

Pascual Rosa, V., Aguilera Benavente, F., Plata, W., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2010): Simulación de modelos de crecimiento urbano: métodos de comparación con los mapas reales. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 1.000-1.013. ISBN: 978-84-472-1294-1

SIMULACIÓN DE MODELOS DE CRECIMIENTO URBANO: MÉTODOS DE COMPARACIÓN CON LOS MAPAS REALES

Verónica Pascual Rosa¹, Francisco Aguilera Benavente², Wenseslao Plata³, Montserrat Gómez Delgado¹, y Joaquín Bosque Sendra¹

(1) Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá. C/Colegios nº2, 28801, Alcalá de Henares, Madrid. E-mail: veronica.pascual@uah.es, Montserrat.gomez@uah.es y Joaquin.bosque@uah.es

(2) Laboratorio de Planificación Ambiental. Universidad de Granada. Campus de Fuente Nueva, Edificio Politécnico s/n, 18071 Granada. E-mail: franab@ugr.es

(3) Escuela de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Sinaloa. Av. De Las Américas y Blvd. Universitarios. CP. 80 000. Culiacán, Sinaloa, México. E-mail: wenseslao.plata@alu.uah.es

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es realizar un ensayo metodológico para intentar reproducir el proceso de crecimiento urbano, industrial y comercial producido en la Comunidad de Madrid de 1990 a 2000 mediante las técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) y Autómatas Celulares (AC) y comparar los resultados de ambas técnicas con la realidad del año 2000.

Utilizando como base cartográfica del crecimiento urbano la cobertura de usos del suelo, el Corine Land Cover, para los años 1990 y 2000, se construyó una base de datos cartográfica de la zona de estudio que incluye distintos factores, tanto ambientales como sociales, que fueron empleados, en anteriores estudios, en la fase de análisis como posibles variables explicativas del crecimiento urbano.

Después con estos factores, una vez espacializados y normalizados se construyeron dos modelos que intentan reproducir las lógicas de crecimiento urbano ocurridas en el pasado. Un primer modelo basado en Autómatas Celulares y un segundo modelo basado en la Evaluación Multicriterio

Los resultados obtenidos han permitido valorar la idoneidad de estas técnicas para la realización de simulaciones de tipo exploratorio y/o normativo. Para su comparación con la realidad se han utilizado diversos procedimientos como VALIDATE de IDRISI, comparación de distribución de frecuencias y localización aproximada. Siendo el modelo basado en EMC el que mejores resultados refleja.

Palabras Clave: Crecimiento urbano, simulación, Autómatas Celulares, Evaluación Multicriterio, comparación de mapas.

ABSTRACT

This paper presents a methodological attempt to simulate urban growth in the Madrid Metropolitan Area

between 1990 and 2000 using Cellular Automata (CA) and Multicriteria Assessment methods (MCE). The results obtained with both models have been then compared with the real growth experimented.

First, we have built a spatial database including CORINE LandCover maps for 1990 and 2000. This database also includes maps for environmental and social variables used as explanatory variables to simulate urban growth.

Secondly, a CA-based model and a Multicriteria model have been developed to simulate urban growth on the basis of the past urban dynamics.

Finally, the simulations obtained have been compared with the real urban growth using several approaches including the VALIDATE command in IDRISI. The results of this comparison show a higher correspondence of the results simulated with the MCE methods.

Key Words: Urban Growth, simulation, Cellular automata, Multicriteria evaluation, maps comparison

INTRODUCCIÓN

Comparada con la Unión Europea, España ha tenido uno de los mayores ritmos de artificialización de suelo, con un incremento de un 29,5% frente al 5,4% de Europa en el periodo 1987-2000. Los mayores aumentos se han producido en la costa mediterránea, a lo largo de las infraestructuras y en las grandes áreas metropolitanas (OSE, 2008).

Adentrándonos un poco más en España en cuanto al aumento de suelo residencial, para el mismo periodo 87-00, es la provincia de Madrid la que presenta cambios más significativos.

Muchos de los cambios en la ocupación del territorio que ello supone se pueden considerar irreversibles, y su impacto varía enormemente en función de la forma de ocupación o patrón que presente, ya sea por el consumo de suelo el consumo de energía y eficiencia del transporte, la fragmentación de los paisajes naturales o agrarios sobre los que se produce, y las posibilidades de interacción e intercambio social y cultural que genera (Rueda).

Si la forma de ocupación del territorio tiene dichas consecuencias para tan importantes aspectos en relación con la sostenibilidad, la habitabilidad, la sociedad en general, etc., el hecho de poder contar con herramientas que simulen la tendencia en la edificabilidad, ya sea para uso urbano como industrial o comercial, es útil para conocer hacia donde nos dirigimos sobre todo en este contexto en el que los cambios acontecen a gran velocidad.

El uso de modelos de simulación de diverso tipo para estudiar el crecimiento urbano se ha convertido en algo habitual. Se emplean para ello modelos muy diferentes, por ejemplo basados en la aplicación de los autómatas celulares, o en las técnicas de evaluación multicriterio.

El objetivo de este trabajo es doble, por un lado, comparar las capacidades de estas dos técnicas en cuanto a reproducir el crecimiento real observado en una región. Por otra parte, realizar una discusión de los procedimientos que se pueden emplear para determinar el ajuste del mapa simulado al mapa del crecimiento real de las zonas urbanas.

LAS TÉCNICAS DE SIMULACIÓN

La simulación del crecimiento urbano es un tema complicado y difícil. Sin embargo, es de gran importancia contar con medios adecuados y eficaces para desarrollarlo, especialmente desde el punto de vista de las aplicaciones en la Ordenación territorial y urbanística. En los últimos años ha resurgido el interés por elaborar métodos de este tipo y en la literatura científica reciente se pueden encontrar numerosos ejemplos.

De todas las técnicas de simulación existentes en este caso se ha decidido emplear dos de ellas, muy diferentes en su planteamiento básico y en su desarrollo operativo.

