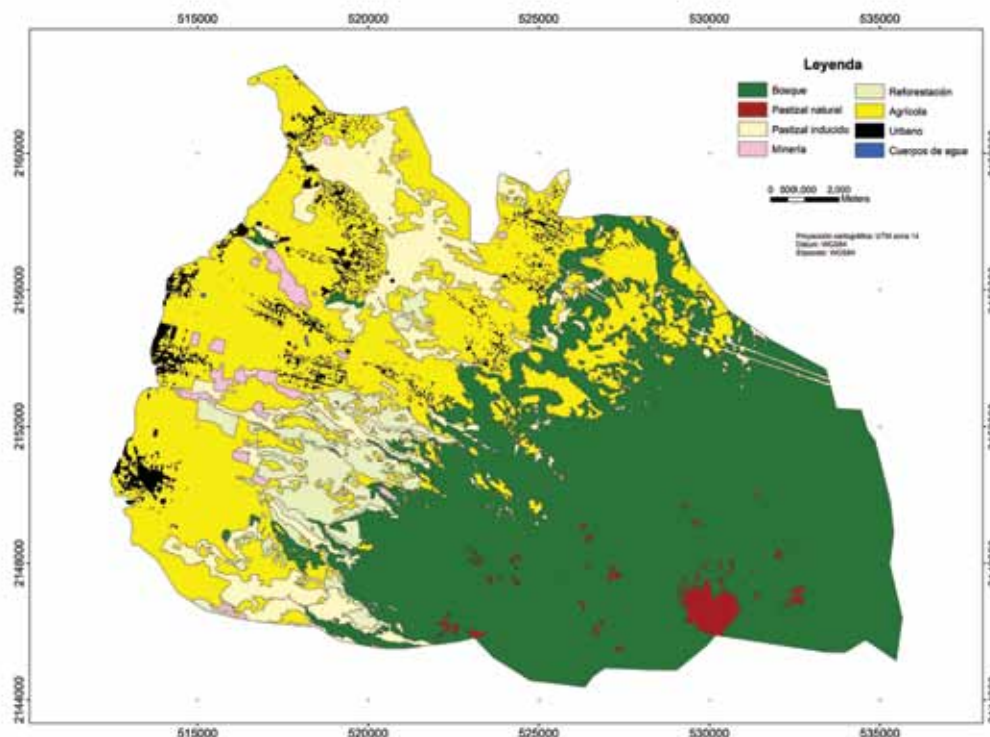


Figura 2. Mapa de uso de la tierra en la región oriente de Texcoco en el año 1993.
Figure 2. Land use map in the Eastern region of Texcoco in 1993.

La dinámica del cambio del uso de la tierra del año 1993 a 2004 se resume en el Cuadro 4; la interpretación es pareada, los valores de la diagonal corresponden a las superficies que se mantuvieron estables en el intervalo de una fecha y otra, aquéllos que están fuera de ella son las transiciones de las clases entre 1993 y 2004. Se observa que en todas las clases hubo cambios, pero las más dinámicas fueron la agrícola, el pastizal inducido y el bosque. De la primera, 174 ha pasaron a urbano, 74 ha a minas, 23 ha a bosque, cinco hectáreas a pastizal inducido y tres hectáreas a cuerpos de agua y reforestación, cada una. Del segundo, 59 ha cambiaron a agrícola, 31 ha a bosque, 14 ha a minas y cuatro hectáreas a reforestación. El bosque se transformó a pastizal inducido (38 ha), 29 ha pasaron al uso agrícola, 14 ha a pastizal natural y dos hectáreas a reforestación. Las categorías que aumentaron en superficie fueron: la urbana, las minas de arena y los cuerpos de agua.

