

Simulación del crecimiento urbano y modelos basados en autómatas celulares: el uso de parcelas catastrales vectoriales a partir de la teoría de grafos

P. Barreira González¹, M. Gómez Delgado¹, F. Aguilera Benavente¹

¹ Unidad Docente de Geografía. Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente. Universidad de Alcalá. C/ Colegios, 2. 28801 Alcalá de Henares (Madrid).

Pablo.barreira@edu.uah.es, Montserrat.gomez@uah.es; f.aguilera@uah.es

RESUMEN: Los modelos de simulación han mostrado a lo largo de las últimas décadas su capacidad para explorar escenarios futuros (posibles, probables o deseables) de cambios de usos del suelo, en general, y de procesos de crecimiento urbano, en particular. Estos modelos nos permiten ofrecer alternativas de futuro con los que poder llevar a cabo una planificación territorial y urbana mejor y más informada.

De entre los distintos modelos utilizados para este fin, los basados en Autómatas Celulares (AC) han sido los más prolíficamente utilizados en las últimas décadas. Tradicionalmente estos modelos han empleado una representación regular del territorio a partir de una rejilla raster, unidad espacial que no se ajusta a la realidad de la práctica de la planificación urbana en nuestro país, basada en una división del territorio en parcelas catastrales.

En este contexto, el presente trabajo presenta un prototipo de modelo basado en AC para la simulación del crecimiento urbano que emplea como unidad espacial básica la parcela catastral. Para poder reducir el tiempo computacional que conlleva el uso de información vectorial, se ha realizado una abstracción de la estructura espacial a partir de la teoría de grafos. El prototipo sigue el esquema NASZ (*Neighbourhood, Accessibility, Suitability, Zoning*) propuesto por White y Engelen (1993), donde intervienen para la determinación de los nuevos espacios urbanos factores como la vecindad, accesibilidad, aptitud y clasificación del suelo. La vecindad en este caso no es estática, de forma que varía en función del tamaño de la parcela estudiada.

El prototipo ha sido probado en Los Santos de la Humosa (Comunidad de Madrid), municipio situado en una de las regiones más dinámicas en las últimas décadas en cuanto a crecimiento urbano.

Palabras-clave: simulación del crecimiento urbano, modelos basados en autómatas celulares, parcelas catastrales, información vectorial, teoría de grafos.

1. INTRODUCCIÓN

La expansión de las áreas urbanas, y en general las dinámicas de cambios de usos del suelo, son uno de los fenómenos que más ha contribuido a la transformación del territorio en los últimos años (Seto et al., 2011). Las consecuencias de estos cambios se traducen a menudo en pérdidas de espacios de valor generando en ocasiones impactos irreversibles en los sistemas naturales (Alberti y Marzluff, 2004; Berling-Wolff y Wu, 2004; Lauf et al., 2012). La planificación territorial (y urbana) juega en este contexto un papel fundamental para proponer alternativas que promuevan un desarrollo sostenible.

Una de las formas más habitualmente empleadas para describir y entender estos procesos de cambios, es la modelación de su comportamiento a través de instrumentos que permitan simular espacialmente las dinámicas asociadas a éstos (Aljoufie et al., 2013; Jantz et al., 2010; White, 1998).

En lo que concierne a la expansión de los usos urbanos, el desarrollo de modelos de simulación ha experimentado un incremento notable en las últimas dos décadas. La geosimulación ha supuesto una herramienta fundamental para entender el comportamiento y las características principales de los sistemas urbanos en expansión, reproducir las dinámicas de este tipo de sistemas (Benenson y Torrens, 2004), explorar qué factores inducen estos procesos (Jokar Arsanjani et al., 2013; Leao et al., 2004), estudiar los patrones de crecimiento urbano (Aguilera et al., 2011; Shafizadeh Moghadam and Helbich, 2013) y cómo estos afectan al territorio (Mitsova et al., 2011) o realizar simulaciones futuras que permitan explorar las

consecuencias de diversos escenarios de crecimiento (Sante et al., 2010; Verburg et al., 2004; Zhang et al., 2011).