Por un lado, los Autómatas celulares (AC) que en los últimos años se han convertido en una técnica estándar para estudiar la dinámica temporal de muy diversas cuestiones y, en primer lugar, el crecimiento urbano (Aguilera, 2006 y 2008). No es aquí el momento de detallar el funcionamiento de este procedimiento de simulación, únicamente insistir en que, junto a la aptitud del territorio a ser urbanizado, otro factor muy

determinante del proceso es la vecindad inmediata de cada punto del territorio, ya que este procedimiento parte de la suposición razonable de que lo que ocurre en un punto incide con fuerza en lo que ocurre en los lugares inmediatos a ese punto. Además otra característica singular de los autómatas celulares es que el resultado de una simulación se convierte en la base, y, por lo tanto, incide, en la siguiente simulación. Es un procedimiento iterativo (Barredo et al, 2003)

Por otra parte, las técnicas de Evaluación multicriterio (EMC). Es importante subrayar que este procedimiento ha sido designado con un propósito ligeramente diferente al que se va a emplear en este trabajo. Las técnicas EMC son muy utilizadas para formular planteamientos normativos, es decir establecer lo que debería ocurrir en un lugar, en función de los objetivos y de los criterios establecidos por los planificadores (Gómez y Barredo, 2005). Básicamente se pueden resumir en decir que se establece una especie de ecuación lineal donde se calcula para cada punto del territorio su adecuación para un uso, por ejemplo, el uso residencial, y, una vez clasificados de mayor a menor todos los puntos del territorio en función de su aptitud para este uso concreto, se pueden seleccionar aquellos puntos que sean necesarios para alcanzar las metas de suelo residencial que se hayan establecido previamente.

Sin embargo, en esta ocasión estas técnicas se van a emplear para calcular los lugares más probables de urbanización en una fecha del presente, en función de criterios observados como determinantes del crecimiento urbano en el pasado. De esta manera, tales resultados los podemos contrastar con lo que realmente ha ocurrido con la urbanización en esa fecha.

EL ÁREA DE ESTUDIO Y LOS MAPAS DE CRECIMIENTO REAL ENTRE 1990 Y 2000

El área de estudio del presente trabajo abarca la totalidad del territorio de la Comunidad de Madrid, ésta es una comunidad autónoma de España situada en el centro de la Península Ibérica y, dentro de ésta, en el centro de la Meseta Central. Limita con las provincias de Guadalajara, Cuenca, Toledo (Castilla-La Mancha), Ávila y Segovia (Castilla y León). Con una extensión de 8.028 km² (1,6% del total nacional), es la 12ª comunidad española en superficie y se encuentra formada por 197 municipios.

La población de Madrid ocupa el primer lugar provincial en número de habitantes con 6.271.638 en el año 2008 (Instituto Nacional de Estadística) y se caracteriza por una gran concentración humana, especialmente en su capital y área metropolitana. A partir de la década de 1990 se produce un cambio en el modelo de crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid, éste se caracteriza por producirse una descentralización hacia los municipios rurales cada vez más alejados del centro como municipios del oeste, norte y sureste de la región. (Barrios, 2008 y Plata, 2008a)

Al analizar solamente el incremento del área residencial (en CORINE: tejido urbano continuo, estructura urbana abierta, y urbanizaciones exentas y/o ajardinadas) se observa cómo es la provincia de Madrid la que presenta cambios más significativos, aumentado su superficie urbana en 20.190 ha seguida de las provincias de Alicante (12.589 ha) y Valencia (5858 ha).(OSE, 2008)

Como es conocido y se explica a continuación, la Comunidad de Madrid ha sufrido durante los últimos 15 años un proceso de rápida urbanización (Figura 1 y 2), que ha significado, sobre todo, un aumento de la ocupación del territorio a base de urbanizaciones residenciales con patrones difusos (EEA, 2006).

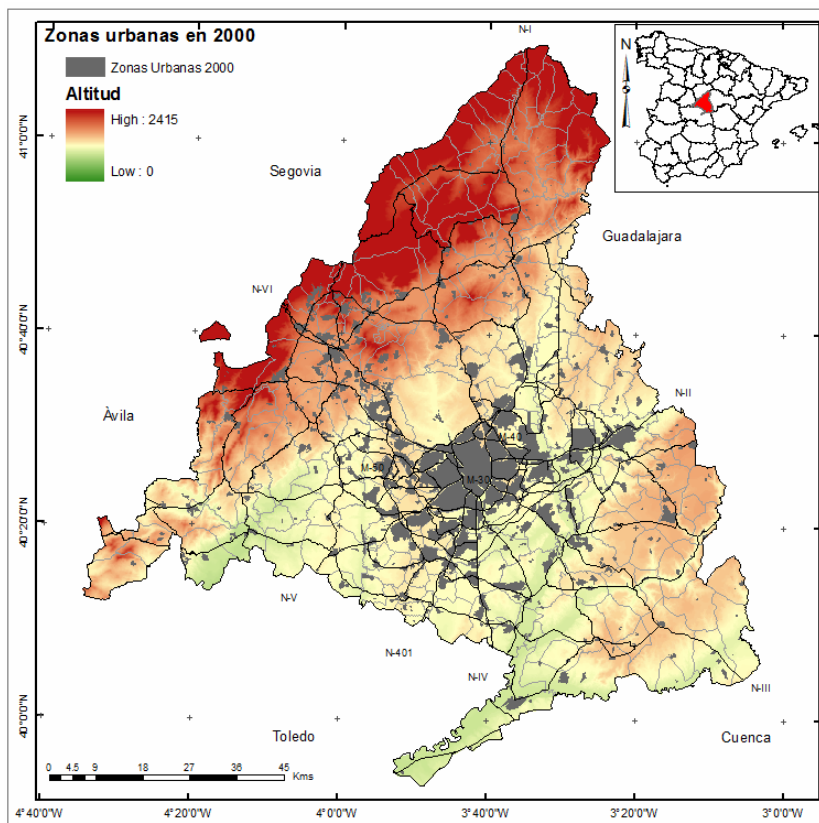


Figura 1. Zonas urbanas del año 2000 en la Comunidad Autónoma de Madrid

Una exploración inicial del crecimiento artificial en la Comunidad de Madrid como muestra la figura 2, ofrece una clara idea de cómo se ha desarrollado y la figura 1 y 3 dónde se ha localizado principalmente. Puede observarse cómo las mayores áreas del crecimiento se han concentrado alrededor del núcleo central (Madrid Capital) principalmente de uso residencial, una banda más ancha al suroeste de ésta (uso urbano e industrial), así como en el Corredor del Henares (principalmente de uso industrial y comercial) y la N-6. Puede comprobarse cómo se ha intentado maximizar las rentas de situación que ofrecían aquellos espacios cercanos a la red principal de comunicaciones. Con la gran inversión en infraestructuras se pretendía esponjar el área más densa para dar lugar una región policéntrica, como puede observarse, no se ha conseguido ese objetivo sino que se ha densificado aún más la zona centro y consolidado las áreas del sur. Además destaca la ausencia de un cinturón verde alrededor de la capital, como se proyectó en un inicio. Por lo que podría decirse que no existe un policentrismo morfológico (aunque posiblemente sí funcional) sino una conurbación. Además en este periodo de tiempo se localizan numerosas urbanizaciones alejadas de los centros urbanos consolidados, localizadas un gran número, aunque de pequeño tamaño, en la zona de Sierra (noroeste de la comunidad).

