



COMPARACIÓN DE MÉTODOS ESPACIALES PARA DETECTAR CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO URBANO

COMPARISON OF SPATIAL METHODS TO DETECT URBAN LAND-USE CHANGE

María Josefa Jiménez-Moreno¹; Manuel de Jesús González-Guillen¹; Miguel Escalona-Maurice²; José René Valdez-Lazalde¹; Carlos Arturo Aguirre-Salado³.

Postgrado Forestal. Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. Estado de México. C. P. 56230. Correos-e: manuelg@colpos.mx, valdez@colpos.mx (*Autor para correspondencia) Correo-e: josefajimenez@colpos.mx

² Postgrado en Desarrollo Rural. Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. Estado de México. C. P. 56230.

³ Ingeniería Geomática. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, S.L.P. C. P. 78290. Correo-e: carlos.aguirre@uaslp.mx.

RESUMEN

Esta investigación describe y analiza algunos métodos de detección de cambios en el uso del suelo originado por el crecimiento urbano con la finalidad de mostrar sus ventajas y desventajas; también expone aquellos métodos que proporcionan resultados favorables fundamentados en la información geográfica y que permiten una correcta toma de decisiones en la planificación del uso del suelo urbano.

ABSTRACT

This research describes and analyzes some methods of detecting land-use changes caused by urban growth in order to show their advantages and disadvantages. It also outlines those methods that provide favorable results based on geographical information and enable proper decision-making in urban land-use planning.

Recibido: 9 de abril 2010
Aprobado: 19 de junio 2011
doi: 105154./r.rchscfa 2010.04. 020

PALABRAS CLAVE: Uso del suelo urbano, crecimiento urbano, planificación territorial, toma de decisiones, SIG.

KEY WORDS: Urban land use, urban growth, land-use planning, decision-making, GIS.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo poblacional demanda una gran cantidad de servicios y recursos, lo cual puede llegar a impactar negativamente al ambiente y deteriorar la calidad de vida de sus habitantes cuando no se realiza de manera planificada (USGS, 1999). Por tanto, es importante que las autoridades encargadas de la planificación territorial conozcan e implementen metodologías de planificación espacial para detectar y establecer las posibles modificaciones del crecimiento urbano para reorientar y minimizar los impactos bajo un contexto de sustentabilidad.

En este proceso de planificación territorial es fundamental el uso de las diferentes disciplinas de la Geomática para caracterizar espacial y temporalmente la dinámica del crecimiento urbano con cierta precisión y detalle, con la finalidad de generar conocimiento útil en la planificación y ordenamiento del territorio (Franklin, 2001; Herrera, 2001; Gómez, 2001; Chuvieco, 2008).

INTRODUCTION

Urban development demands a great deal of services and resources, which can adversely affect the environment and lower the quality of life of its inhabitants when it is unplanned (USGS, 1999). It is therefore important that the authorities responsible for land-use planning understand and implement spatial planning methods to detect and establish possible changes to urban growth to redirect and minimize impacts in a context of sustainability.

In the land planning process, use of the different Geomatics Engineering disciplines is essential in order to characterize spatially and temporally the urban growth dynamic with some degree of precision and detail, in order to generate useful knowledge for land-use planning and management (Franklin, 2001; Herrera, 2001; Gómez, 2001; Chuvieco, 2008).

Los métodos basados en la teledetección han demostrado ser una herramienta eficaz para la detección de los cambios en el uso del suelo y los ocasionados en el medio físico, los cuales cuantifican el ecosistema natural y urbano, proporcionando una visión integral de la dinámica espacio-temporal de la cobertura y los patrones del uso del suelo, contribuyendo con ello a la formulación de políticas de desarrollo regional (Treitz y Rogan, 2004).

En suma, las técnicas de geomática ayudan a detectar los cambios de uso del suelo de manera oportuna y precisa y a entender la relación e interacción entre el ser humano y los fenómenos naturales (López *et al.*, 2001; Eastman, 2003; Lu *et al.*, 2004), lo que permite a su vez tomar las medidas necesarias para contrarrestar los cambios o impactos negativos.

A diferencia de otros trabajos de análisis comparativo que usan las técnicas de detección de cambios con base en las clasificaciones basadas en la normalización radiométrica implementadas en el dominio del infrarrojo óptico (Mas, 1999; Coppin *et al.*, 2004), o en el número de bandas empleadas en las imágenes y en la selección de los umbrales apropiados (Lu *et al.*, 2004), el presente estudio presenta una revisión y análisis comparativo de los métodos espaciales más utilizados para detectar cambios de uso del suelo generado por el crecimiento urbano, mostrando las ventajas y desventajas encontradas en la aplicación de los mismos.

DESARROLLO

MÉTODOS DE ANÁLISIS DE CAMBIO DE USO DEL SUELO

La literatura sugiere tres criterios de clasificación de los métodos existentes para la detección de cambios de uso del suelo. El *primero* se fundamenta en la técnica empleada para detectar el cambio, mismo que puede estar ligado a un cambio en la reflectividad o en las texturas de la imagen, las cuales son separables y afectadas por las limitaciones espaciales, espectrales, temáticas y temporales (Lu *et al.* 2004), e incluye los métodos de: 1) álgebra de mapas; 2) transformaciones matemáticas; 3) post-clasificación; y 4) modelación (evaluación multicriterio y autómatas celulares). El *segundo criterio* se basa en la temporalidad de la información (Eastman, 2003) e incluye: 1) análisis bitemporal (imágenes de dos fechas); 2) análisis multitemporal (varias fechas o series de tiempo); y 3) predicción de cambios a futuro. Finalmente, el *tercer criterio* de clasificación se fundamenta en el tipo de datos empleados (Chuvieco, 2000), los cuales pueden agruparse en: Análisis de datos continuos y datos categóricos. Los datos continuos incluyen todas las metodologías numéricas tales como: Álgebra de mapas, transformaciones matemáticas y modelación; mientras que

Methods based on remote sensing have proved to be effective tools for detecting land-use changes and alterations in the physical environment; these methods quantify the natural and urban ecosystem, providing a comprehensive view of the spatial-temporal dynamics of the land-cover and the land-use patterns, thereby contributing to the formulation of regional development policies (Treitz and Rogan, 2004).

In short, geomatics techniques help detect land-use changes in a timely and accurate manner, and help us understand the relationship and interaction between humans and natural phenomena (López *et al.*, 2001; Eastman, 2003; Lu *et al.*, 2004), allowing in turn the necessary measures to be taken to counteract the changes or negative impacts.

Unlike other works of comparative analysis that use change detection techniques based on classifications, which are in turn based on the radiometric normalization implemented in the optical-infrared domain (Mas, 1999; Coppin *et al.*, 2004), or on the number of bands used in the images and the selection of appropriate thresholds (Lu *et al.*, 2004), this study presents a review and comparative analysis of the spatial methods most commonly used to detect land-use changes caused by urban growth, showing the advantages and disadvantages encountered in applying them.

DEVELOPMENT

METHODS OF ANALYZING LAND-USE CHANGE

The literature suggests three criteria for classifying existing methods of detecting land-use changes. The *first* is based on the technique used to detect the change, which can be linked to a change in the reflectivity or texture of the images, which are separable and affected by spatial, spectral, thematic and temporal limitations (Lu *et al.*, 2004), and includes the methods of: 1) map algebra; 2) mathematical transformations; 3) post-classification; and 4) modeling (multicriteria evaluation and cellular automata). The *second criterion* is based on the temporality of the information (Eastman, 2003) and includes: 1) bitemporal analysis (images from two dates); 2) multitemporal analysis (various dates or time series); and 3) predictive change modeling (prediction of future changes). Finally, the *third criterion* of classification is based on the type of data used (Chuvieco, 2000), which can be grouped into analysis of continuous data and categorical data. Continuous data include all numerical methods such as map algebra, mathematical transformations and modeling, while categorical data are based

los datos categóricos se basan en una post-clasificación con matrices de cambio o a través de cadenas de Markov.