La cantidad de instrumentos de modelización desarrollados con estos objetivos es extraordinaria (Briassoulis, 2000; Paegelow y Camacho, 2008), siendo en el ámbito de la simulación urbana los modelos basados en AC los más utilizados (Sante et al., 2010; Triantakonstantis y Mountrakis, 2012), por su capacidad para reproducir sistemas complejos como el crecimiento urbano, partiendo de postulados simples, flexibles y transparentes (Liu, 2012; White y Engelen, 1993).

Sin embargo, este tipo de simulaciones basadas en AC todavía no han resuelto de manera satisfactoria algunas cuestiones, como son la representación del tiempo, la introducción de la aleatoriedad inherente a los procesos sociales, la representación de las unidades espaciales básicas de partida (limitada a la teselación raster del territorio) o el uso de escalas en ocasiones poco adecuadas para la práctica de la planificación territorial. Por estas razones, o por otras relacionadas con la complejidad de los modelos, o la falta de comunicación entre la comunidad científica y los planificadores, muy pocos de los resultados de estos y otros modelos han sido incorporados al proceso real de toma de decisiones en planificación (Triantakonstantis y Mountrakis, 2012), por lo que es necesario continuar realizando esfuerzos para adaptar mejor estos modelos a la realidad que pretenden simular.

Como hemos mencionado, los modelos basados en AC tradicionalmente parten de una representación del espacio a partir de un modelo de datos raster (Barredo et al., 2004; Batty, 1998; Dietzel y Clarke, 2004; Li et al., 2008; Sante et al., 2010; White y Engelen, 1993; Wu, 2002), que, en parte, ha venido influenciada por la disponibilidad de datos provenientes de imágenes de satélite (O'Sullivan y Torrens, 2000), pero también porque proporciona una mayor flexibilidad y capacidad para el análisis espacial, reduciendo considerablemente el coste computacional necesario a la hora de ejecutar estos modelos.

Sin embargo, la transformación de las zonas urbanas no sigue habitualmente una estructura regular, tal y como se representa mediante un modelo raster, sino que los cambios se suelen ajustar a las estructuras territoriales preexistentes, que de manera generalizada podemos concretar en parcelas catastrales (en Velasco, 2009 podemos encontrar una revisión del tratamiento de estas unidades espaciales con derechos de propiedad y, por tanto, de orden jurídico, en diferentes países). Así, la utilización del píxel o celda regular como unidad mínima de representación del espacio que puede transformarse en urbano, resulta poco adecuado a escalas de cierto detalle (Bardají, 2011), más si tenemos en cuenta que su tamaño condiciona en gran medida los resultados del modelo como han demostrado diversos autores (Jantz y Goetz, 2005; Ménard y Marceau, 2005; Moreno et al., 2009; Pinto y Antunes, 2010).

Ante esta situación de partida, en el presente trabajo se ha pretendido desarrollar un prototipo de modelo de simulación del crecimiento urbano basado en AC, que intente minimizar esta dificultad señalada, explorando la viabilidad de utilizar una estructura irregular del territorio, en formato vectorial y a escala municipal. Así, la unidad espacial mínima de referencia estaría representada por el parcelario catastral, que constituye la división del espacio geográfico urbano de referencia en todo el territorio nacional y basado en la estructura de la propiedad, que condiciona los cambios de usos introducidos en los Planes Generales de Ordenación Urbana (PGOUs).

Para alcanzar este objetivo, es necesario conseguir una importante flexibilización de la estructura formal de los modelos basados en AC. La división espacial basada en el parcelario catastral supondrá la implementación del modelo en formato vectorial. Como consecuencia, y para poder reducir los elevados tiempos de cálculos asociados al manejo de datos y realización de análisis en este modelo de datos, es necesario adoptar nuevas soluciones computacionales, que en nuestro caso se han materializado mediante la utilización de la teoría de grafos para representar la información de partida y llevar a cabo la posterior ejecución del modelo.