El área de uso forestal tuvo una disminución de 14 ha, al igual que la reforestación 7 ha. Con base en lo anterior, es evidente que en el periodo evaluado la pérdida de la cobertura forestal ha sido afectada de una forma tan severa. Sin embargo, de acuerdo al Cuadro 4 los valores indican que el bosque fue afectado a uso agrícola en 29 ha, al pastizal inducido en 38 ha y al pastizal natural en 14 ha. Contrariamente, el bosque fue beneficiado principalmente por el uso agrícola con 23 ha, el pastizal inducido con 31 ha y el pastizal natural con 15 ha.

These results are coincidental with Moreno (2007), who points out that in Texcoco municipio a reduction of the forest, cropland and grassland area is going on. Also, the values are related with those of Palma *et al.* (1999b), Texcoco City Council (Ayuntamiento de Texcoco, 2003) and Pineda *et al.* (2009), in regard to the spatial growth of the urban use that affects the cropland area.

The results formerly discussed are coincidental with the historical changes recorded in the paper at a state level of Pineda *et al.* (2009) in the range between 1993 to 2002, who found a reduction in the grassland area of 2.0%; increments in the cropland area of 2.3% and in the urban use of 1.4%. But it was not like that in the water bodies, since their per cent show that they kept stable (0.8%) and the forest land that increased 0.5%. Palma *et al.* (1999b) found an average increment of 56.77% in the urban use from 1989 to 1999. This value is not comparable with that obtained in this research (49.07%); nevertheless, the number is high. In regard to the cropland use, this is reduced by an average of 4.80% in the two aforementioned communities, which is contrasting (significantly) with 2.06% obtained for the region that was studied. Thus, at first, the difference of scales generates different values; however, the general tendency is the increment of the urban area and the reduction of cropland areas.

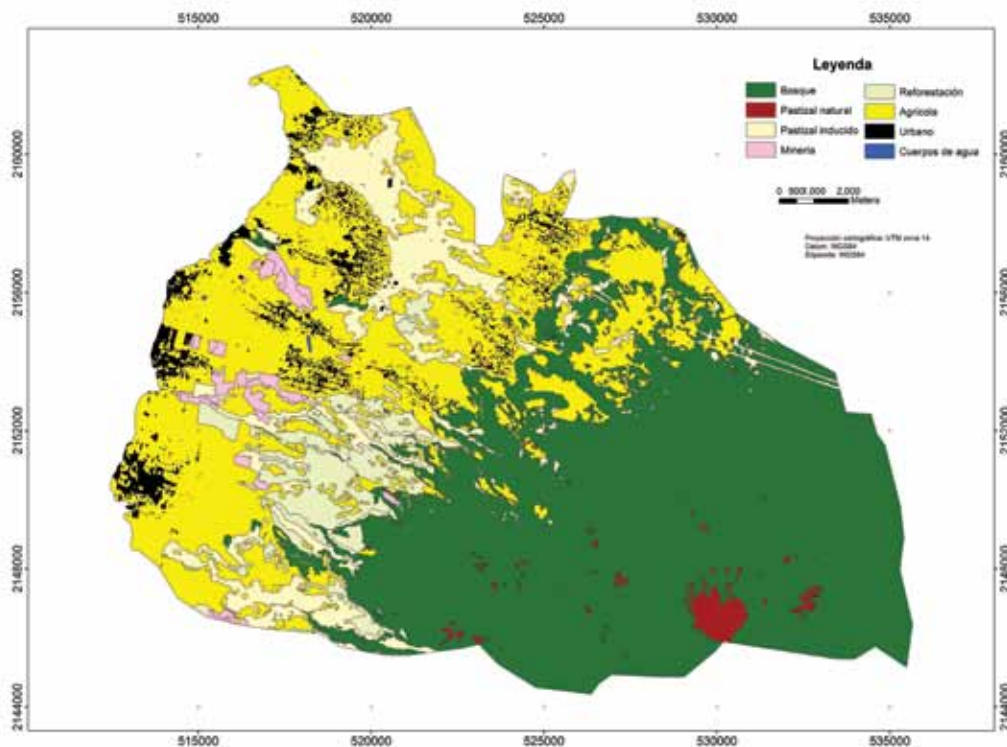


Figura 3. Mapa de uso de la tierra en la región oriente de Texcoco en el año 2004.
 Figure 3. Land use map in the Eastern region of Texcoco in 2004.