Clasificación de los métodos según las técnicas empleadas

1) Álgebra de mapas: Consiste en el uso de operaciones aritméticas básicas (suma, resta, multiplicación y división) para manipular y analizar datos espaciales. El álgebra de mapas crea nuevas funciones y relaciones de atributos por la superposición de funciones de dos capas de entrada. Las características de cada capa de entrada se combinan para crear nuevas funciones de salida. Una desventaja del álgebra de mapas en la detección del cambio, es la dificultad para seleccionar los umbrales al considerar que las variaciones numéricas no sean afectadas por cambios estacionales o por cambios propios inherentes a la escena de la imagen. Incluye técnicas como diferencia entre imágenes, regresión entre imágenes, proporción de imágenes, diferencias de índices de vegetación, análisis de vectores de cambio y sustracción de fondo. Estos algoritmos detectan los cambios mayores de ciertos umbrales identificados y proporcionan la información del cambio cuantitativamente en términos de reflectancia (USGS, 1999; Romero y López, 2000; Yagüe, 2002; Azocar, Sahueza y Henríquez, 2003; Catalán, *et al.*, 2007; Compas, 2007; Zhang, *et al.*, 2007; Chuvieco, 2008).

2) Transformación: Son métodos de análisis espaciales que cambian (o transforman) entidades originales mediante combinaciones, utilizando principios y reglas geométricas, aritméticas o lógicas, y también operadores de conversión de datos vectoriales a ráster y viceversa, con la finalidad de mejorar la discriminación de algunos aspectos temáticos dentro de la imagen y de la disposición de los datos de manera que sean evidentes los fenómenos de interés. Una ventaja de estos métodos es que minimizan la redundancia entre bandas. Sin embargo, éstos no pueden proporcionar matrices de cambio detalladas, requieren la elección de umbrales para identificar las áreas de cambio y tienen dificultad en la interpretación e identificación de la información de cambio sobre las imágenes ya transformadas. Este grupo incluye transformaciones multivariadas tales como análisis de componentes principales, índice de vegetación, entre otros (Zhao y Maclean, 2000; Lasaponara, 2005; Kumar *et al.*, 2007; Chuvieco, 2008).

3) Post-clasificación: Es un método generalizado que consiste en agrupar los rasgos geográficos en clases o categorías de acuerdo a características comunes reduciendo el número o variedad, y por tanto, una simplificación del mapa. El proceso se inicia con el agrupamiento de los píxeles mediante clasificación automatizada o digitalización en monitor de una imagen en clases internamente homogéneas, pero diferenciables entre ellas por los valores de una o varias variables. Posteriormente los mapas temáticos creados para las fechas consideradas son utilizados para generar una matriz cruzada de información del cambio de uso entre las imágenes multitemporales. Su desventaja radica en la manipulación de datos históricos y

on post-classification with change matrices or through Markov chains.

Classification of methods based on the techniques used

1) Map algebra is the use of basic arithmetic operations (addition, subtraction, multiplication and division) to manipulate and analyze spatial data. Map algebra creates new functions and attribute relations by overlapping features of two input layers. The characteristics of each input layer are combined to create new output features. One disadvantage of map algebra in change detection is the difficulty of selecting thresholds when considering that the numerical variations are not affected by seasonal changes or changes inherent to the scene of the image. It includes techniques such as image differencing, regression differencing, image ratioing, vegetation index differencing, change vector analysis and background subtraction. These algorithms detect changes over certain identified thresholds and provide change information quantitatively in terms of reflectance (USGS, 1999; Romero and López, 2000; Yagüe, 2002; Azocar, Sahueza and Henríquez, 2003; Catalán, *et al.*, 2007; Compas, 2007; Zhang *et al.*, 2007; Chuvieco, 2008).

2) Transformation refers to spatial analysis methods that change (or transform) original entities through combinations, using geometric, arithmetical or logical principles and rules, and also operators to convert vector data to raster and vice versa, in order to improve the discrimination of some thematic aspects within the image and the layout of the data so that the phenomena of interest are clear. One advantage of these methods is that they minimize redundancy between bands. However, they can not provide detailed change matrices, they require selecting thresholds to identify areas of change and it is difficult to interpret and identify change information in images already transformed. This group includes multivariate transformations such as principal components analysis and vegetation indexes, among others. (Zhao and Maclean, 2000; Lasaponara, 2005; Kumar *et al.*, 2007; Chuvieco, 2008).

3) Post-classification is a generalized method that involves grouping geographical features into classes or categories based on common features by reducing their number or variety and thereby simplifying the map. The process begins with the grouping of pixels by automated classification or heads-up digitizing of an image into internally homogenous classes, but distinguishable from each other by the values of one or more variables. Later thematic maps created for the dates in question are used to generate a cross matrix of land-use change information between the multitemporal images. Its disadvantage lies in the manipulation of historical data and the time taken to generate exact classifications. This

del tiempo empleado para generar clasificaciones exactas. En esta categoría se incluye el análisis temporal-espectral, algoritmos de maximización, clasificación y redes neuronales artificiales (Herrera, 2001; Hurd *et al.*, 2001; Yang y Lo, 2002; Molina, 2005; Chuvieco, 2008).

4) Modelación: Son modelos conceptuales que *describen* y manipulan las características espaciales de los fenómenos geográficos. Los valores de reflectividad de la imagen son convertidos a parámetros o fragmentos basados físicamente a través de modelos lineales, no lineales o ambos. Los parámetros transformados son fáciles de interpretar y de extraer información de las firmas espectrales. Su desventaja radica en el tiempo empleado y la dificultad de desarrollar modelos apropiados para convertir los valores de reflectividad de la imagen a parámetros biofísicos. Incluye el modelado de reflectividad empleada en los modelos de Li-Strahler, modelos mixtos espectrales y modelos de estimación de parámetros biofísicos (Foresman *et al.*, 1997; López *et al.*, 2001; Allen y Lu, 2003; Deal y Schunk, 2004; Aguilera, 2006; Liu *et al.*, 2007; Molero *et al.*, 2007).

Otro tipo de modelaje es el análisis multicriterio. Estos son procesos que transforman y combinan datos espaciales del estado actual a través de reglas de decisión para generar un resultado del estado deseado, el cual se basa en la ponderación y compensación de variables que influyen de manera positiva (aptitud) o negativa (impacto) sobre la actividad objeto de decisión. Además de la información geográfica, incorpora los juicios de valor (gustos y preferencias) de los tomadores de decisión (Paegelow *et al.*, 2003; Malczewski, 2004; Liu *et al.*, 2007).

Clasificación de los métodos según la temporalidad de la información

1) Análisis bitemporal: Es un análisis de tipo cualitativo o cuantitativo en el que se emplean solamente imágenes de dos fechas. En esta clasificación se incluyen las técnicas de diferencia de imágenes, proporción de imagen, diferencia de regresión, análisis de vectores de cambios (análisis entre dos imágenes), calidad de datos (cruce de tablas y/o cruce de clasificación) (Eastman, 2003).

2) Análisis multitemporal: Esta clasificación presenta también un análisis cualitativo o cuantitativo de las imágenes, pero, a diferencia de la clasificación anterior, éstos varían en el número de fechas de análisis empleadas (más de dos), y se emplean técnicas estadísticas de series de tiempo para su análisis. Dentro de esta técnica se incluye el análisis de series de tiempo, correlación de series de tiempo, perfiles de tiempo, desviación de la imagen y análisis de vectores de cambio II (diferencia entre dos series) (Eastman, 2003).

3) Predicción de cambios a futuro: Son técnicas que determinan probabilidades de cambio, donde la predicción espacial explica los cambios detectados po-

category includes temporal-spectral analysis, maximization algorithms, classification and artificial neural networks (Herrera, 2001; Hurd *et al.*, 2001; Yang and Lo, 2002; Molina, 2005; Chuvieco, 2008).

4) Modeling refers to conceptual models that *describe* and manipulate the spatial characteristics of geographic phenomena. Reflectivity values of the image are converted into physically-based parameters or fragments through linear or nonlinear models, or both. The transformed parameters are easy to interpret, and it is also easy to extract information from the spectral signatures. Its disadvantage lies in the time spent and the difficulty of developing appropriate models to convert the reflectivity values of the image to biophysical parameters. It includes reflectance modeling used in Li-Strahler models, spectral mixing models and models for estimating biophysical parameters (Foresman *et al.*, 1997; López *et al.*, 2001; Allen and Lu, 2003; Deal and Schunk, 2004; Aguilera, 2006; Liu *et al.*, 2007; Molero *et al.*, 2007).

Another type of modeling is multicriteria analysis. These are processes that transform and combine spatial current-state data through decision rules to produce a desired-state result, which is based on weighting and compensation of variables that have a positive influence (suitable) or a negative one (impact) on the activity being decided upon. In addition to geographical information, it incorporates the value judgments (tastes and preferences) of the decision-makers (Paegelow *et al.*, 2003; Malczewski, 2004; Liu *et al.*, 2007).