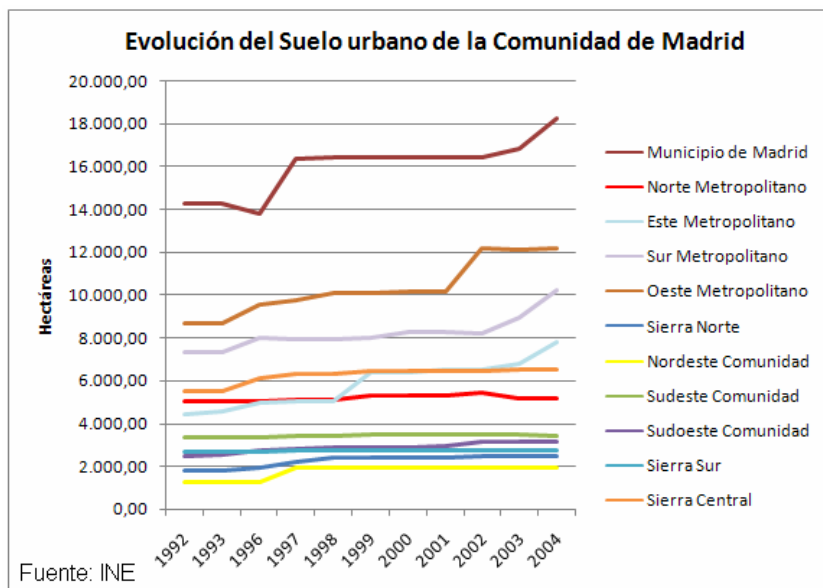


Figura 2. Evolución del suelo urbano en la Comunidad de Madrid 1992-2004

Como indica el gráfico de la figura 2 los Suelos urbanos de la Comunidad de Madrid en general han ido aumentando a lo largo de estos años. Los aumentos más evidentes se han localizado en el Municipio de Madrid y en las zonas metropolitanas del oeste, sur y este. Los incrementos más llamativos se produjeron alrededor de 1993 - 1997 y después del año 2001. Las demás zonas de la Comunidad se mantuvieron casi constantes destacando sólo los incrementos de 1993 en la Sierra Central y en la zona nordeste.

En concreto, aproximadamente 50.000 Ha se han convertido en superficies artificiales entre 1990 y 2000, es decir casi un 50% más de la superficie existente en 1990.

Los mapas de crecimiento del suelo residencial y del suelo productivo entre 1990 y 2000 se muestran la figura 3. Estos son los mapas reales que deseamos reproducir mediante las dos técnicas antes descritas.

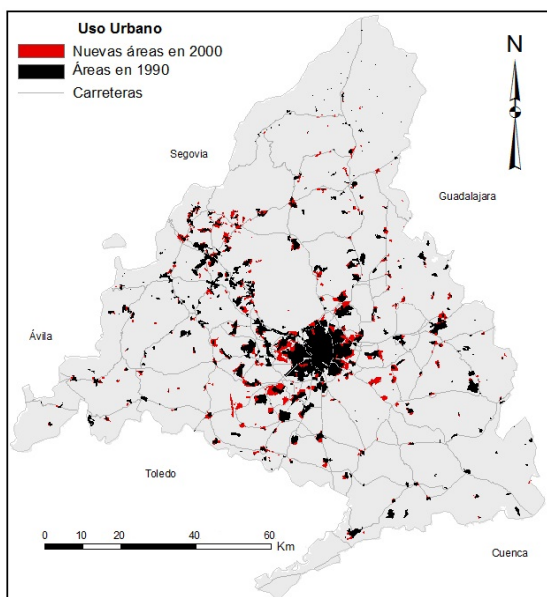


Fig 3 a: Zonas urbanas en Madrid (1990 y 2000).

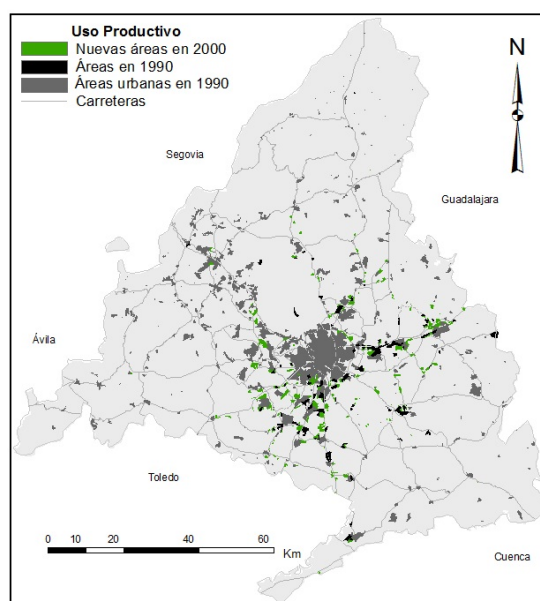


Fig 3. b: Zonas urbanas comerciales e industriales (1990 y 2000).

Una cobertura imprescindible para el análisis del crecimiento del suelo urbano sería aquella que recogiera las distintas ocupaciones del suelo para distintos años con intervalo suficiente de tiempo como para advertir los cambios en los usos. El proyecto CORINE Land Cover (CLC) (Ministerio de Fomento) tiene como objetivo

fundamental la captura de datos de tipo numérico y geográfico para la creación de una base de datos europea a escala 1:100.000 sobre la Cobertura y/o Uso del Territorio por lo que su información disponible para los años 1990 y 2000 será la utilizada en este estudio. Para su composición se utilizaron imágenes Landsat Thematic Mapper (40 escenas) pudiendo ofrecer una Unidad mínima cartografiada de 25 hectáreas. La nomenclatura seguida está jerarquizada en varios niveles de información, en el caso español la nomenclatura consta de 5 niveles y 64 clases para el CLC90 y 85 clases para el CLC2000. (www.ign.es)

La construcción de modelos de simulación basados en las dos técnicas mencionadas necesita, previamente, averiguar qué factores pueden haber influido en la localización de los distintos tipos de crecimientos (residencial y productivo) que deseamos estudiar. Por ello, ha sido necesario realizar una serie de análisis estadísticos para seleccionar los factores influyentes en cada caso (Plata y otros, 2008a y b). De este modo se ha podido concluir que entre las fuerzas impulsoras del crecimiento urbano en la región se encuentran: la accesibilidad a carreteras, a zonas urbanas, a servicios, al ocio. También incidirían factores de tipo ambiental, económico, de planeación o prohibición de utilización, etc.; entre estos estarían: la geotecnia, los tipos y usos de suelo ya existentes, la pendiente, la altitud, y la situación legal del suelo: urbanizable o no urbanizable, entre otros. Por último, y no por ello menos importantes, están aquellas fuerzas conductoras de carácter social, es decir, factores como la confortabilidad de las viviendas (Ej. orientación del terreno), la calidad visual, la accesibilidad a los servicios básicos, la lejanía a instalaciones peligrosas, etc. (Plata y otros., 2008a y b).