El prototipo se ha desarrollado íntegramente en Python, uno de los lenguajes de programación *opensource* más utilizado actualmente en el campo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), y ha sido probado en un municipio de la Comunidad de Madrid (Los Santos de la Humosa), una de las regiones españolas que mayor expansión urbana ha experimentado a lo largo de las últimas décadas.

2. LA REPRESENTACIÓN DEL ESPACIO: DE LA CELDA A LA PARCELA Y DE LA PARCELA AL GRAFO

Como hemos mencionado, el formato raster utilizado en los modelos basados en AC tradicionales ha facilitado y agilizado enormemente el proceso de computación y, además, puede ser considerado como un buen método de representación cuando se estudian sistemas complejos con el ánimo de comprender su

comportamiento global. El problema surge cuando se pretende simular una realidad a una escala de mayor detalle, especialmente en planificación urbana, donde es necesaria una mayor resolución y precisión en la representación de los objetos espaciales implicados en la modelación. Esto no siempre es posible resolverlo mediante la utilización de celdas de menor tamaño, pues en este contexto lo que resulta poco realista es representar de forma regular elementos que son, por naturaleza, irregulares.

Para intentar resolver esta cuestión, aunque con diferentes propósitos, varios estudios proponen modificar esta representación raster del espacio, sustituyéndola por polígonos de Voronoi para representar interacciones espaciales entre objetos (Shi y Pang, 2000), clusters urbanos (Semboloni, 2000) u otros objetos geográficos (Shiyuan y Deren, 2004). Por su parte O'Sullivan (2001a,b) utiliza la triangulación de Delaunay a partir de los centroides de las parcelas urbanas para modelar vecindades en un modelo de gentrificación urbana. Sin embargo, ninguno de estos casos resuelve el problema aquí planteado, pues estos autores representan el espacio de una forma abstracta, no acorde con la dinámica real.

Otros autores también han abogado por realizar una representación más realista del espacio urbano y, así, Pinto y Antunes (2010) proponen utilizar unidades censales para simular el crecimiento urbano. Otros autores utilizan objetos irregulares que permitan implementar cambios en su estructura (Moreno et al., 2008, Moreno et al., 2009), o utilizan la parcela o la parcela catastral como información espacial de referencia (Stevens y Dragicevic, 2007; Stevens et al., 2007).

El principal problema de utilizar información en formato vectorial es el coste computacional necesario para leer cada una de las coberturas y realizar los análisis espaciales necesarios. Si el grado de detalle o el número total de parcelas a procesar no es excesivamente grande, podría ejecutarse el AC a través del constructor de modelos de cualquier software SIG o mediante la implementación del modelo *ad hoc* utilizando un determinado lenguaje de programación. Por el contrario, si el número de parcelas catastrales es elevado o existe un alto grado de detalle que impide una rápida ejecución del modelo, surge la necesidad de buscar otras vías para hacer viable computacionalmente su ejecución. En este sentido, encontramos que la teoría de grafos puede resolver este problema, haciendo más eficiente el manejo de una información más real de partida, de forma irregular y en formato vectorial. Así, una solución sería realizar una abstracción de la representación vectorial de estas parcelas a un formato de tipo grafo (O'Sullivan, 2001b).

Un grafo G puede ser definido por un conjunto de entidades (nodos) V cuyas interrelaciones se establecen a través de conexiones (aristas o *edges*) E (1).

$$G = (V, E); \text{ donde } E \subseteq [V^2] \quad (1)$$

Un grafo básicamente contendrá un conjunto de elementos y sus relaciones, como se muestra en la figura 1. Esta estructura ha sido utilizada para resolver varios procesos como el cálculo del camino más corto, caminos óptimos y gestión de redes de transporte, entre otros. Su uso también ha sido explorado en el contexto de sistemas urbanos, representando la vecindad entre edificios para modelar procesos de gentrificación (O'Sullivan, 2001b).