Cuadro 4. Dinámica del uso de la tierra del periodo 1993-2004 (hectáreas).
 Table 4. Land use dynamics of the 1993-2004 period (hectares)

2004 \ 1993	Bq	Pn	Pi	Mn	Ref	Ag	Urb	Ca	Total 2004
Bq	12,481	15	31	0	0	23	0	0	12,550
Pn	14	245	0	0	0	0	0	0	259
Pi	38	0	2,467	0	1	5	0	0	2,511
Mn	0	0	14	291	6	74	0	0	385
Ref	2	0	4	0	1,354	3	0	0	1,363
Ag	29	0	59	2	9	8,785	1	0	8,885
Urb	0	0	0	0	0	174	262	0	436
Ca	0	0	0	0	0	3	0	3	6
Total 1993	12,564	260	2,575	293	1,370	9067	263	3	26,395

Bq = Bosque; Pn = Pastizal natural; Pi = pastizal inducido; Mn = minería; Ref = Reforestación; A = agrícola; Urb = urbano; Ca = cuerpos de agua.
 Bq = forest; Pn = natural grassland; Pi = induced grassland; Mn = mining; Ref = reforestation; Ag = agriculture; Urb = urban; CA = water bodies.

Las tasas positivas de cambio por año fueron para el uso urbano (15.7 ha), minero (8.4 ha) y los cuerpos de agua (0.3 ha). Las negativas: uso agrícola (16.5 ha), pastizal inducido (5.8 ha), bosque (1.3 ha), reforestación (0.6 ha) y pastizal natural (0.1 ha).

Los resultados coinciden con lo señalado por Moreno (2007), quien indica que en el municipio de Texcoco existe una disminución de las superficies forestal, agrícola y el pastizal. Así mismo, los valores están relacionados con los generados por Palma *et al.* (1999b), Ayuntamiento de Texcoco (2003) y Pineda *et al.* (2009) con relación al crecimiento espacial del uso urbano que afecta a la superficie agrícola.

Los resultados antes expuestos concuerdan con los cambios históricos registrados a nivel estatal por Pineda *et al.* (2009) en el intervalo de 1993 a 2002, autores que observaron una disminución del área de pastizal de 2.0%; aumentos en la superficie agrícola de 2.3% y uso urbano de 1.4%. Pero no fue así en las extensiones de cuerpos de agua, pues sus porcentajes indican que se mantuvieron estables (0.8%) y en el forestal que creció 0.5%. Palma *et al.* (1999b) detectaron un incremento promedio de 56.77% en el uso urbano de 1989 a 1999. Valor que no es comparable con el obtenido en el presente trabajo (49.07%); no obstante la cifra es alta. Respecto al uso agrícola, se redujo en promedio 4.80% en las dos comunidades, antes citadas, el cual contrasta (significativamente) con 2.06% consignado para la región de estudio. Por lo anterior, en principio, la diferencia de escalas produce valores distintos, sin embargo, la tendencia general es el aumento de la superficie urbana y la reducción de las áreas agrícolas.

Por otro lado, el Ayuntamiento de Texcoco (2003) hace referencia al crecimiento de los cuerpos de agua y de las minas de arena, hacia espacios donde se practicaba la agricultura.

Proyección para el año 2014

La proyección de cambios en el uso del suelo del 2004 al 2014 muestra un aumento en la dinámica. El bosque, la agricultura y el pastizal inducido cubren 23,703 ha, de la superficie total (uso forestal 47.46%, agrícola 33.04% y pastizal inducido 9.30%). En el área restante (2,692 ha) se integran los usos: urbano (2.24%), reforestación (5.14%), minería (1.76%), pastizal natural (1.03%) y cuerpos de agua (0.03%). El resultado espacial de dichos cambios se presenta en la Figura 4.