Usando este conjunto de factores se han elaborado mapas de aptitud del territorio para ser urbanizados en el año 2000; en base a unas cifras totales de nuevo suelo urbano se han seleccionado con dichas técnicas los lugares más adecuados para su urbanización obteniendo los mapas simulados, ver figura 4.

Ahora se trata de comparar los mapas simulados con los mapas reales para determinar el grado de ajuste entre ambos y de esa forma poder valorar que técnica resulta más adecuada, más capaz de reproducir el comportamiento real. Sin embargo, esta tarea, la comparación de mapas, no es tan sencillo como puede parecer. Por ello merece la pena realizar una discusión detallada de este tema.

PROCEDIMIENTOS PARA COMPARAR UN MAPA DE USOS DEL SUELO SIMULADOS CON UN MAPA DE USOS DEL SUELO REALES

La comparación de dos mapas, uno real y otro simulado con un modelo, necesita concretar qué elementos queremos medir y comparar entre los dos mapas. En principio, dos mapas se pueden parecer más o menos en función de muy diversos aspectos:

1º Semejanza en la localización de los elementos existentes en el mapa, cuanto más iguales sean estas posiciones en los dos mapas más parecidos serán esos mapas. Esta es la primera y más elemental manera de comparar dos mapas, pero no parece difícil imaginar otras similitudes que resultan relevantes.

2º Similitud en la estructura formal del paisaje reflejado en los dos mapas. La Ecología del paisaje, una nueva disciplina que analiza las formas del paisaje, subraya la importancia de este tema en la comparación de dos situaciones y en la evaluación de la calidad ambiental en ciertos aspectos relevantes.

3º De manera aún más general en muchos casos puede parecer significativo comparar dos mapas en cuanto a la estructura territorial básica de los hechos reflejados en él. Esto es particularmente importante respecto a mapas de zonas urbanas y metropolitanas, de manera que podríamos comparar si la situación simulada es similar, en mayor o menor, grado a una situación metropolitana real en cuanto a su organización general.

4º Aunque bastante relacionado con el primer criterio que hemos mencionado, la comparación de la accesibilidad de los lugares urbanos y residenciales generados por los modelos de simulación en relación a los valores de esta magnitud en la realidad podría ser otro criterio de comparación importante.

En resumen, es posible formular diferentes criterios que permiten medir la similitud de dos mapas y de esa manera establecer la validez de un modelo de simulación para construir resultados próximos a la realidad o, al menos, razonables. Otra cuestión importante es cómo medir en concreto cada uno de estos criterios de comparación. En esta comunicación sólo se van a adelantar algunas ideas para medir el primer criterio que hemos mencionado, la localización de los hechos representados en los dos mapas. Los otros aspectos se dejan para un trabajo posterior.

La comparación de la localización entre dos mapas, y determinar correctamente el acuerdo entre una simulación de un mapa de usos del suelo y uno real, tampoco es tan sencilla y depende de varias cuestiones como las siguientes:

a) ¿Es adecuado usar el mapa final que incluye tanto los usos preexistentes como las adiciones de nuevos usos? En este caso el acuerdo entre los dos mapas se puede considerar que será, de manera usual, bastante elevado, ya que los nuevos usos, en nuestro caso las nuevas zonas urbanas, que es lo único que se simula realmente, casi siempre son una superficie mucho menor que la preexistente (que no ha sido simulada). Por lo tanto, parece recomendable que la comparación entre los dos mapas se refiera únicamente a la cantidad de superficie y la localización de los nuevos usos aparecidos entre la fecha inicial y la fecha final. En los procedimientos que empleamos en este trabajo la cantidad no es problema ya que está fijada en la misma cifra real de crecimiento urbano que se ha producido. Solo se trata de acertar, y medir si se acierta, en la localización concreta de los nuevos usos urbanos: residenciales y productivos.

b) Sin embargo, comparar la localización de los nuevos usos simulados con los reales plantea un problema importante. Si uno reflexiona sobre el tema encuentra que las probabilidades de acertar son bastante reducidas. Por ejemplo, supongamos que el mapa de adecuación (generado ya sea con el procedimiento de los autómatas celulares ya sea con evaluación multicriterio) usado para seleccionar la posición de los nuevos usos incluye 100,000 lugares (por ejemplo píxeles de un mapa raster) de un nivel de adecuación elevado (y, por lo tanto, con pequeñas variaciones, adecuados para ser urbanizados), y se debe seleccionar 10,000 lugares (píxeles) de nuevos usos, de nuevas zonas urbanas. Las combinaciones posibles de 10,000 entre 100,000 son enormes (100,000 tomados de 10,000 en 10,000), eso si se quiere acertar exactamente en todos los píxeles reales, pero aún admitiendo un número de errores individuales relevantes (por ejemplo, un 20-30% del total de píxeles de nuevos usos) también las combinaciones son muy grandes y no es fácil acertar.

Estamos suponiendo que, en la realidad, en la aparición de nuevas zonas urbanas, la selección de un lugar para una nueva zona urbana, se hace, por los promotores, de manera racional pero no totalmente exacta y determinista. Esto quiere decir que si dos lugares tienen una adecuación (para ser urbanizados) de 250 y otro de 230 (sobre un máximo posible de 255) la elección del píxel de 230 es posible sin demasiados problemas. De hecho no podemos pensar que un promotor posea una información tan detallada y precisa de lo que es adecuado que es urbanizar en el punto A respecto al punto B, más bien su decisión se basa muy aproximadamente en una información similar pero no exacta. Por lo tanto en la realidad nunca podremos suponer que se eligen siempre y obligatoriamente los píxeles de máxima adecuación posible sino solo de manera aproximada y esto determina que el número de posibles soluciones sea gigantesco y no es fácil que cualquier procedimiento de elección óptimo, que siempre obtiene la mejor solución, la de los puntos de máxima adecuación, coincida con la realidad.