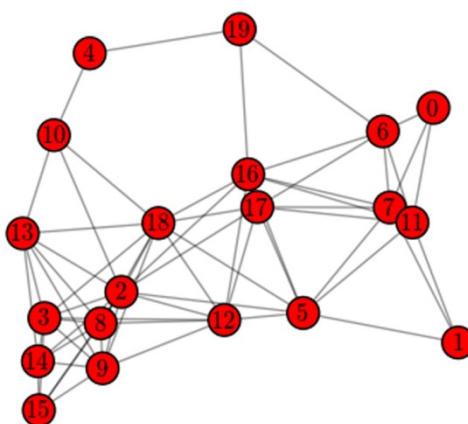


Figura 1. Representación de un grafo. Los números corresponden con el identificador de los nodos y las líneas son las aristas que conectan o relacionan los nodos.

En el contexto de un modelo AC vectorial, el grafo podría ser utilizado para representar las entidades que en el modelo raster se representan como celdas regulares. En este caso, cada nodo en el grafo representa una parcela catastral con todas sus características (figura 2). Además, no sólo se almacena la parte gráfica de la entidad, también las relaciones espaciales entre las distintas parcelas (que podría ser la vecindad), utilizando las aristas. De esta forma se evita la necesidad de leer la estructura vectorial del parcelario catastral en cada iteración, conservando la topología a través del grafo. Así, una arista conectará dos parcelas que son consideradas como vecinas, y, consecuentemente, sería posible calcular el efecto de la vecindad, teniendo en cuenta todas las parcelas consideradas como vecinas para cada parcela.

Cada nodo y cada arista almacenarán toda la información necesaria para que el modelo opere (identificador de la parcela, uso, año de desarrollo, aptitud, accesibilidad a la red de comunicaciones, zonificación legal, etc.), por lo tanto será posible calcular todos factores del modelo AC utilizando esta estructura, y aplicar en función de estos las correspondientes reglas de transición. Los resultados de la ejecución del modelo pueden ser después transferidos a cada parcela catastral y reproducir así el resultado espacial.

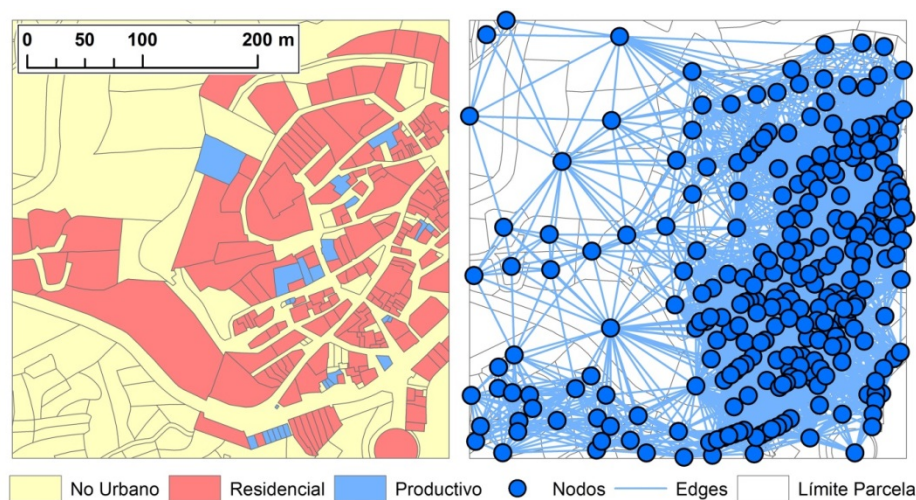


Figura 2. Representación de la estructura de parcelas catastrales mediante un grafo.

3. IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

El modelo ensayado a partir de este prototipo está basado en el esquema conceptual NASZ (White et al., 1997), uno de los más populares y utilizados en modelos basados en AC. Dicho esquema basa el crecimiento urbano en cuatro factores: vecindad, accesibilidad, adecuación y zonificación legal. A estos cuatro fundamentales se añade un factor estocástico que intenta reproducir la incertidumbre inherente a cualquier proceso urbano y social en general. Sin embargo, para simplificar este ensayo, no se ha incluido todavía este factor.

La **vecindad** es un factor crítico en un modelo AC vectorial, puesto que cada parcela es irregular y a su vez distinta del resto. Por lo tanto, no puede tratarse como un factor estático (así tratado en los modelos raster). Este factor define la influencia que ejercen las parcelas consideradas como vecinas sobre la parcela de estudio y su efecto dependerá del tipo de uso existente en cada parcela y la distancia que las separa. Así, es necesario llevar a cabo dos acciones: por un lado identificar las parcelas vecinas a cada una de las que forman el área de estudio y calcular su efecto (normalmente a través de una función cuyo valor varía en función de la distancia).

La **accesibilidad** mide el grado de acceso de cada parcela a una vía de comunicación. Este valor de accesibilidad se calcula para cada parcela utilizando una cobertura con carreteras nacionales, secundarias y viales urbanos. En este caso se obtiene como la distancia euclídea más corta desde la parcela a la vía de comunicación.

La idoneidad que cada parcela presenta para albergar un uso urbano se especifica a partir del factor de **adecuación**. Como en otros estudios, esta adecuación sintetiza variables que han demostrado ser determinantes en los procesos de expansión urbana como la altitud del terreno, pendiente, tipo de suelo, etc. En este caso se dispone de un valor medio por parcela. Los valores altos indicarán una mayor adecuación de la parcela a ser ocupada por un nuevo uso urbano.

Finalmente la **zonificación legal** hace alusión a la clasificación legal con las que aparecen esas parcelas en el Plan General de Ordenación Urbana. Esta clasificación se reduce aquí a urbanizado, urbanizable (es posible desarrollar nuevo uso residencial, industrial o comercial) y no urbanizable (no convertible en ningún tipo de uso urbano por estar bajo algún tipo de protección especial). En este caso este factor actúa como una máscara, permitiendo sólo el desarrollo en aquellas zonas contempladas como tales desde el punto de vista de la zonificación legal vigente.

Siguiendo la ecuación 2, la combinación de estos cuatro factores (NASZ): N vecindad, A accesibilidad, S adecuación y Z zonificación legal, da como resultado un valor potencial de transición o desarrollo por parcela, siendo P el valor de potencial de transición de desarrollo a un determinado uso del suelo k en la parcela i . La sumatoria N indica la suma del efecto que todas las parcelas vecinas “ j ” ejercen sobre la estudiada “ i ”.

$$P_{i,k} = \left(\sum_{j=1}^n N_{i,j} \right) A_i S_i Z_i \quad (2)$$

El prototipo ha sido diseñado en Python, combinando librerías comerciales como ArcPy de ArcGIS (ArcGis, 2012) con otras librerías *open source* como OGR de GDAL para la gestión de datos espaciales (Foundation, 2008) o Networkx para crear y gestionar grafos (Hagberg et al., 2008), además de todas las librerías y funciones propias del lenguaje.

El prototipo está diseñado para simular dos tipos de usos de suelo urbano: residencial y productivo (que incluiría zonas industriales y comerciales), obteniendo un mapa de futuros desarrollos a nivel de parcela en cada iteración (un año). La demanda establecida como umbral en cada iteración está basada en las tendencias registradas en los últimos 10 años.

La simulación comienza con la situación urbana registrada en el año 2010. Cada parcela catastral existente (urbana o rural) parte con información sobre dimensión, tipo de uso, año de desarrollo (si es el caso), adecuación, zonificación legal y accesibilidad. La vecindad ha sido calculada en un corredor de 500m desde cada parcela, considerando como vecina de la parcela de referencia toda parcela que se encuentre total o parcialmente en dicho corredor, almacenándose así en la tabla de atributos de la cobertura vectorial de partida.