En el análisis por categoría con base en el 2004, las proyecciones al año 2014 son las siguientes: el uso urbano aumentará 154 ha, la minería 81 ha, el pastizal natural 13 ha y los cuerpos de agua 2 ha. A diferencia del agrícola que se reducirá 165 ha, pastizal inducido 56 ha, los bosques 23 ha y la superficie de reforestación 6 ha.

On the other hand, Texcoco City Council (Ayuntamiento de Texcoco, 2003) refers to the water bodies and sand mines to spaces where agriculture is practiced.

Projection for 2014

The projection of land use changes from 2004 to 2014 suggests a change in its dynamics. Forest, agriculture and induced grassland cover 23,703 ha of the total area (forest use 47.46%, cropland, 33.04% and induced grassland, 9.30%). In the remaining area (2,692 ha) are the following uses together: urban (2.24%), reforestation (5.14%), mining (1.76%), natural grassland (1.03%) and water bodies (0.03%). The spatial result of such changes is shown in Figure 4.

The analysis of categories based upon the 2004 year revealed the following projections: the urban use will increase by 154 ha; mining, by 81 ha; natural grassland by 13 ha and water bodies, by 2 ha, the opposite of which will happen with agriculture which will be reduced by 165 ha, induced grassland by 56 ha, forests by 23 ha and reforestation area by 6 ha.

The ratios of growth and relations that exist among the uses are shown in Table 5, where it is clear that cropland will loose area by urban use (156 ha), mining (64 ha), forest (28 ha), reforestation (6 ha) and water bodies (2 ha). On the other hand, natural grassland will loose up to 3 ha to change to forest and will gain 16 ha of the forest surface; this has implications of the flux dynamism that take cover changes. Induced grassland will have losses due to cropland (54 ha), mining (12 ha) and forest (18 ha). The rates of positive changes projected for each year were: urban use, 15 ha, mining, 8 ha, natural grassland, 1 ha and water bodies, 0.2 ha. The negatives: cropland, 17 ha, induced grassland, 6 ha, forests, 2 ha and reforestation, 1 ha.

Growth data for urban use and reduction of cropland agree with what Palma *et al.* (1999b) determined at a community scale. Contrasts with these authors are due to methodological factors, the period of study and the scale used in the work of each one.

In regard to urban growth, it is important to underline the implications of these tendencies in the increment of the environmental, social and economic problem of Texcoco municipio (Cruz, 2000), which is included in the framework of the transformations that have occurred in the last years in the whole suburban area of Mexico City, as a result of legal and illegal housing and land tenure. Until the 90's there were records of urban use in private lands (63%), communal and of ejidos (27%), federal property (3%) and in those of Texcoco's ancient lake (6%) (Cruz, 2000; Olvera, 2002; Maya, 2004), which means that more pressure will be exerted over new spaces, such as Texcoco. In this sense, Muro (1996) and Texcoco