En resumen, la posición espacial de las soluciones simuladas solo se puede aproximar algo a las reales y de lo que se trata es encontrar un procedimiento que resulte razonable en este sentido.

Evidentemente una primera opción es utilizar los procedimientos ahora existentes en la literatura, por ejemplo, el encapsulado en la orden VALIDATE de IDRISI, pero este procedimiento ha sido usado con todos los lugares (los anteriores y los simulados) y ya hemos comentado que esto no es muy adecuado, por otra parte, consideramos que es interesante valorar este tema de varias formas y, por ello, vamos a intentar proponer otras posibilidades, como las siguientes:

1º Comparar la distribución de frecuencias (y los estadísticos de resumen de esa distribución) de la adecuación que se observa en los usos reales con la distribución de frecuencias de la adecuación en los usos simulados. La idea subyacente es que la simulación lo que genera es el mapa de adecuación para un tipo de uso, esa es la "predicción" establecida por el procedimiento empleado, y es la que se debe comparar con la realidad. De ese mapa de adecuación se obtiene la asignación de puntos a un uso, en general escogiendo los que tienen mayor nivel de adecuación. Pero estamos suponiendo que en la realidad no siempre se eligen los píxeles con la máxima adecuación, pero si se sigue, a grandes rasgos, el nivel de adecuación. Por ello comparar las frecuencias de adecuación y no los puntos concretos quizá sea más realista. Esa comparación se puede realizar con algún tipo de prueba estadística, por ejemplo la comparación de dos medias o la comparación de las formas de las dos distribuciones de frecuencias.

2º Tener en cuenta no la posición exacta de los usos sino su localización aproximada. Es decir que no se considere erróneo que un uso simulado se sitúe en las proximidades de los píxeles reales con ese uso.

Para ello se puede realizar el siguiente procedimiento:

a) Calcular un buffer de cierto tamaño en torno a todos los píxeles reales de un uso (por ejemplo, este procedimiento se puede repetir para un buffer de 500, 1000, 1500 y 2000 metros)

b) Determinar qué porcentaje de los puntos simulados se sitúan dentro de esos buffer y comprobar cómo varía el nivel de acierto con el tamaño del buffer. Si ese porcentaje es elevado podremos considerar que nuestra simulación reproduce bien lo encontrado en la realidad.

En este caso ya no se trata de acertar exactamente con cada uno de los píxeles sino de acertar con la posición aproximada de los píxeles reales.

RESULTADOS

Los resultados que hemos obtenido se pueden dividir en dos partes, por un lado la comparación visual de los mapas resultantes de las simulaciones con ambas técnicas y por otro lado, los resultados de las comparaciones de esos mapas con los mapas reales de crecimiento urbano.

En la figura 3 se muestran los mapas de aptitud/adequación para nuevas zonas urbanas generadas con las dos técnicas. En rojo se muestran los crecimientos residenciales (nombrados como urbanos) fruto de las simulaciones y en verde los crecimientos industriales y comerciales (productivo).

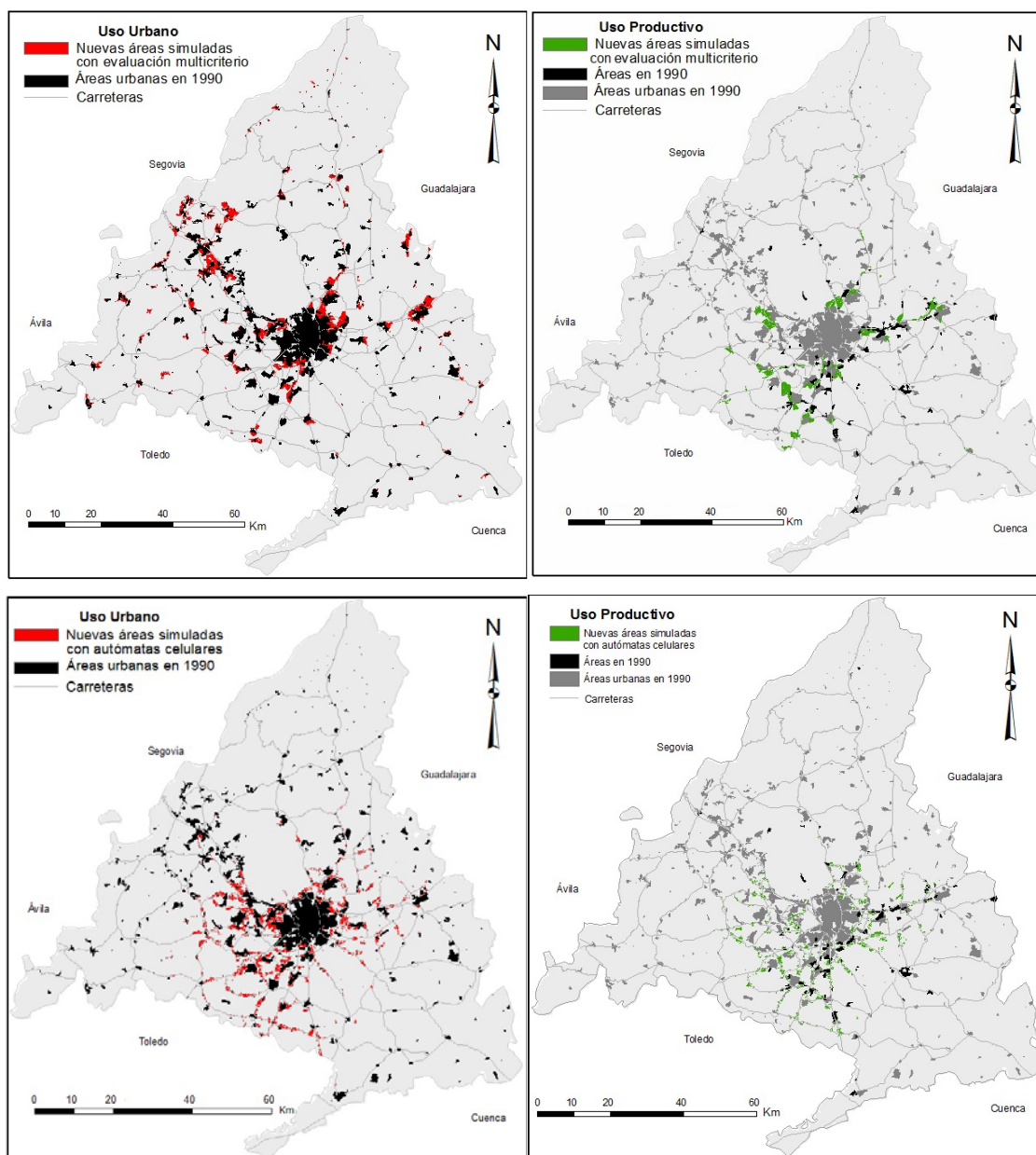


Figura 4. Resultados obtenidos para los usos urbanos y productivos para el año 2000 mediante evaluación multicriterio y autómatas celulares.