Una vez se ha recopilado toda la información temática necesaria en la tabla de atributos de las parcelas catastrales vectoriales, el prototipo genera una representación de esta cobertura en forma de grafo, con un nodo para cada parcela (figura 2) y una arista entre cada parcelas y sus vecinas (calculando el efecto que ejercen las vecinas sobre la parcela estudiada como la suma de los efectos individuales, ecuación 2). Una vez se ha completado el grafo, el prototipo procede en su primera iteración a determinar todas las parcelas vacantes, se aplica las reglas de transición y se obtienen las parcelas susceptibles de ser desarrolladas en algún tipo de uso urbano (residencial o productivo). En las siguientes iteraciones se implementa el lapso temporal anual, de tal forma que la ejecución del modelo se retroalimenta con la solución alcanzada en cada iteración, recalculándose en función del nuevo estatus alcanzado. Cuando se ha llegado al final de las iteraciones, el resultado es transferido al mapa de parcelas catastrales, actualizándose todos los nodos y aristas con la información obtenida tras la ejecución del modelo (figura 3).

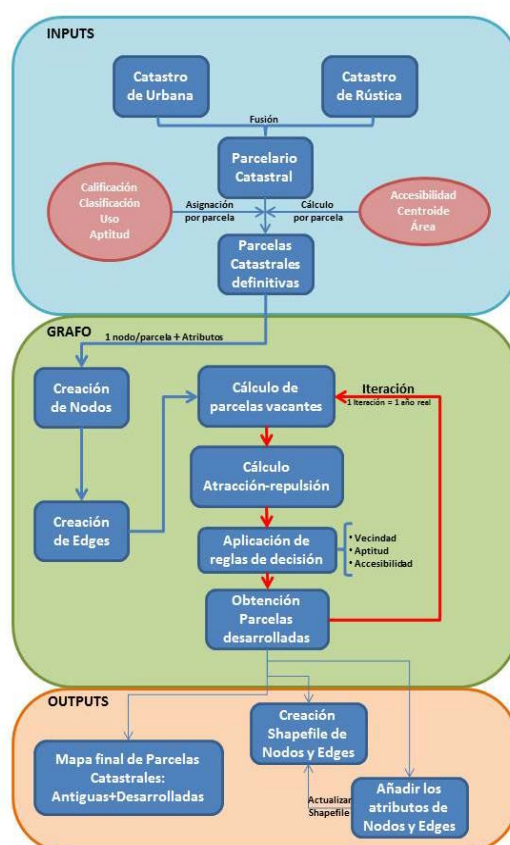


Figura 3. Flujo-diagrama del prototipo.

4. CASO DE ESTUDIO

Como ya se ha mencionado, el prototipo ha sido probado en un municipio de la región de Madrid, una de las áreas más urbanizadas de Europa y que ha experimentado un fuerte proceso de expansión en las últimas dos décadas debido a la burbuja inmobiliaria (Plata Rocha et al, 2009). Dentro de esta región de más de 6 millones de habitantes, se ha seleccionado un municipio de una de las zonas más dinámicas e importantes desde el punto de vista urbano e industrial de la región: el Corredor del Henares, que se extiende desde Madrid hasta Guadalajara siguiendo dos vías de comunicación de primer orden (la nacional A-2 y la vía de ferrocarril Madrid-Barcelona), así como un importante curso fluvial (el río Henares). La influencia y expansión hacia el norte y el sur de este privilegiado corredor se ha dejado notar en los últimos años, pero todavía existen algunos municipios, como el propuesto en este ensayo, con posibilidades de desarrollo para los que no deberíamos dejar de pasar la oportunidad de realizar una planificación más equilibrada y sostenible. Así, Los Santos de la Humosa se configura como un lugar idóneo para el desarrollo y puesta en práctica de instrumentos que permitan mejorar la gestión del crecimiento urbano.