Classification of methods according to the temporality of the information

1) Bitemporal analysis (pairwise comparisons) is a qualitative or quantitative analysis in which images from only two dates are used. This classification includes the following techniques: image differencing, image ratioing, regression differencing, change vector analysis (analysis between two images), and qualitative data (cross-tabulation and/or cross-classification) (Eastman, 2003).

2) Multitemporal analysis (multiple image comparisons) also features a qualitative or quantitative analysis of images, but, unlike the previous classification, they vary in the number of analysis dates used (more than two), and use statistical time series techniques for their analysis. This technique includes time series analysis, time series correlation, time profiling, image deviation and change vector analysis II (difference between two series) (Eastman, 2003).

3) Predictive Change Modeling (prediction of future changes) consists of techniques that determine the likelihood of change, where spatial prediction explains

sibles. Dentro de estas técnicas se incluyen las cadenas de probabilidad de análisis de Markov, autómatas celulares y análisis multicriterio (Eastman, 2003).

Clasificación de los métodos según el tipo de dato empleado

Se clasifican en datos continuos o categóricos. Las técnicas aplicables al análisis de datos continuos (numéricos) incluyen la estandarización de los números digitales mediante la calibración radiométrica, esto es, la conversión a radianza y posteriormente a reflectividad. Los datos categóricos se refieren al uso de mapas temáticos obtenidos de la clasificación de imágenes, ya sea supervisada mediante campos de entrenamiento o digitalización en monitor. La clasificación no supervisada es solamente un método exploratorio que apoya la aplicación de la clasificación supervisada. La Figura 1 presenta una visión integrada de los diferentes métodos de detección de cambios.

Incertidumbre en el estudio del cambio de uso del suelo

Toda base de datos geográficos presenta cierto grado de incertidumbre que depende principalmente de la calidad de insumos y de la metodología adoptada para su elaboración (Mas *et al.*, 2003). Por ello, resulta conveniente aplicar algún procedimiento de verificación que permita cuantificar el error y valorar la aplicación operativa de la información geoespacial en el estudio de cambio de uso del suelo (Jensen, 1996; Chuvieco, 2000). Los

the possible changes detected. Included among these techniques are Markov chain analysis, cellular automata and multicriteria analysis (Eastman, 2003).

Classification of methods according to the type of data used

They are classified as continuous or categorical data. The techniques applicable to the analysis of continuous data (numerical) include the standardization of digital numbers by radiometric calibration, i.e., conversion to radiance and then to reflectivity. Categorical data refers to the use of thematic maps obtained from image classification, either supervised through training sites or heads-up digitizing. Unsupervised classification is only an exploratory method that supports the application of supervised classification. Figure 1 shows an integrated view of the different change detection methods.

Uncertainty in the study of land-use change

Every geographic database presents some degree of uncertainty that is largely based on input quality and the methodology adopted for its preparation (Mas *et al.*, 2003). It is therefore appropriate to apply a verification procedure to quantify the error and assess the operational application of geospatial information in the study of land-use change (Jensen, 1996; Chuvieco, 2000). Errors contained in maps that are compared temporally are of two types: errors inherent to the attributes (cate-

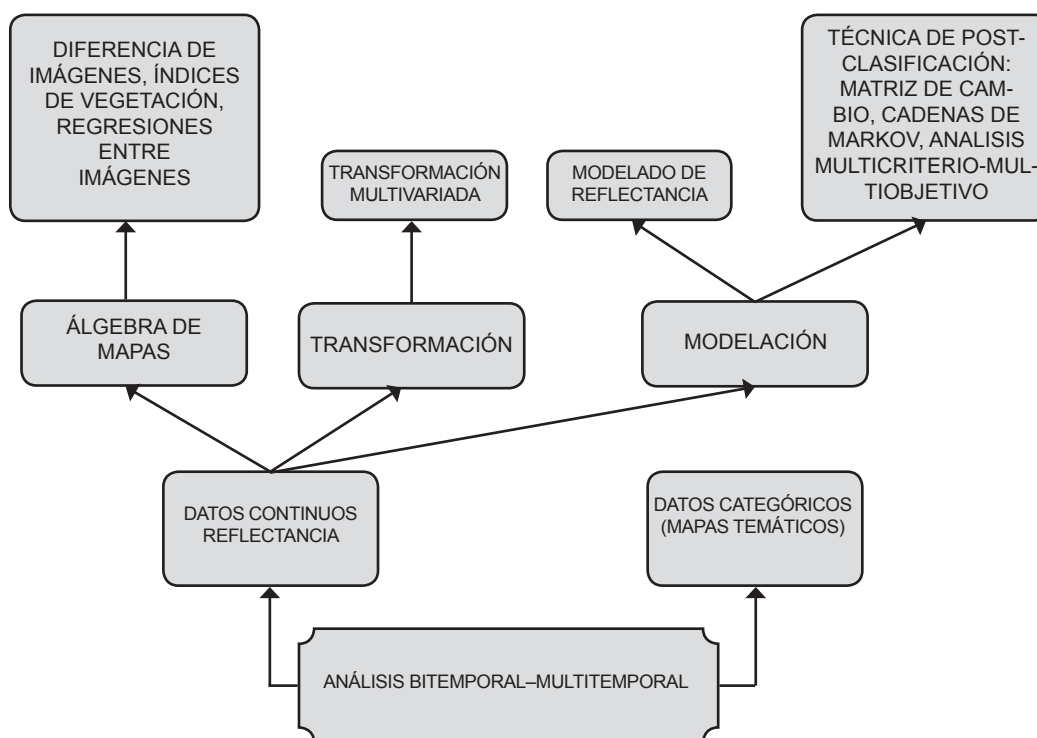


FIGURA 1. Técnicas de detección de cambio basadas en la teledetección. Fuente: Elaboración propia.

FIGURE 1. Change detection techniques based on remote sensing. Source: Authors.

errores contenidos en los mapas que se comparan temporalmente son de dos tipos: errores inherentes a los atributos (categóricos o continuos) y errores geométricos relacionados con la ubicación espacial de la información.

Los errores de los atributos se generan en una diversidad de formas, según la metodología empleada para su elaboración. Para el caso de métodos automatizados, su origen puede ser la deficiente separabilidad de clases en las firmas espectrales en una clasificación supervisada; mientras que para los métodos manuales como la fotointerpretación, podrá ser la escasa visibilidad del fotointérprete (debido a la resolución espacial de la imagen) o al vago conocimiento del área de estudio, lo que trae como consecuencia una deficiente asignación de etiquetas a los polígonos.

Por otra parte, los errores geométricos se generan por una deficiente georeferenciación de la información. Los mapas de un área de estudio determinada que van a ser comparados temporalmente deben coincidir espacialmente en la mayor medida posible; de lo contrario, los cambios detectados no corresponderán a la variación temporal del atributo de interés sino a una falta de correspondencia espacial (Chuvieco, 1998); es decir, se debe asegurar que tanto la zona como la variable que se compara sea la misma en ambas fechas consideradas (Chuvieco, 2008), por lo que es necesario conocer la confiabilidad de la base de datos empleada para evitar errores en el proceso de detección de cambios (Mas y Fernández, 2003), ya que el cuantificar la calidad del producto cartográfico generado permitirá valorar su ajuste con la realidad, y así asumir el riesgo en la toma de decisiones (Mas *et al.*, 2003).

Los resultados de las diferentes metodologías permiten evaluar los valores obtenidos. A mayor precisión, más adecuadamente se identificarán las áreas de cambio, por lo que la información generada presenta mayor validez (Coppin *et al.*, 2004; Lu *et al.*, 2004; Chuvieco, 2008).

Aplicaciones de los métodos de detección de cambio en el uso del suelo de áreas urbanas

Inicialmente la teledetección empleada para el análisis urbano no tenía gran aceptación en el área de la planificación, pero recientemente, con el desarrollo de la tecnología, se ha incrementado la aplicación de estos métodos en el análisis urbano (Treitz y Rogan, 2004), ya que actualmente la teledetección y los SIG presentan tecnologías que permiten la detección de cambios en este tipo de áreas en forma eficiente (Yang y Lo, 2002). Las áreas urbanas son generalmente caracterizadas por coberturas de superficies altamente heterogéneas (Yang y Lo, 2002), por lo que la interpretación y análisis en la teledetección representan cambios en las características espaciales y temporales de las superficies urbanas (Alberti *et al.*, 2004). A través del tiempo se han desarrollado diferentes métodos para la detección del

gorical or continuous) and geometric errors related to the spatial location of the information.