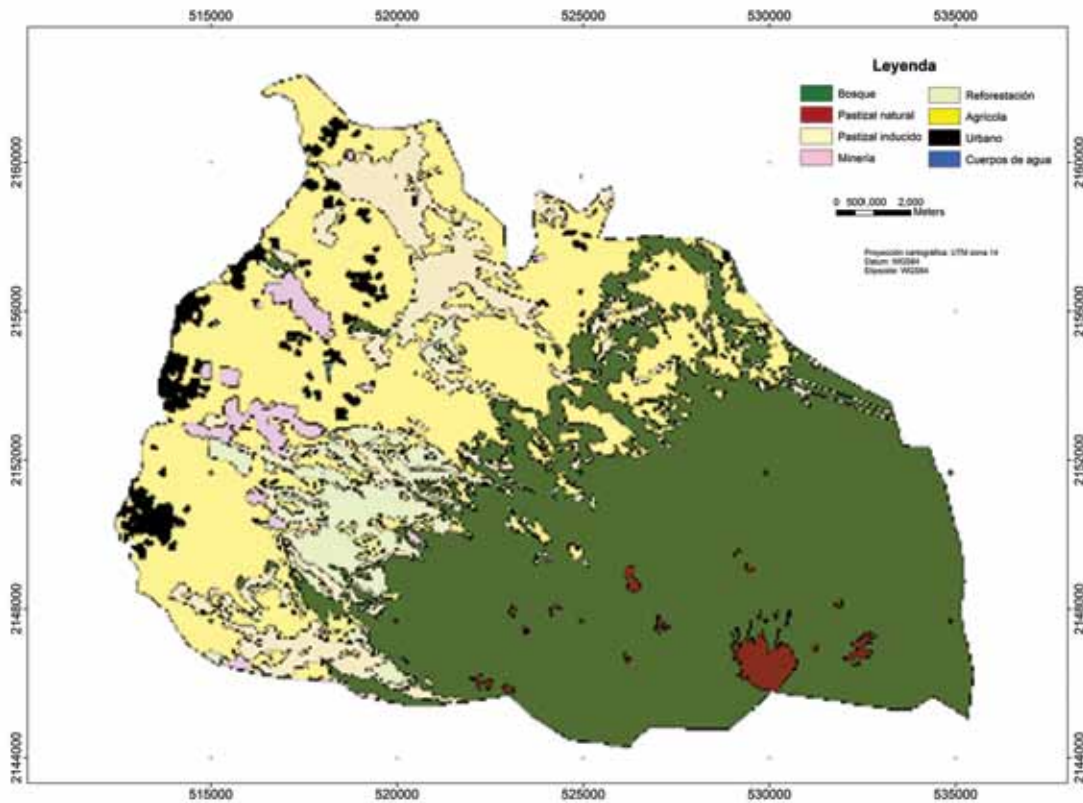


Figura 4. Mapa uso de la tierra para la región oriente de Texcoco en el año 2014.
 Figure 4. Land use map for the Eastern region of Texcoco in 2014.

Las proporciones de crecimiento y relaciones que existen entre los usos se resumen en el Cuadro 5, en el cual se indica que el agrícola tendrá pérdidas en superficie por el urbano (156 ha), minería (64 ha), bosque (28 ha), reforestación (6 ha) y cuerpos de agua (2 ha). Por otro lado, el pastizal natural disminuirá hasta 3 ha para cambiar a bosque y ganará 16 ha de la superficie forestal; lo anterior tiene implicaciones del dinamismo del flujo que toman los cambios de coberturas. El pastizal inducido cederá terreno al agrícola (54 ha), minería (12 ha) y bosque (18 ha). Las tasas de cambios positivas proyectadas por año fueron: uso urbano de 15 ha, minería ocho ha, pastizal natural una ha y cuerpos de agua 0.2 ha. Las negativas: agrícola 17 ha, pastizal inducido 6 ha, bosque 2 ha y reforestación 1 ha.

Los datos de crecimiento para el uso urbano y disminución del agrícola concuerdan con los obtenidos por Palma *et al.* (1999b), quienes obtuvieron resultados a escala comunitaria. Los contrastes con dichos autores obedecen a factores de tipo metodológico, periodo estudiado y la escala de trabajo empleada en cada uno.

City Council (Ayuntamiento de Texcoco, 2003) point out that the risk of increment of the urban territory endangers the cropland area of greatest importance for the production of food in the region as well as of water availability from deep wells and to public services.