Partiendo de la situación de 2010, el prototipo se ejecutó en 10 iteraciones, estableciendo como horizonte temporal el año 2020. El mayor coste computacional se registra en la creación de la estructura espacial del nodo, partiendo en este caso de una situación inicial de más de 3000 parcelas y alrededor de 200.000 aristas. Una vez creada esta estructura, la ejecución de las reglas de transición y demás factores del modelo se ejecuta de manera relativamente rápida. Los resultados de este ensayo aparecen en la figura 4.

En esta simulación-ensayo, la mayor parte de las nuevas zonas urbanas se han desarrollado alrededor de las ya existentes en 2010. También podemos comprobar que, debido al efecto de la vecindad, las nuevas áreas productivas se han desarrollado en el Sur del municipio. En general, es posible confirmar que se ha evitado la ocupación de la mayor parte de las parcelas rurales todavía existentes, preservando por tanto las áreas de mayor calidad natural.

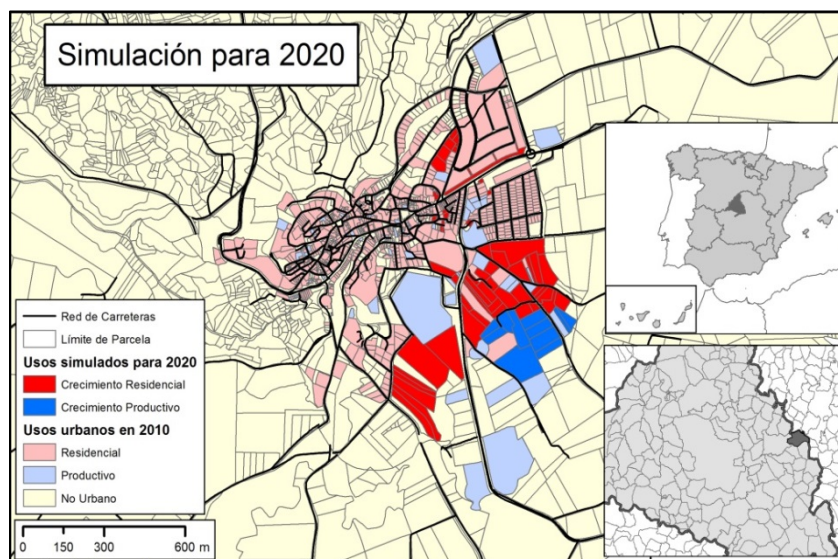


Figura 4. Resultados preliminares del prototipo probado en el municipio de Los Santos de la Humosa (Madrid).

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En general podemos confirmar la viabilidad de implementar un modelo que combine las características propias de uno basado en AC clásico, con nuevas técnicas de teselación del espacio. La representación de la estructura espacial de partida habitual en las tareas de planificación en el contexto nacional puede quedar resuelto a través de las parcelas catastrales y su abstracción al grafo. Esta abstracción permite simplificar un problema computacional que sigue siendo demasiado costoso y poco viable si utilizamos la estructura vectorial original. La utilización del grafo, por tanto, resulta indiscutiblemente más operativa: permite tener identificada cada parcela y almacenar todos sus atributos temáticos, además de identificar y representar la vecindad de las parcelas (factor decisivo en este tipo de modelos) de manera eficiente; proporciona una estabilidad topológica y el estatus del grafo puede ser consultado en cualquier momento de la ejecución del modelo y todos los atributos (de nodos y aristas) pueden ser modificados si es necesario.

No obstante, el tratamiento de algunos de los factores del modelo han de seguir siendo investigados y mejorados. En el caso de la accesibilidad, sería interesante hacer distinción entre una carretera nacional y una secundaria, por ejemplo, incluyendo en su cálculo el tipo de carretera, el tráfico soportado o datos de movilidad para poder generar un factor de accesibilidad más realista.