Attribute errors are generated in a variety of ways, according to the methodology used. In the case of automated methods, its origin may be poor class separability in the spectral signatures in a supervised classification, while for manual and photo-interpretation methods it may be the low visibility of the photointerpreter (due to the spatial resolution of the image) or vague knowledge of the study area, which results in poor polygon labeling.

On the other hand, geometric errors are generated by poor georeferencing of the information. Maps of a given study area that will be compared temporally must coincide spatially as much as possible; otherwise, the detected changes will not correspond to the temporal variation of the attribute of interest but to a lack of spatial correspondence (Chuvieco, 1998), i.e., one must be sure that both the area and the variable being compared are the same on both dates considered (Chuvieco, 2008); therefore, it is necessary to know the reliability of the database used to avoid errors in the change detection process (Mas and Fernández, 2003), since quantifying the quality of the mapping generated will allow assessing its fit with reality and thus assuming the risk involved in decision-making (Mas *et al.*, 2003).

The results of the different methodologies allow evaluating the values obtained. The greater the accuracy, the more accurately the areas of change will be identified, so the information generated has more validity (Coppin *et al.*, 2004; Lu *et al.*, 2004; Chuvieco, 2008).

Applications of land-use change detection methods in urban areas

Initially, the use of remote sensing for urban analysis was not widely accepted in the planning area, but recently, with the development of technology, the application of these methods in urban analysis has increased (Treitz and Rogan, 2004), as current remote sensing and GIS technologies enable detecting land-use changes in such areas in an efficient manner (Yang and Lo, 2002). Urban areas are generally characterized by highly heterogeneous land-covers (Yang and Lo, 2002), so that remote sensing interpretation and analysis are based on changes in spatial and temporal characteristics of urban areas (Alberti *et al.*, 2004). Over the years different methods have been developed for detecting land-use change, which have evolved in parallel with random sensing and have facilitated its application (Rogan and Chen, 2004). King *et al.* (1997) conducted a review of methods for detecting changes, while Foresman *et al.* (1997), Chuvieco (2000), Franklin (2001), Rogan

cambio de uso del suelo, los cuales han evolucionado paralelamente con la teledetección y han facilitado su aplicación (Rogan y Chen, 2004). King *et al.* (1999) realizaron una revisión de los métodos de detección de cambios, mientras que Foresman *et al.* (1997), Chuvieco (2000), Franklin (2001), Rogan y Chen (2004), Treitz y Rogan (2004) hacen una descripción de la evolución de los métodos de teledetección y análisis, los cuales dependen de los avances tecnológicos. Anteriormente los métodos de detección de cambios eran bitemporales, es decir, se comparaba la misma área en dos tiempos; en la actualidad los métodos se basan en el análisis de trayectoria temporal, donde se compara la misma área pero en diferentes intervalos de tiempo (Coppin *et al.*, 2004).

Afortunadamente se han probado varios métodos de detección de cambios en áreas urbanas que permiten señalar las transformaciones que ha experimentado la superficie (Yang y Lo, 2002). Azocar *et al.* (2003), en algunos trabajos desarrollados mediante el uso de SIG, índices de análisis espacial e implementación de fotografías aéreas, estudiaron la relación entre el crecimiento urbano y el crecimiento de la población. Por su parte, Herrera (2001) empleó imágenes de satélite a través de los SIG y Sistemas de Posicionamiento Global (GPS, siglas en inglés) para conocer los efectos de la intervención antropógena y la evolución en la ocupación del suelo.

A través del uso de imágenes de satélite y SIG, Yang y Lo (2002) identificaron áreas de cambio de cobertura y usos de suelo generados por el crecimiento urbano; por su parte, Aguilera (2006) generó dos modelos de crecimiento urbano usando fotografías aéreas y ortofotografías empleando un SIG y autómatas celulares. Asimismo, Paegelow *et al.* (2003) emplearon cadenas de Markov y evaluación multicriterio para conocer la dinámica del paisaje. Por su parte, Catalán *et al.* (2007), a través de fotografías aéreas y SIG, identificaron áreas de crecimiento urbano. Finalmente, Hunter *et al.* (2003) emplearon imágenes de satélite y fotografías aéreas ayudados de un SIG, para desarrollar modelos espaciales y estadísticos de escenarios futuros del crecimiento de la población y cambios de uso del suelo.

Los métodos de detección están basados en datos multi-temporales, multi-espectrales y en sensores satelitales que han demostrado gran potencial para detectar, identificar, cartografiar y monitorear los cambios de diferentes ecosistemas independientemente de sus agentes causales (Coppin *et al.*, 2004), por lo que es necesario emplear y comparar varias técnicas, algoritmos y análisis que permitan identificar las zonas exactas de detección (Congalton y Green, 1999) y así definir la mejor opción para la detección del cambio considerando las características físicas, sociales y económicas del lugar.

El Cuadro 1 muestra una clasificación de diferentes aplicaciones realizadas en el mundo sobre estudios de cambio de uso de suelo generados por el crecimiento de la población y la expansión de áreas urbanas, las cuales

and Chen (2004) and Treitz and Rogan (2004) described the evolution of random sensing methods and analysis, which depend on technological advances. Earlier change detection methods were bitemporal, i.e., comparing the same area at two times, whereas current methods are based on temporal trajectory analysis, which compares the same area but at different time intervals (Coppin *et al.*, 2004).

Fortunately, various change detection methods have been tried in urban areas, thereby identifying the changes that the area has undergone (Yang and Lo, 2002). Azocar *et al.* (2003), in some works developed by using GIS, spatial analysis indices and aerial photography, studied the relationship between urban growth and population growth. For his part, Herrera (2001) used satellite imagery through GIS and Global Positioning Systems (GPS) to determine the effects of anthropogenic intervention and the evolution in land use.

Through the use of satellite imagery and GIS, Yang and Lo (2002) identified areas that have undergone land-cover and land-use changes caused by urban growth; for his part, Aguilera (2006) generated two urban growth models using aerial photographs and orthophotos using GIS and cellular automata. Also, Paegelow *et al.* (2003) used Markov chains and multicriteria evaluation to determine landscape dynamics. Moreover, Catalán *et al.* (2007), using aerial photography and GIS, identified urban growth areas. Finally, Hunter *et al.* (2003) used satellite images and aerial photographs, aided by GIS, to develop spatial and statistical models of future population growth and land-use change scenarios.

Detection methods are based on multi-temporal/multi-spectral data and on satellite sensors that have shown great potential for detecting, identifying, mapping and monitoring changes in different ecosystems, regardless of their causative agents (Coppin *et al.*, 2004), making it necessary to use and compare various techniques, algorithms and analyses to identify the precise areas of detection (Congalton and Green, 1999) and thus identify the best option for change detection considering the physical, social and economic characteristics of the place.

Table 1 shows a classification of different applications used in the world to study land-use change caused by population growth and urban expansion. These methods mainly use map algebra, post-classification and modeling. The table also shows the advantages and disadvantages of each method.

Comparative analysis of methods for detecting land-use changes in urban areas

The challenge involved in using remote sensing to detect changes in urban areas has catalyzed the

han empleado principalmente el álgebra de mapas, la post-clasificación y modelación. Además, se muestran las ventajas y desventajas de cada método.

Análisis comparativo de los métodos de detección de cambios en el uso del suelo en áreas urbanas

El desafío de la teledetección para detectar cambios en áreas urbanas ha catalizado el desarrollo de técnicas más precisas para que dichos cambios coincidan con aplicaciones medioambientales (Coppin *et al.*, 2004). Estas aplicaciones son generadas como mecanismos de respuesta a la alta complejidad de los componentes

development of more precise techniques so that such changes coincide with environmental applications (Coppin *et al.*, 2004). These applications are generated as response mechanisms to the high complexity of urban components (Yagüe, 2002); however, often existing constraints affect decision-making, so that sound planning implies major future benefits (Chuvieco, 2008).

Land-use changes in urban areas can be monitored in a complimentary fashion by different methods at the same time, with positive results that allow detecting a wide range of changes (Coppin *et al.*, 2004).

CUADRO 1. Clasificación de métodos (detección y predicción) del cambio de uso del suelo, así como los datos requeridos, productos obtenidos, información relevante, ventajas y desventajas y referencia de cada uno.