In general terms, the model of projection to the future that was applied in this research, undoubtedly has limitations (Paegelow *et al.*, 2003); however, it is useful for decision-makers of regional planning policies (Allen and Lu, 2003), since it enables them to know the expansion tendencies of urban use and to estimate the pressure upon natural resources (Velásquez *et al.*, 2002). The results that are documented reflect the relations and fluxes that would exist among land uses in the study area, noticing an unbalanced spatial relation due to urban use, with a growing tendency in the deterioration of natural resources in the other land uses.

Cuadro 5. Dinámica del uso de la tierra del periodo 2004-2014 (hectáreas).
Table 5. Land use dynamics for the 2004-2014 period (hectares).

2014	2004	Bq	Pn	Pi	Mn	Ref	Ag	Urb	Ca	Total 2014 (ha)
Bq	12,477	3	18	0	1	28	0	0	12,527	
Pn	16	256	0	0	0	0	0	0	272	
Pi	25	0	2,422	0	2	6	0	0	2,455	
Mn	0	0	12	385	5	64	0	0	466	
Ref	1	0	5	0	1,345	6	0	0	1,357	
Ag	31	0	54	0	10	8,623	2	0	8,720	
Urb	0	0	0	0	0	156	434	0	590	
Ca	0	0	0	0	0	2	0	6	8	
Total 2004	12,550	259	2,511	385	1,363	8,885	436	6	26,395	

Bq = Bosque; Pn = Pastizal natural; Pi = pastizal inducido; Mn = minería; Ref = Reforestación, A = agrícola; Urb = urbano; Ca = cuerpos de agua.
Bq = forest; Pn = natural grassland; Pi = induced grassland; Mn = mining; Ref = reforestation; Ag = agriculture; Urb = urban; CA = water bodies.

Respecto al crecimiento urbano, es importante señalar las implicaciones de estas tendencias en el incremento de la problemática ambiental, social y económica del municipio de Texcoco (Cruz, 2000), el cual se incluye en el marco de las transformaciones que se han presentado en los últimos años en toda la zona conurbada de la Ciudad de México, como resultado de los asentamientos humanos legales e ilegales en cualquier tipo de tenencia de la tierra. Hasta la década de los 90 se tenían registros del uso urbano en terrenos privados (63%), ejidales y comunales (27%), propiedad federal (3%) y en los del Ex Lago de Texcoco (6%) (Cruz, 2000; Olvera, 2002; Maya, 2004), es decir la presión se ejercerá hacia nuevos espacios, como Texcoco. En este sentido, Muro (1996) y el Ayuntamiento de Texcoco (2003) señalan que el riesgo del aumento de la mancha urbana pone en peligro a la superficie agrícola de mayor importancia para la producción de alimentos de la región, lo mismo que la disponibilidad de agua procedente de pozos profundos y a los servicios públicos.

En general, el modelo de proyección a futuro que se aplicó, sin duda presenta limitantes (Paegelow *et al.*, 2003); sin embargo, el modelo tiene utilidad para las personas que toman decisiones en las políticas de planificación regional (Allen y Lu, 2003), ya que permite conocer la tendencia de la expansión del uso urbano y estimar la presión sobre los recursos naturales (Velásquez *et al.*, 2002).

Los resultados que se documentan reflejan las relaciones y flujos que existirían entre los usos de la tierra en la zona bajo estudio, notándose una relación espacial desigual por el uso urbano, con una tendencia creciente en el deterioro de los recursos naturales en los otros usos de suelo.

CONCLUSIONS

The urban use of the Eastern zone of Texcoco municipio showed the highest rate of annual growth, 15.7 ha for the 1993-2004 period, while agriculture diminished 16.5 ha⁻¹.

The model here developed to forecast land use for 2014 emphasizes variables that catalyze urban use growth and makes it possible to visualize the spatial dynamics of uses in the Eastern region of Texcoco. It is observed that urban use has an annual growth rate of 14 ha. Cropland use decreases at an annual rate of 15 ha. Undoubtedly, these changes affect the quality and amount of the available natural resources in the region.