Como puede verse a simple vista el uso urbano simulado mediante EMC responde al patrón básico que ocurrió en la realidad. Las principales nuevas parcelas aparecieron en torno a la capital, alrededores de Alcalá de

Henares, Alcobendas y San Sebastián de los Reyes, a lo largo de la N-6 hasta la Sierra Central y numerosas pero pequeñas urbanizaciones en la sierra Norte. En el caso de AC, los nuevos crecimientos urbanos se localizan en los alrededores de la capital en la zona suroeste aprovechando el transcurso de la red de carreteras. Con esta técnica las parcelas son más numerosas y de menor tamaño creando una zona urbana menos compacta que con la técnica de EMC.

Mientras, para el uso productivo aunque geográficamente se encuentran las nuevas zonas en lugares muy similares: cercanos a la ciudad de Madrid, municipios del suroeste y corredor del Henares, con la técnica de EMC las nuevas áreas serían más compactas, grandes y cercanas a las anteriores zonas construidas que con la técnica de AC y respecto también a la realidad. Este uso se localiza no sólo en torno a las zonas productivas ya construidas, puesto que el transporte y la accesibilidad son dos características importantes de este uso también se distribuyen en torno a las carreteras principales como las nacionales. Como ocurría con el uso urbano definido con la técnica de AC, en el uso productivo el número de parcelas es mayor siendo estas de menor tamaño y siendo menos compactas espacialmente.

Después de la comparación visual comentada también se compararon ambos mapas con los mapas reales de crecimiento urbano. Esta comparación se realizó utilizando diferentes métodos:

a) La comparación de los mapas totales mediante el procedimiento de VALIDATE

Con la herramienta VALIDATE de de IDRISI se compararon primeramente los resultados obtenidos con las dos técnicas de simulación para todo el uso urbano existente en el año 2000, esta comparación se encuentra en la columna (1) de la tabla 1. Después se consideró oportuno comparar sólo los cambios, es decir, sólo los nuevos crecimientos que proponían las simulaciones con los que en la realidad sucedieron, estos resultados se muestran en la columna (2) de la tabla 1.

Tabla 1. Resultados de Kappa standard para el uso urbano

TIPO DE ENSAYO	TODO EL USO KAPPA STANDARD (1)	CAMBIOS KAPPA STANDARD (2)
Evaluación Multicriterio	0.7989	0.2696
Autómatas celulares	0.7577	0.1658

Del mismo modo se procedió para el uso productivo y los resultados quedan reflejados en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de Kappa standard para el uso productivo

TIPO DE ENSAYO	TODO EL USO KAPPA STANDARD (1)	CAMBIOS KAPPA STANDARD (2)
Evaluación Multicriterio	0.5199	0.1276
Autómatas celulares	0.5167	0.1196

Se puede observar (tabla 1 y tabla 2) que se obtienen mejores resultados de Kappa standard con los ensayos realizados con EMC, tanto considerando sólo los cambios (crecimientos de ese uso del suelo) como si se considera todo el uso urbano o productivo simulado a 2000 con todo el uso real a esa misma fecha. También estas tablas reflejan que los mapas resultantes para el uso urbano se acercan más a la realidad que los resultantes para el uso productivo.

Lo que es más evidente es que usar el mapa con el uso total mejora sustancialmente el acuerdo entre el mapa real y el simulado. Esto parece confirmar la idea principal de nuestro argumento: “Comparar mapas de crecimiento urbano usando los mapas totales engaña bastante sobre el acuerdo entre simulación y realidad”, nuestra recomendación es que no debería usarse ese modo de comparación para decidir la bondad, la validez de un modelo de simulación a la hora de reproducir la realidad.

b) La distribución de frecuencias de aptitud de los nuevos lugares urbanizados reales y simulados.

En la figura 4 se muestra la distribución de frecuencias de la adecuación para urbanización de los puntos realmente urbanizados entre 1990 y 2000 y en los puntos seleccionados por el procedimiento de evaluación multicriterio. En este caso no es posible realizar esta distribución de frecuencias para los modelos basados en AC dado que en este método no existe un mapa equivalente de adecuación que se pueda analizar.

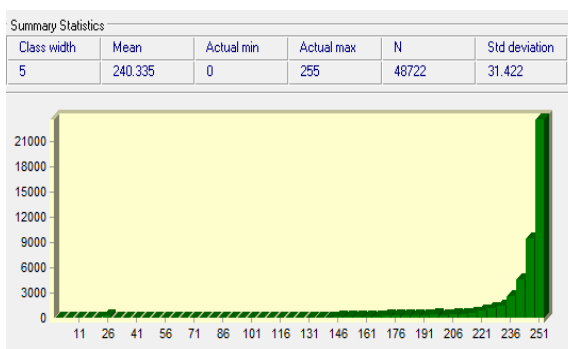


Fig 5a. Distribución de frecuencias de aptitud del crecimiento urbano real

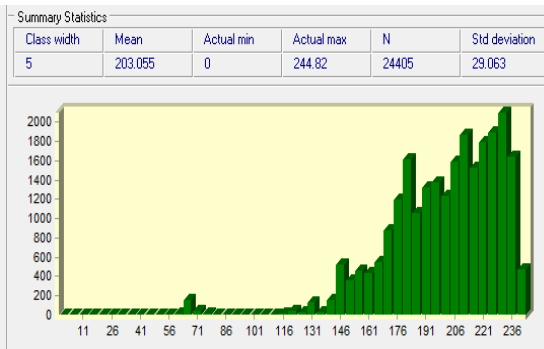


Fig 5b. Distribución de frecuencias de aptitud del crecimiento industrial y comercial real