Clasificación	Nombre del método usado	Requerimientos	Productos obtenidos	Información relevante	Ventajas	Desventajas	Referencias
Álgebra de mapas	SIG e índice de análisis espacial	Fotografías aéreas, cobertura de usos de suelo, zonas con hogares en diferente condición socioeconómica y densidad de población.	Obtención de tres patrones de crecimiento: Perímetro de cambio en la condición de no ciudad a ciudad, patrón por tipo de crecimiento y distribución, (anillos y agregación), y configuración de nuevos barrios residenciales o islas urbanas (llamado crecimiento "salto de rana").	Los patrones del crecimiento urbano conservan características de los modelos tradicionales (anillos radiales), aunque se han generado nuevas estructuras de dispersión y segregación del espacio urbano. No existen elementos urbanos que den continuidad a la ciudad, sino ciertos elementos estructurantes como barrera del crecimiento e integración urbana.	Cuantificación más precisa del cambio de superficie urbano. Análisis más detallado del cambio urbano.	Se requieren especialistas para la interpretación.	Azocar G., R. Sanhueza y C. Henríquez (2003).
	Comparación de mapas	Ortofotos, fotografías aéreas, datos de cobertura del suelo y estadísticas de población.	Mapas de coberturas de suelo y cambios de la cobertura del suelo urbano.	Las áreas metropolitanas son complejas y de gran importancia en el cambio de cobertura al considerar también los usos de tipo industrial y comercial.	Presenta gran exactitud y detalle de las áreas de cambio.	La detección de áreas extensas implica costos muy altos.	Catalán B., D. Saurí, PP. Serra (2006).
	SIG	Ortofotos digitales, base de datos espaciales de: parcelas, caminos, propiedades públicas y datos hidrológicos.	Áreas de desarrollo para diferentes distancias a partir del centro de desarrollo.	El análisis de múltiples escalas detalladas muestra una vista compleja del patrón de crecimiento. El crecimiento no es eventualmente distribuido entre las diferentes formas de crecimiento.	Presenta gran énfasis en la medición de las áreas de fragmentación y expansión urbana.	Falta reconstrucción detallada de los patrones de cambio. Cada área difiere las tendencias de cambio según la escala empleada.	Compas E. (2007).
SIG	Fotografías pancromáticas, digitales, aéreas y cartas topográficas	Creación de fotomapa, base de datos geográfica y mapa de cambios de áreas urbanas.	Los mosaicos cartográficos digitales son útiles para documentos cartográficos. Los desplazamientos de las fotografías nunca son iguales o similares, aunque se emplee la misma foto.	Presentan mayor exactitud cartográfica para registrar y cuantificar cambios en las áreas urbanas.	Presenta precisión sólo en áreas urbanas planas y se requiere de mucho tiempo para realizar el proceso de detección de cambio.	Romero H. D., J. López B. (2000).	

Continúa

Clasificación	Nombre del método usado	Datos requeridos	Productos obtenidos	Información relevante	Ventajas	Desventajas	Referencias
Álgebra de mapas	SIG	Mapas históricos, fotografías aéreas e imágenes de satélite.	Base de datos del cambio y uso del suelo.	Los datos dinámicos de un área urbana permiten evaluar los impactos en el ambiente para delimitar el crecimiento urbano.	Muestran los cambios urbanos en un periodo muy amplio.	Muestra la superficie de cambio pero no se observa el detalle.	USGS (1999).
	Diferencias de imágenes	Imágenes de satélite.	Mapas de cambios de uso de suelo.	Los cambios de uso urbano están determinados por las políticas del gobierno y por el espacio.	Detección, seguimiento y evaluación del cambio de uso del suelo en áreas periurbanas.	Resolución espacial pequeña por lo que el detalle y precisión es menor. Empleo de mayor tiempo por el tipo de proceso	Yagüe B. J. (2002).
	SIG	Imágenes de satélite y bases de datos digitales del uso del suelo.	Áreas de expansión urbana, por tipos de ocupación del suelo.	Expansión urbana afecta principalmente las áreas agrícolas.	Combina eficazmente la integración de imágenes de satélite para cartografiar y analizar los cambios urbanos.	Requiere varios especialistas porque combina diferentes áreas de conocimiento (suelo, teledetección y SIG).	Zhang X., J. Chen, M. Tan y Y Sun (2007).
Post-clasificación	Clasificaciones: supervisadas, no supervisadas y redes neuronales	Fotografías aéreas e imágenes de satélite de diferentes sensores.	Clasificación multitemporal.	La clasificación supervisada muestran claramente las posibilidades y limitantes del crecimiento.	Presenta mejor interpretación visual y rapidez las ortofotos.	La visualización de las imágenes depende de su resolución.	Herrera V. (2001).
	Clasificación no supervisada	Imágenes de satélite.	Cartografía de fragmentación forestal y expansión urbana.	Análisis de correlación en la identificación en los cambios de cobertura.	Proporciona áreas de cambio generadas por el desarrollo urbano sobre el bosque.	El detalle de la detección depende de la escala empleada.	Hurd J. D., E. Hoffhine W., Steven G. Lammey y D. L. Civco (2001).
	Clasificación supervisada y comparación de imágenes	Imágenes de satélite.	Imagen de áreas estables y dinámicas de la cobertura del suelo.	El uso del suelo está condicionado por el crecimiento urbano y a los usos no agrícolas. Presenta mayor concentración de la urbanización en áreas planas.	Las imágenes de satélite con tratamiento digital generan imágenes categorizadas para obtener la detección de cambio de uso del suelo urbano.	Se requiere conocimiento previo en el uso de imágenes de satélite y técnicas estadísticas.	Molina M. G. Z. (2005).
	Post-clasificación y SIG	Imágenes Landsat MSS y TM.	Mapa de uso y cobertura del suelo de densidad urbana y mapas de cambios de uso y cobertura del suelo del área urbana.	Los sensores remotos permiten una vista retrospectiva de grandes regiones y proveen información geográfica y temporal de las áreas urbanas.	Las áreas de cambio presentan gran exactitud y compatibilidad.	Es necesario aplicar varios procedimientos para eliminar errores de confusión de límites espectrales.	Yang X. y C. P. Lo (2002).

Continúa

Clasificación	Nombre del método usado	Requerimientos	Productos obtenidos	Información relevante	Ventajas	Desventajas	Referencias
Modelación	Autómatas celulares	Base de información geográfica y socioeconómica.	Diferentes escenarios de crecimiento con alta y baja densidad de población.	Considera factores económicos y fiscales en el dominio de los escenarios de crecimiento.	El modelado espacial y dinámico es adecuado para modelar la dinámica urbana.	La utilización del suelo cambia las decisiones a nivel individual. El modelo final es determinado por los costos y la alta y baja densidad.	Deal B. y D. Schunk (2004)
	SIG y series de tiempo	Base de información geográfica y cronológica de usos de suelo, datos de censos e imágenes de satélite y parámetros ambientales.	Mapas de transformación de suelo inducido por el hombre.	Aplica tres formas de análisis: Central, cartografía histórica y análisis de gradientes, para datos espaciales y temporales relacionados con ecosistemas urbanos.	Los mapas empleados determinan la tendencia de la urbanización. La modelación contempla aspectos ecológicos, sociales e hidrológicos.	Las escalas empleadas determinan los patrones y funciones a emplear en el modelo.	Foresman T., S. T. A. Pickett y W. C. Zipperer (1997)
	Análisis multicriterio y SIG	Imágenes de satélite, información cartográfica de uso de suelo, geológicos, sistemas de agua, distribución de la vegetación, datos ambientales, ecológicos y socioeconómicos.	Dos escenarios de predicción de cambio: a) rápido crecimiento de uso residencial, industrial y público, b) aumento del valor a la agricultura, turismo y comercio.	Análisis sistemático de modelación dinámica para conservar ecosistemas acuáticos, desarrollado para proveer estrategias de manejo en balance con la expansión urbana.	Determina la variación del potencial de ocupación del suelo. Modela una estructura jerárquica de la ocupación del suelo.	Se requiere de más de un método para obtener resultados óptimos.	Liu Y., X. Lv, H. Guo, Y. Yu, J. Wang y G. Mao (2007)
	SIG, Cadenas de Markov y análisis de regresión	Fotografías aéreas, imagen digital, información cartográfica (topografía, geología, edafología e información demográfica).	Cartografía: Cambio de cobertura y uso del suelo, y predicción del cambio. Matrices de Markov.	El modelo de Markov presenta bajo nivel en la predicción de cambio con respecto a las regresiones lineales.	El modelo de predicción puede ser extrapolado a áreas similares caracterizadas por el crecimiento urbano y cambio de cobertura.	El crecimiento de la población no produce necesariamente un incremento en el área urbana.	López G. E. M., G. Bocco y M. E. Mendoza Cantú (2001)
	Método de evaluación multicriterio	Base de datos cartográfica de variables ambientales y antrópicas. Criterios de aptitud e impacto.	Cartografía de diferentes factores y del crecimiento urbano. Modelo cartográfico y de escenario de aptitud para urbanización.	Los patrones de crecimiento interanual, continuo y logístico. Las proyecciones de la población se basan en las tasas históricas.	Determina la trayectoria de los asentamientos humanos.	Se requiere actualizar los patrones de cambio.	Molero M. E., A. L. Grindlay M. y J. J. Asensio R. (2007)