End of the English version

CONCLUSIONES

El uso urbano de la zona oriente del municipio de Texcoco presentó la tasa más alta de crecimiento anual, 15.7 ha para el periodo 1993-2004, mientras que el agrícola disminuyó 16.5 ha¹.

El modelo desarrollado para pronosticar el uso del suelo para el año 2014, enfatiza variables que catalizan el crecimiento del uso urbano y permitió visualizar la dinámica espacial de los usos en región oriente de Texcoco. Se observa que el uso urbano presenta una tasa anual de crecimiento de 14 ha. El uso agrícola decrece a una tasa anual de 15 ha. Sin duda, estos cambios de uso afectarán la calidad y cantidad de los recursos naturales disponibles en la región. 🌱

REFERENCIAS

Allen, J. and K. Lu. 2003. Modeling and prediction of future urban growth in the Charleston region of South Carolina: a GIS-based integrated approach. *Conservation Ecology*. Vol. 8(2): 2. <http://www.consecol.org/vol8/iss2/art2>. (3 de enero de 2007).

Ayuntamiento de Texcoco. 2003. Plan de desarrollo municipal 2003-2006. Ayuntamiento de Texcoco. Texcoco, Estado de México. México. 228 p.

Barredo C., J. I. 1996. Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Editorial RA-MA. Madrid, España. 259 p.

Briceño, F. 2003. Cambios de cobertura de la tierra en el Valle de Río Momboy, Estado de Trujillo. *Geoenseñanza*. Vol. 8 (1): 91-100.

Burrough, P. A. and R. A. McDonnell. 1998. Principles of geographical information systems. Oxford University Press. New York, NY. USA. 333 p.

Castelán V., R., J. Ruiz C. G. Linares F., R. Pérez A. y V. Tamariz F. 2007. Dinámica de cambio espacio-temporal de uso del suelo de la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. Núm. 64: 75-89.

Cruz R., M. S. 2000. Crecimiento urbano y poblamiento en la zona metropolitana de la Ciudad de México. El perfil del nuevo milenio. *Revista El Cotidiano*. Vol. 17 (103): 43-53. <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/325/32510304.pdf>. (11 de diciembre de 2006).

Dale, V. H. 1997. The relationship between land-use change and climate change. *Ecological Applications*. Vol. 7(3): 753-769.

Eastman, J. R. 2001. Guide to GIS and Image Processing. Clark Labs. Clark University, Worcester, MA USA. Vol. 2. 144 p.

Flores L., J. C., O. Monterroso y M. Ibrahim. 2005. Factores económicos que afectan el uso de la tierra en el bosque seco tropical de Costa Rica: Una revisión de la teoría y estudio de caso. <http://www.virtualcentre.org/es/enl/keynote18.htm>. (26 de noviembre de 2006).

Ghribi, M. 2005. GIS applications for monitoring environmental change and supporting decision-making in developing countries. ICS, United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). Trieste, Italy. 144 p.

Herrera G., V. 2001. Estudio de crecimiento urbano en la ciudad de Valdivia (Chile) a través del uso integrado de imágenes de satélite, SIG y equipo GPS. *Revista Teledetección*. Vol. 15: 1-9.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2005. II Censo de Población y Vivienda. Estado de México. Resultados Definitivos. México. D. F., México. 450 p.

Jáuregui O., E. 2004. Impacto del uso del suelo en el clima de la Ciudad de México. *Investigaciones Geográficas, Instituto de Geografía, UNAM, México*. Vol. 55: 46-60.

Johnston, C.A. 1998. Geographic information systems in ecology. Blackwell Science. Carlton Victoria, Australia. 239 p.

Landis, J. D. 1995. Imagining land use futures: applying the California urban futures model. *Journal of the American Planning Association*. Vol. 61: 438-457.

López G., E. M., G. Bocco y M. E. Mendoza C. 2001. Predicción del cambio de cobertura y uso del suelo. El caso de la ciudad de Morelia. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 45: 56-76.