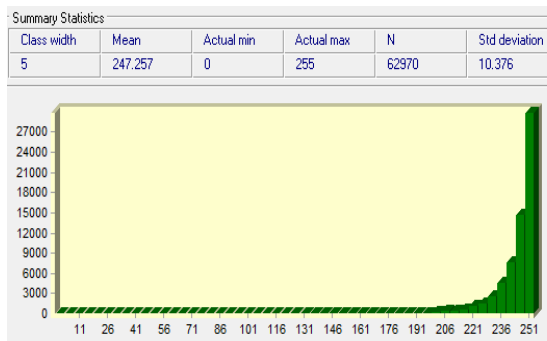


Fig 5c. Distribución de frecuencias de aptitud del crecimiento urbano simulado con evaluación multicriterio

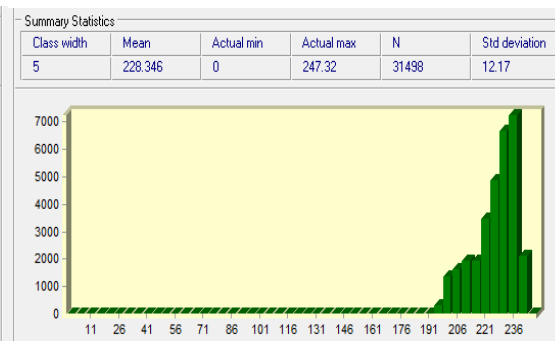


Fig 5d. Distribución de frecuencias de aptitud del crecimiento industrial y comercial simulado con evaluación multicriterio.

Aunque la similitud general de los gráficos es bastante clara también existen diferencias significativas. En especial en el uso productivo donde las adecuaciones de los puntos reales se distribuyen de modo mucho más extenso y amplio que en los puntos simulados. No obstante, la mejor comprobación de la similitud de las distribuciones de frecuencias se puede obtener mediante una prueba estadística para comparar los indicadores sintéticos de estas distribuciones, en concreto comprando los valores medios de las distribuciones reales con las simuladas. En la tabla 3 se indican los resultados.

Tabla 3. Test de medias para comparar estadísticamente las distribuciones de frecuencias de la aptitud simulada con la existente en las zonas urbanas reales.

	MODELO	MEDIA	N	SD	T	PV	RESULTADO
Urbano EMC	Real	240	48722	31.42	-51.753	0.00	Hipótesis rechazada
	Simulado	247	62970	10.37			
Productivo EMC	Real	203	24405	29.06	-139.466	0.00	Hipótesis rechazada
	Simulado	228	31498	12.17			

La conclusión es que ninguno de los modelos de adecuación presenta medias de adecuación iguales a las medias de adecuación de los puntos con zonas urbanas reales.

Esto parece indicar que la similitud entre los mapas de adecuación obtenidos y el crecimiento real no es muy grande y que, por lo tanto, el modelo de simulación basado en la evaluación multicriterio no es capaz de reproducir lo que realmente ha ocurrido con el crecimiento urbano entre 1990 y 2000.

c) Comparación de las localizaciones mediante buffers

Una tercera forma de comparar los mapas reales con los simulados es utilizar “buffers”, es decir zonas de influencia en torno a los lugares realmente urbanizados, ahora admitimos que no somos capaces de acertar exactamente con la posición concreta de los lugares urbanizados, pero queremos saber si los lugares simulados se encuentran, en un porcentaje elevado, en las proximidades de los lugares reales, si una cantidad importante de la simulación se hubiese situado de esa manera podríamos pensar que habríamos sido capaces de reproducir en alguna medida el comportamiento real de la urbanización.

Tabla 4. Crecimiento simulado dentro del Buffer de 500, 1000, 1500 y 2000 metros al crecimiento real para el uso urbano.

TIPO DE ENSAYO	500			1000		1500		2000	
	%PIXELES COINCIDENTES (A)	% PIXELES DENTRO DE BUFFER (B)	%TOTAL CERCANOS (A+B)	% PIXELES DENTRO DE BUFFER (B)	%TOTAL CERCANOS (A+B)	% PIXELES DENTRO DE BUFFER (B)	%TOTAL CERCANOS (A+B)	% PIXELES DENTRO DE BUFFER (B)	%TOTAL CERCANOS (A+B)
Evaluación Multicriterio	26.89	28.17	55.06	46.99	73.88	58.95	85.84	64.38	91.28
Autómatas Celulares	19.30	25.32	44.62	44.85	64.15	59.80	79.10	68.43	87.73

En la Tabla 4 se muestra el porcentaje de píxeles del crecimiento urbano simulado que coincide con el crecimiento real (a) y en los buffers establecidos en torno a él (b). Además se ha calculado el porcentaje de píxeles denominados cercanos que sería la suma de los píxeles coincidentes con aquellos que caen dentro de cada tipo de buffer. Los mejores resultados de localización en este caso son los obtenidos mediante EMC si nos centramos en las coincidencias(a) (26.89%), en cuanto a los crecimientos simulados que coinciden en los distintos buffer (a+b) también la EMC es la que mejores resultados posee. Aunque a partir de 1500m el porcentaje de los píxeles calculados con AC dentro de los buffers (b) son superiores, es decir se encuentran más cerca de los verdaderos crecimientos al incluirle las coincidencias (a) sigue siendo el modelo con EMC el que mejores resultados ofrece.

Tabla 5. Crecimiento simulado dentro del Buffer de 500, 1000, 1500 y 2000 metros al crecimiento real para el uso productivo.

Tipo de ensayo	500			1000		1500		2000	
	%PIXEL ES COINCIDENTES (A)	% PÍXELES DENTRO DE BUFFER (B)	%TOTAL CERCANOS (A+B)	% PÍXELES DENTRO DE BUFFER (B)	%TOTAL CERCANOS (A+B)	% PÍXELES DENTRO DE BUFFER (B)	%TOTAL CERCANOS (A+B)	% PÍXELES DENTRO DE BUFFER (B)	%TOTAL CERCANOS (A+B)
Evaluación Multicriterio	13.13	26.43	39.56	50.12	63.25	66.49	79.62	76.50	89.63
Autómatas Celulares	12.59	20.41	33.01	38.91	51.50	51.97	64.56	61.45	74.04

En la Tabla 5 se muestra el porcentaje de píxeles del crecimiento productivo simulado que coincide con el crecimiento real y en los buffers establecidos en torno a él. Los mejores resultados de localización son aquellos obtenidos mediante la técnica de EMC. Es esta técnica la que más píxeles acierta con la realidad (a) (13.13%) y la que más proporción de las nuevas zonas productivas simuladas se encuentra dentro de estos buffers (b).

CONCLUSIONES

Una vez elaborados los modelos mediante las técnicas de EMC y AC que pretenden reproducir el crecimiento urbano y productivo real desde 1990 al año 2000 se compararon con la realidad de diferentes formas.