Continúa

Clasificación	Nombre del método usado	Requerimientos	Productos obtenidos	Información relevante	Ventajas	Desventajas	Referencias
Transformación	Clasificaciones, técnicas estadísticas multivariadas y modelación	Base de datos cartográfica de límites municipales, caminos, vías férreas, topografía e imágenes de satélite.	Cartografía de la clasificación de imágenes, crecimiento de la población y densidad de clases de uso.	Los sensores remotos y los SIG son técnicas empleadas en monitorear y modelar un fenómeno dinámico. La expansión urbana es un fenómeno dinámico y la predicción futura es un gran cambio que es cuantificado.	Cuantificación de la entropía expansión urbana, mediante la selección de bandas adecuadas.	Las firmas pueden representar una gama estrecha de los valores de reflectividad.	Kumar J. M., P. K. Garg y D. Khare (2007).
	Técnicas de transformación espectral (Análisis discriminativo canónico) y análisis de componentes	Imágenes de satélite.	Imágenes de componentes transformadas usando análisis de componentes principales e imágenes de componentes transformados usando análisis discriminativo canónico.	El valor de la variación del ruido esta asociado con la técnica empleada y a los datos satelitales.	La exactitud de los índices de kappa es superior mediante el empleo de imágenes transformadas.	Requiere de mucho tiempo para identificar las variables independientes que generan la máxima separabilidad.	Zhao G. y A. L. Maclean (2000).
Modelación	Modelos de predicción: Regresión logística y autómatas celulares	Fotografías aéreas, ortofotos, base de datos cartográfica de variables de distancia y tiempo.	Modelos de crecimiento: con regresión logística, mayor correlación con la variable de distancia a zonas urbanas. Con autómatas celulares valores altos de correlación con todas las variables.	Contradicción al no haber correlación con las áreas destinadas para urbanización. Mayor confiabilidad en la cartografía generada por autómatas celulares.	Regresión logística determina las relaciones funcionales entre variables. Los autómatas celulares y la regresión logística son capaces de predecir alternativas de urbanización.	Los modelos estadísticos no son totalmente adecuados en el análisis de similitudes.	Aguilera B. (2006).
	Estructura logística binomial	Imágenes de satélite, datos espaciales y características específicas del sitio: Población y tasa de crecimiento.	Se genera un modelo regional moderado en la predicción de áreas urbanas.	El modelo logístico es poco preciso en la proyección de escenarios futuros.	Predice las probabilidades de transición de cambio de uso del suelo y simula el crecimiento urbano. El modelo logístico es estáticamente confiable a corto plazo.	Es necesario emplear varios modelos para realizar una predicción a largo plazo.	Allen J. y K. Lu (2003).

Fuente: Elaboración propia.

TABLE 1. Classification of methods of detecting and predicting land-use change, as well as the required data, products obtained, relevant information, advantages and disadvantages and references for each one.

Clasificación	Nombre del método usado	Requerimientos	Products obtained	Relevant information	Advantages	Disadvantages	References
Álgebra de mapas	SIG e índice de análisis espacial	Aerial photographs, land-use cover, areas with different socioeconomic-status households and population density.	Three growth patterns obtained: Wildland-urban interface, pattern by type of growth and distribution (rings and aggregation), and configuration of new residential neighborhoods or urban islands (called "leaf frog" growth).	Urban growth patterns preserve features of traditional models (radial rings), but generate new structures: dispersion and segregation of urban space. There are no urban elements to provide continuity to the city, but certain structural elements such as growth barrier and urban integration.	More accurate quantification of urban land change. More detailed analysis of urban change.	Specialists are required for interpretation.	Azocar G., R. Sanhueza and C. Henríquez (2003).
	Comparación de mapas	Orthophotos, aerial photographs, land-cover data and population statistics.	Urban land-cover and land-cover change maps.	Metropolitan areas are complex and very important in cover change when also considering industrial and commercial uses.	Provides high accuracy and detail of the areas of change.	Detection of large areas involves very high costs.	Catalán B., D. Saurí, PP. Serra (2006).
	SIG	Digital orthophotos, spatial database of: plots, roads, public properties and hydrological data.	Development areas for different distances from the center of development.	The analysis of multiple detailed scales shows a complex view of the growth pattern. The growth is not eventually distributed among the different growth forms.	Features a strong emphasis on measuring areas of fragmentation and urban sprawl.	Lacks detailed reconstruction of change patterns. dChange trends differ in each area based on the scale used.	Compas E. (2007).
	SIG	Panchromatic, digital and aerial photographs, plus topographic maps.	Creation of a photomap, geographic database and a map showing changes in urban areas.	The digital cartographic mosaics are useful for cartographic documents. The displacements of the photographs are never the same or similar, but use the same photo.	Provides greater map accuracy to record and quantify changes in urban areas.	Provides accuracy only in flat urban areas and performing the change detection process is time consuming.	Romero H. D., J. López B. (2000).

Continues

urbanos (Yagüe, 2002); sin embargo, en muchas ocasiones las limitaciones existentes afectan la toma de decisiones, por lo que una planificación acertada supone a futuro grandes beneficios (Chuvieco, 2008).

Los cambios en el uso de suelo de áreas urbanas pueden ser monitoreados en forma complementaria por diferentes métodos a la vez, con resultados positivos que permiten detectar una amplia gama de cambios (Coppin *et al.*, 2004).

Mediante el análisis detallado de los estudios de

Through detailed analysis of change detection studies reviewed in the literature, it is clear that the selection of an appropriate change detection method is complex (Coppin *et al.*, 2004), but there are basic elements that any suitable technique for detecting land-use change in urban areas must provide: 1) range and areas of land-use change; 2) spatial distribution of the types of change; 3) trajectory of land-cover changes; and 4) assessment of the accuracy of the change detection results (Liu *et al.*, 2007). However, different methods of detection, modeling and projection of land-use changes

Classification	Name of method used	Data required	Products obtained	Relevant information	Advantages	Disadvantages	References
Map algebra	SIG	Historical maps, aerial photographs and satellite images.	Database of land use and change.	Dynamic data of an urban area allows assessing impacts on the environment to delimit urban growth.	They show urban changes over a long period.	Shows the change area but not in detail.	USGS (1999).
	Image differencing	Satellite images.	Maps of land-use changes.	Urban land-use changes are determined by government policies and space.	Detection, monitoring and evaluation of land-use change in peri-urban areas.	Small spatial resolution so the detail and accuracy is lower. More time used for the type of process.	Yagüe B. J. (2002).
	SIG	Satellite images and digital land-use databases.	Urban expansion areas by type of land use.	Urban sprawl mainly affects agricultural areas.	Effectively combines the integration of satellite imagery for mapping and analyzing urban change.	Requires various specialists because it combines different knowledge areas (land-use planning, remote sensing and GIS).	Zhang X., J. Chen, M. Tan and Y Sun (2007).
Post-classification	Classifications: supervised, unsupervised, and neural networks	Aerial photographs and satellite images from different sensors.	Multi-temporal classification.	Supervised classification clearly shows growth possibilities and limitations.	Features better visual interpretation and speed of orthophotos.	How images are displayed depends on their resolution.	Herrera V. (2001).
	Unsupervised classification	Satellite images.	Mapping of forest fragmentation and urban sprawl.	Correlation analysis to identify land-cover changes.	Provides areas of change generated in forest areas by urban development.	Detection detail depends on the scale used.	Hurd J. D., E. Hoffine W., Steven G. Lammey and D. L. Civco (2001).
	Supervised classification and image comparison	Satellite images.	Image of stable and dynamic land-cover areas.	Land use is conditioned by urban growth and non-agricultural uses. Presents greater concentration of urbanization in flat areas.	Digitally-treated satellite images generate categorized images for detecting urban land-use change.	Prior knowledge of the use of satellite images and statistical techniques required.	Molina M. G. Z. (2005).
	Post-classification and GIS	Landsat MSS and TM images.	Land-use and cover map of urban density and maps of land-use and cover changes in urban area.	Remote sensing allows a retrospective view of large regions and provides geographical and temporal information of urban areas.	The areas of change have high accuracy and compatibility.	Various procedures must be applied to eliminate confusion errors related to spectral limits.	Yang X. and C. P. Lo (2002).