Losada, H., H. Martínez, J. Vieyra, R. Pealing, R. Zavala and J. Cortés. 1998. Urban agriculture in the metropolitan zone of Mexico City: changes over time in urban, suburban and peri-urban areas. *Environment and Urbanization*. Vol. 10(2): 37-54.

Malczewski, J. 1999. GIS and multi-criteria decision analysis. John Wiley & Sons. New York, NY USA. 392 p.

Malczewski, J. 2004. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning*. Vol. 62: 3-65.

Maya G., L. N. 2004. PROCEDE y el piso en la incorporación del suelo de propiedad social a usos urbanos en los municipios conurbados de la Ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*. Vol. 56: 313-357.

Moreno S., E. 2007. Características territoriales, ambientales y sociopolíticas del municipio de Texcoco, Estado de México. *Quivera*. Vol. 9: 177-206.

Muro B., P. 1996. Impacto ambiental en el corredor Los Reyes- Texcoco. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Sociología Rural. Chapingo, Edo. de México. México. 402 p.

Olvera H., J. M. 2002. Algunas consideraciones sobre el crecimiento urbano y dominio pleno de parcelas ejidales en la región Valle de Cuautitlán, Estado de México. Procuraduría Agraria, México. *Estudio Agrarios*. Núm. 21. 29 p. http://www.pagob.mx/publica/cd_estudios/Paginas/autores/olvera%20hdz%20jose%20algunas%20consideraciones%20sobre.pdf. (20 de octubre de 2007).

Ortiz S., C. 2000. Análisis en las políticas públicas en la agricultura urbana. <http://www.ipes.org/au/pdfs/estudios/texcoco.pdf>. (15 de agosto de 2006).

Paegelew, M., M. T. Camacho Olmedo y J. Menor T. 2003. Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *GeoFocus*. Vol. (3): 22-44.

Palma T., A. C. A. Ortiz S. y H. Vaquera H. 1999a. Tendencia y pronóstico del uso de la tierra en dos comunidades rurales de la cuenca del río Texcoco. *Revista Chapingo: Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, Vol. 5(2): 181-186.

Palma T., A. C. A. Ortiz S. y H. Vaquera H. 1999b. Dinámica del uso de la tierra en dos comunidades rurales de la cuenca del río Texcoco. *Revista Chapingo: Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, Vol. 5(2): 189-191.

Pineda J., N. B., J. Bosque S., M. Gómez D., W. Plata R. 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: 33-52.

Petit, C., T. Sudder and E. Lambin. 2001. Quantifying processes of land-cover change by remote sensing: resettlement and rapid land cover changes in south-eastern Zambia. *Int. Journal of Remote Sensing*. Vol. 22(17): 3435-3456.

Romero H., D. y J. López B. 2000. Producción e integración de fotomapas digitales para la evaluación del crecimiento urbano en el municipio de Texcoco, Estado de México: Período 1970-1989-1997. *Investigaciones Geográficas, Boletín Núm. 42: 48-66*.

Saaty, T. L. 1980. The analytic hierarchy process. McGraw-Hill. New York, NY, USA. 269 p.

Sandoval, V. y V. Oyarzum. 2004. Modelamiento y prognosis espacial en el cambio de uso del suelo. *Quebracho*, Vol. (11): 9-21.

Southworth, F. 1995. A technical review of urban land use-transportation models as tools for evaluating vehicle travel reduction strategies. Center for Transportation Analysis Energy Division. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. USA. 104 p. http://tmp.fhwa.dot.gov/clearinghouse/docs/landuse/compen_dium/ornltoc.stm. (9 de diciembre de 2007).

Velázquez, A., J. F. Mas y J. L. Palacios. 2002. Análisis del cambio de uso del suelo. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT. México, D.F. México. 83 p.

Wegener, M. 1994. Operational urban models: state of the art. *Journal of American Planning Association*. Vol. 60: 17-29.