La comparación visual de las dos técnicas mostró como el modelo elaborado con EMC responde al patrón básico que ocurrió en la realidad pero mostrando una parcelas de crecimiento mayores y más compactas. En cuanto al modelo elaborado con AC estas parcelas son más numerosas y de menor tamaño creando una zona urbana menos compacta que con la técnica de EMC y con lo que ocurrió realmente. Además con esta técnica los nuevos crecimientos se disponen a lo largo de las infraestructuras viarias no apareciendo las urbanizaciones aisladas que en realidad sí aparecieron en la Sierra Norte de la Comunidad y que la EMC sí contempla.

Por otra parte, se compararon los mapas reales y simulados con la herramienta VALIDATE de IDRISI tal y como describe la literatura existente. Se compararon las situaciones finales simuladas al año 2000 con la que en realidad se produjo. De este modo el grado de ajuste era suficientemente alto siendo la técnica de EMC el que mejor grado de ajuste obtenía. Pero comparar las situaciones finales considerando todo el uso del suelo creemos que no es la mejor opción de comparación debido a que este tipo de uso del suelo no son susceptibles de retroceso. Además al comparar todo el uso del suelo urbano o productivo simulado con real estamos comparando gran parte que no ha cambiado por lo que el grado de ajuste sería en esas zonas máximo. Es decir, proponemos, que para estudiar la dinámica urbana, caracterizada por su aumento en el espacio con el tiempo y que muy rara vez se produce un retroceso en este tipo de uso, lo más recomendable sería realizar la

comparación de los cambios, es decir, de aquellas nuevas áreas que aparecen a partir de la fecha de referencia. Así el grado de ajuste (κ standard) disminuye drásticamente pero otorga un valor más acorde entre simulación y realidad. Siguiendo esta premisa los valores de κ standard disminuyeron aunque siguió siendo la EMC la que mejores datos ofrecía para los dos usos del suelo estudiado.

En este estudio también proponemos la comparación de la distribución de frecuencias de aptitud de los nuevos lugares urbanizados reales y simulados. Esta comparación sólo se ha realizado para la técnica de EMC ya que para los modelos basados en AC no se cuenta con un mapa de aptitud del mismo modo que en EMC. En esta comparación el uso urbano ofrece mejores resultados que para el uso productivo posiblemente por la superior cantidad de demanda de uso urbano en relación con el productivo. De todas formas comparando los valores medios de las distribuciones reales y simuladas se concluye que la EMC no es capaz de reproducir exactamente lo que realmente ha ocurrido, la localización concreta de los nuevos usos..

La tercera forma de comparar los mapas reales con los simulados es utilizar "buffers". En este caso tanto para el uso urbano como el productivo la EMC se encuentra con un porcentaje mayor que con AC en las proximidades de los lugares reales por lo que esta técnica reproduciría, desde este punto de vista, mejor la realidad acontecida.

Las técnicas de EMC, frecuentemente utilizadas para formular planeamientos normativos, en este estudio muestra buenos resultados en cuanto a reproducir el crecimiento real observado en la Comunidad de Madrid en comparación con las técnicas de AC añadiendo que la EMC es bastante más sencilla en su ejecución.

Con este estudio se pretende además de comparar diferentes técnicas de simulación crear debate en cuanto a los métodos de comparación entre ellos y la realidad. Se ha comenzado proponiendo métodos de comparación basados en la localización.

Este estudio aspira a ser un apoyo para futuras líneas de trabajo donde se puedan integrar más métodos de comparación basados no sólo en la localización sino otros aspectos de la estructura metropolitana, como la organización general de zonas urbanas y metropolitanas, comparaciones de accesibilidad y comparaciones basadas en la estructura formal del paisaje (como número de manchas, tamaño, cercanía de unas a otras...)

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el proyecto SIMURBAN del Ministerio de Educación y Ciencia (MEC España) a través de la convocatoria de 2006 de proyectos del Plan nacional de Investigación científica, Desarrollo e Innovación 2004-2007, Programa nacional de Ciencias Sociales, Económicas y Jurídicas (Referencia SEJ2007-66608-C04-00/ GEOG).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilera, F. 2008: Análisis espacial para la ordenación eco-paisajística de la Aglomeración Urbana de Granada. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, 303 pp.

Aguilera Benavente, F. (2006): Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares. *GeoFocus* (Artículos), nº 6, p. 81-112.

Barredo, J.I., Kasanko, M., McCormick, N. y Lavalle, C. (2003): Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, vol 64, pp 145-160

Barrios I., Romero R., Montero-Serrano, J. (2008): Efecto de la dinámica territorial (1990-2000) sobre los espacios naturales protegidos de la Comunidad de Madrid. En: A. Galve, V. Pascual, V.M. Rodríguez (Editores), *XI Coloquio Ibérico de Geografía: la perspectiva geográfica ante los retos de la sociedad y el medioambiente en el contexto ibérico*. Universidad de Alcalá, España.

EEA (European Environment Agency) (2006): *Urban sprawl in Europe, the ignored challenge*. EEA Report No 10/2006.

Gómez Delgado, M. y Barredo Cano, J. I. (2005): *Sistemas de Información Geografía y Evaluación Multicriterio aplicados al ordenamiento del territorio*. Ed. Ra-Ma. Madrid, 279pp.

Instituto Geográfico Nacional: [consultado el 16 de junio de 2009]
http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/INSTITUTO_GEOGRAFICO/Teledeteccion/corine/

Observatorio de la Sostenibilidad en España (OSE) (2008): Informe de Sostenibilidad en España – 2007 [consultado el 19 de junio de 2009] www.sostenibilidad-es.org/

Plata Rocha, W.; Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2010): “Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid aplicando Métodos de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica”; *GeoFocus* (Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica), Vol.10 (en prensa).

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2008a): Análisis de factores explicativos del crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid a través de métodos estadísticos (RLM y PLS) y SIG. *XIII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*, Las Palmas de Gran Canaria, España

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2008b): Análisis de factores explicativos del crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid a través de métodos estadísticos (RLO y MLA) y SIG. Presentado al *XIII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial*, La Habana, Cuba, y publicado en la *Revista de Planeamiento Territorial y Urbanismo Iberoamericana*, Num. 0, España.

Rueda, S. Un nuevo urbanismo para una ciudad más sostenible. Barcelona: Agencia de Ecología Urbana. [Consultado el 21 de mayo de 2009] <http://www.bcnecologia.net/>