Continues

Classification	Name of method used	Requirements	Products obtained	Relevant information	Advantages	Disadvantages	References
Modeling	Cellular automata	Geographic and socioeconomic information base.	Different growth scenarios with high and low population density.	Economic and fiscal factors considered in the domain of growth scenarios.	Dynamic spatial modeling is suitable for modeling urban dynamics.	Land use changes decisions at the individual level. The final model is determined by costs and low and high density.	Deal B. and D. Schunk (2004)
	GIS and time series	Geographic and chronological land-use information base, census and satellite imagery data and environmental parameters.	Maps of land transformation induced by man.	Applies three forms of analysis: Central, historical maps and gradient analysis for spatial and temporal data related to urban ecosystems.	Maps used determine the trend of urbanization. Modeling takes into account ecological, social and hydrological values.	The scales used determine the patterns and functions to be used in the model.	Foresman T., S. T. A. Pickett and W. C. Zipperer (1997)
	Multicriteria analysis and GIS	Satellite images and mapping showing land use, geological elements, water systems, vegetation distribution, and environmental, ecological and socioeconomic data.	Two change prediction scenarios: a) rapid growth of residential, industrial and public uses, b) increased value for agriculture, tourism and commerce.	Systematic analysis of dynamic modeling to conserve aquatic ecosystems, developed to provide management strategies in balance with urban sprawl.	Determines the variation of land-use potential. Models a hierarchical land-use structure.	More than one method is needed for optimal results.	Liu Y., X. Lv, H. Guo, Y. Yu, J. Wang and G. Mao (2007)
	GIS, Markov chains and regression analysis	Aerial photography, digital imaging, and mapping information (topography, geology, soil science, and demographics).	Mapping: Land-cover and use change, and prediction of change. Markov matrices.	The Markov model has a low change-prediction level with respect to linear regressions.	The prediction model can be extrapolated to similar areas characterized by urban growth and land-cover change.	Population growth does not necessarily produce an increase in urban area.	López G. E. M., G. Bocco and M. E. Mendoza Cantú (2001)
	Multicriteria evaluation method	Cartographic database of environmental and anthropogenic variables. Suitability and impact criteria.	Mapping of different factors and urban growth. Mapping and suitability scenario for urbanization model.	The growth patterns relate to interannual, continuous and logistic growth. Population projections are based on historical rates.	Determines the trajectory of human settlements.	Updating of change patterns is required.	Molero M. E., A. L. Grindlay M. and J. J. Asensio R. (2007)

Continues

Classification	Name of method used	Requirements	Products obtained	Relevant information	Advantages	Disadvantages	References
Transformation	Classifications, multivariate statistical techniques and modeling	Cartographic database of municipal boundaries, roads, railways, topography and satellite imagery.	Mapping of image classification, population growth and density of land-use classes.	Remote sensing and GIS are techniques used in monitoring and modeling a dynamic phenomenon. Urban sprawl is a dynamic phenomenon and future prediction is a major change that is quantified.	Quantification of entropy value of urban sprawl by selecting appropriate bands.	Signatures may represent a narrow range of reflectivity values.	Kumar J. M., P. K. Garg y D. Khare (2007).
	Spectral transformation techniques (Canonical discriminant analysis) and components analysis	Satellite images.	Component images transformed using principal components analysis and component images transformed using canonical discriminant analysis.	The noise variance value is associated with the technique used and satellite data.	Accuracy of kappa indices is higher through the use of transformed images.	Time consuming to identify independent variables that generate maximum separability..	Zhao G. y A. L. Maclean (2000).
Modeling	Prediction models: logistic regression and cellular automata	Aerial photographs, orthophotos, cartographic database of distance and time variables.	Growth models: with logistic regression, higher correlation with the variable distance to urban areas. With cellular automata, high correlation values with all variables.	Contradiction by not having correlation with the areas designated for urbanization. Greater reliability in mapping generated by cellular automata.	Cellular automata and logistic regression are able to predict urbanization alternatives.	The statistical models are not fully adequate in the analysis of similarities.	Aguilera B. (2006).
	Binominal logistic structure	Satellite images, spatial data and site-specific characteristics: Population and growth rate.	A moderate regional model is generated in the prediction of urban areas.	The logistic model is not precise in the projection of future scenarios.	Predicts the transition probabilities of land-use change and simulates urban growth. The logistic model is statistically reliable short term.	Several models are needed to make a long-term prediction.	Allen J. y K. Lu (2003).

Source: Authors.

detección de cambios revisados de la literatura, se observa que la elección de un método de detección de cambio apropiado es complejo (Coppin *et al.*, 2004); sin embargo, existen elementos básicos que toda técnica idónea de detección de cambio de uso del suelo en áreas urbanas debe proporcionar: 1) rango y áreas de cambio; 2) distribución espacial de los tipos de cambio; 3) trayectoria de los cambios de cobertura del suelo; y 4) la valoración de la exactitud de los resultados en la detección del cambio (Liu *et al.*, 2007). No obstante, los diferentes métodos de detección, modelación y proyección de los cambios de uso del suelo tienen sus propios méritos, y ningún procedimiento es óptimo y aplicable a todos los casos (Liu *et al.*, 2007).

El uso de estas técnicas depende del detalle que se requiera en el análisis y del costo de su implementación. Procesos con poco detalle suelen tener bajos costos y éstos se incrementan con el mismo (Chuvienco, 2008). Otros factores que determinan el método a utilizar son: la información con la que se cuenta, el propósito del trabajo y de los recursos disponibles. Si el enfoque está orientado a evaluar lo que ha pasado con cada clase de vegetación o uso de suelo, el método ideal es la matriz de cambios construida con mapas temáticos elaborados previamente, ya sea con clasificación supervisada o digitalización en monitor (Romero y López, 2000). Si se desea predecir los cambios por clase temática dentro de las alternativas existentes, se sugiere: 1) cadenas de Markov para el cálculo de la matriz de probabilidades de transición, elaboración de mapas de aptitud para cada clase y mapeo espacial de dichas proyecciones en un periodo de tiempo determinado mediante autómatas celulares (López *et al.*, 2001; Paegelow *et al.*, 2003); y 2) la evaluación multicriterio, que más que una predicción de lo que pasará con el uso de suelo, se refiere al uso óptimo deseable del espacio con base en diferentes criterios de optimización y ponderación de los factores empleados. Si el enfoque deseado es hacer una estimación numérica del cambio con fines cuantitativos a nivel píxel, por ejemplo, evaluar la dinámica espacio-temporal de la biomasa o combustibles, el estudio fenológico de alguna especie vegetal o la medición de la temperatura de las áreas urbanas, es conveniente el empleo de métodos orientados a datos numéricos donde la calibración radiométrica, la selección de un umbral de cambio significativo y la medición de la información en campo son imprescindibles.

CONCLUSIONES

El método a utilizar para analizar la dinámica de cambio de uso del suelo generada por el crecimiento urbano depende del conocimiento, capacitación y habilidad del analista sobre los métodos de detección de cambios existentes y de los datos de la imagen utiliza-

have their own merits, and no procedure is optimal and applicable to all cases (Liu *et al.*, 2007).

The use of these techniques depends on the detail required in the analysis and the implementation cost. Processes with little detail often have low costs, which increase as the amount of detail increases (Chuvienco, 2008). Other factors that determine the method to use are: the information one has, the purpose of the work and the resources available. If the focus is to evaluate what has happened to every vegetation class or land use, the ideal method is the change matrix constructed with thematic maps previously made, either with supervised classification or heads-up digitizing (Romero and López, 2000). If one wants to forecast changes by thematic class within the existing alternatives, it is advisable to: 1) use Markov chains to calculate the transition probability matrix, make suitability maps for each class and create spatial mapping of these projections in a given time period by cellular automata (López *et al.*, 2001; Paegelow *et al.*, 2003); and 2) use multi-criteria evaluation which, rather than a prediction of what will happen in terms of land use, refers to the desirable optimum use of space based on different optimization criteria and weighting of the factors used. If the desired approach is to make a numerical estimate of change with pixel-level quantitative purposes, for example, assessing the space-temporal dynamics of biomass or fuels, conducting a phenological study of some plant species or measuring the temperature of urban areas, it is advisable to use numerical data-oriented methods where radiometric calibration, selection of a significant-change threshold and measurement of information in the field are essential.

CONCLUSIONS

The method used to analyze the dynamics of land-use change caused by urban growth depends on the knowledge, training and skill of the analyst in the existing change detection methods and the data of the image used, plus the characteristics of the study area. In addition, the choice of technique depends on the aspect to assess, the quality of information sought and the cost of implementation. Therefore, no method is applicable to all case studies, but the use of one or more of them is essential so that the governing authority and decision-makers can determine the extent of the changes recorded, assess the risks involved and, if possible, identify the agents causing the change for land planning follow-up purposes.

da, así como de las características del área de estudio. Adicionalmente, la selección de la técnica dependerá del aspecto a evaluar, de la calidad de información a generar y del costo de implementación. Por lo tanto, ningún método es aplicable para todos los casos de estudio, pero sí es imprescindible el empleo de uno o varios de ellos para que la autoridad y los tomadores de decisiones puedan conocer el alcance de los cambios registrados, los riesgos que ello implica y, de ser posible identificar los agentes que causan el cambio con fines de seguimiento de la planificación territorial.

LITERATURA CITADA

- Aguilera, B. F. (2006). Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares. *GeoFocus* (6),81-112.
- Alberti, M., Robin W. & Stefan C. (2004). Urban land-cover change analysis in central Puget sound. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 70(9),1043-1052.
- Allen, J. & Lu K. 2003. Modeling and prediction of future urban growth in the Charles region of South Carolina: A GIS-based integrated approach. *Conservation Ecology* 8 (2),20.
- Azocar, G., Sanhueza, R. & Henriquez, C. (2003). Cambio en los patrones de crecimiento en una ciudad intermedia: El caso de Chillán en Chile Central. *Revista Eure*. XXIX 87,79-92.
- Catalan, B., Sauri, D. & Serra P. (2007). Urban sprawl in the Mediterranean? Patterns of growth and change in the Barcelona metropolitan region 1993-2000. *Landscape and Urban Planning*.
- Chuvieco, E. (1998). El factor de temporalidad en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. *Revista de Teledetección* 10,1-9.
- Chuvieco, E. (2000). *Fundamentos de teledetección espacial*. Alcalá-Madrid. España. Ediciones Rialp.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio*. 3ª ed. Barcelona España. Editorial Ariel S. A.
- Compas, E. (2007). Measuring exurban change in the American west: a case study in Gallatin county, Montana, 1973-2004. *Landscape and Urban Planning* 82,56-65.
- Congalton, G. & Green, K. 1999. *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. New York. USA: Ed. Lewis Publishers.
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B. K. & Lambin, E. (2004). Digital change detection methods in ecosystem monitoring: A review. *Int. J. Remote Sens* 25(9),1565-1596.
- Deal, B. & Schunk. (2004). Spatial dynamic modeling and urban land use transformation: A simulation approach to assessing the costs of urban sprawl. *Ecological Economics* 5,9-95.
- Eastman, R. (2003). *Guide to GIS and image processing. Kilimanjaro Tutorial*. USA. Clark Labs.
- Foresman, T. W., Pickett T. T. A. & Zipper W. C. (1997). Methods for spatial and temporal land use and land cover assessment for urban ecosystem and application in the greater Baltimore-Chesapeake region. *Urban Ecosystem* 1,201-216.
- Franklin, S. 2001. *Remote sensing for sustainable forest management*. United States of America. Lewis Publishers.
- Gómez, O. D. (2001). *Ordenación territorial*. España. Ediciones Mundi-Prensa.
- Herrera, V. (2001). Estudio del crecimiento urbano de la ciudad de Valdivia (Chile) a través del uso integrado de imágenes de satélite, SIG, y equipos GPS. *Revista de Teledetección* 15,1-9.
- Hunter, L. M., Gonzalez, G. M. de J., Stevenson M., Karish, K. S., Toth, R., Edwards, T. C., Lillieholm, R. J. & CABLK, M. (2003). Population and land use change in the California Mojave: Natural habitat implications of alternative futures. *Population Research and Policy Review* 22,373-397.
- Hurd, J. D., Hoffhine, W. E., Lammey S. G. & Civco D. L. (2001). Characterization of forest fragmentation and urban sprawl using time sequential Landsat imagery. *ASPRS Annual Convention*. Annual Convention, St. Lous. MO.
- Jensen, J. R. (1996). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective*. United States of America: Prentice Hall.
- King, M. D., Kaufaman, Y. J., Tanré, D. & Nakajima, T. (1999). Remote Sensing of Tropospheric Aerosols from space: past, present and future. *Bulletin of the American Meteorological Society* 11(80), 2229- 2259.
- Kunmar, J. M., Garg, P. K. & Khare, D. (2007). Monitoring and modelling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of applied Earth Observation and Geoinformation* 10,26-43.
- Lasaponara, R. (2005). On the use of principal component analysis (PCA) for evaluating interannual vegetation anomalies from spot/vegetation NDVI temporal series. *Ecological Modelling* 4229,1-6.
- Liu, Y., Lv, X., Qin, X., Guo H., Yu Y., Wang J. & Mao G. (2007). An integrated GIS-based analysis system for land-use management to lake areas in urban fridge. *Landscape and urban planning* 82,233-246.
- López, G. E. M., Bocco G. & Mendoza C. M. E. (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.
- Lu, D., Mausel P., Brondizio, E., Moran, E. (2004). Change Detection Techniques. *International Journal of Remote Sensing* 25(12):2365-2407.
- Malczewski, J. (2004). GIS-bases land use suitability analysis: A critical overview. *Progress in Planning* 62,3-65.
- Mas, J. F. (1999). Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. *Int. J. Remote Sens* 20(1),139-152.
- Mas, J. F., Dias, G. J. R., Pérez V. A. (2003). Evaluación de la confiabilidad de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 51,53-72.
- Mas, J. F., Fernandez T. (2003). Una evaluación cuantitativa de los errores en el monitoreo de los cambios de cobertura por comparación de mapas. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 51,73-87.
- Molero, M. E., Grindlay, M. A. L. & Asencio R. J. J. (2007). Escenarios de aptitud y modelación cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio.

- GeoFocus* 7,120-147.
- Molina, M. G. Z. (2005). Propuesta metodológica para estudios de dinámica de uso urbano utilizando teledetección: Macaray, estado Aragua-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana* 46(2), 195-234.
- Paegelow, M., Camacho, M. T. & Menos T. J. (2003). Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelación prospectiva del paisaje. *GeoFocus* 3,22-44.
- Rogan, J., Chen, D. M. (2004). Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change. *Progress in Planning* 61,301-325.
- Romero H. D. & López B. J. 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 del Instituto de Geografía UNAM.* 42,48-66.
- Treitz, P. & Rogan J. (2004). Remote sensing for mapping and monitoring land-cover and land-use change: an introduction. *Progress in Planning* 61,269-279.
- Universidad de Calgary. 2006. *Ingeniería Geomática*. Departamento de Ingeniería Geomática. Disponible en: <http://www.geomatics.ucalgary.ca/about/whatis>.
- USGS Science for a changing World. (1999). *Analyzing land use change in urban environments*. USGS. U. S. Geological Survey.
- Yague, B. J. (2002). Teledetección y transformación de territoriales en el sur-este de Madrid en el cambio de siglo (1999-2001). *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*. Volumen extraordinario: 519-530.
- Yang, X. & Lo C. P. (2002). Using a time series of satellite imagery to detect land use and land cover changes in the Atlanta, Georgia metropolitan area. *Int. J. Remote Sens* 23(9),1775-1798.
- Zhang, X., Chen J., Tan, M. & Sun, Y. (2007). Assessing the impact of urban sprawl on soil resources of Nanjing city using satellite images and digital soil databases. *Catena* 69,16-30.
- Zhao, G., Maclean, A. L. (2000). Principal component analysis for spectral transformation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 66(7), 841-847.