Por otro lado, en la actual versión la aplicación de las reglas de transición está basada en umbrales. En cada iteración las parcelas vacantes almacenan un valor de transición potencial a uso residencial y un valor de transición potencial a uso productivo. Si en algún caso una parcela tiene el mismo valor para los dos usos, el sistema decide aleatoriamente, pero siempre le asignará uno de los dos usos. Sería conveniente que el proceso no se completase para cada parcela, sino que se desarrollasen sólo aquellas con el potencial más elevado y así evitar la urbanización masiva del conjunto parcelario.

Hemos de advertir que en este ensayo no se ha realizado ningún proceso de calibración de los factores y reglas de transición, lo que sin duda sería necesario para desarrollar un modelo robusto.

Finalmente, en este prototipo tampoco se ha incluido todavía el factor de aleatoriedad, ampliamente utilizado en este tipo de modelos (García et al., 2011). No obstante, podría ser incluido de diversas formas. Por ejemplo, puede ser introducido en el cálculo del potencial de transición, modificando el valor calculado para el resto de factores. Podría también incorporarse a través del factor de zonificación legal, estableciendo cierta aleatoriedad en el desarrollo de todas las parcelas, estén catalogadas como urbanizables o no, pues es sabido que muy a menudo en nuestro país acaban desarrollándose parcelas que no estaban programadas como tales inicialmente en el PGOU del municipio.

Otra de las limitaciones que podemos evidenciar es la imposibilidad en este punto de desarrollo del prototipo de subdividir parcelas con una extensión considerable. Resultaría de gran interés poder realizar algún tipo de partición en función de la cantidad de suelo demandada.

En definitiva, se ha demostrado la viabilidad de la elaboración de un modelo de simulación de

crecimiento urbano empleando como base espacial el parcelario catastral vectorial. Además, la limitación computacional se ha solventado mediante la aplicación de la teoría de grafos, consiguiéndose reproducir los elementos constituyentes de un modelo raster basado en AC en un entorno sustancialmente diferente. La mejora en la modelización de factores y la calibración del prototipo en un tiempo pasado se presentan como las labores de investigación futura para afianzar el presente trabajo.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta comunicación se ha realizado dentro de las actividades del proyecto de investigación coordinado *SIMURBAN2: Instrumentos de Geosimulación y planificación ambiental en la ordenación territorial de ámbitos metropolitanos. Aplicación a escalas intermedias*, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través de la convocatoria 2012 de proyectos del VI Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011 y con referencia CSO2012-38158-C02-01 (Subproyecto *Geosimulación de escenarios futuros de crecimiento urbano a partir de información espacial de detalle y valoración de sus resultados desde la planificación ambiental*). Además el primer autor ha realizado este trabajo bajo el soporte de una “Ayuda para la Formación de Personal Investigador” de la Universidad de Alcalá en su convocatoria de 2012 (FPI-UAH).

7. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, F., Valenzuela, L.M., Botequilha-Leitao, A., (2011): Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: A case study in a Spanish metropolitan area. *Landscape and Urban Planning*, 99(3-4), 226-238.
- Alberti, M., Marzluff, J.M., (2004): Ecological resilience in urban ecosystems: linking urban patterns to human and ecological functions. *Urban ecosystems*, 7(3), 241-265.
- Bardají, E., (2011): El planeamiento de escala intermedia como corazón del planeamiento español: una propuesta de nueva organización de las figuras de planeamiento. *Ciudad y territorio: Estudios territoriales XLIII CUARTA ÉPOCA*, (169-170), 579-585.
- Barredo, J.I., Demichelli, L., Lavallo, C., Kasanko, M., McCormick, N., (2004): Modelling future urban scenarios in developing countries: an application case study in Lagos, Nigeria. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(1), 65-84.
- Batty, M., (1998): Urban evolution on the desktop: simulation with the use of extended cellular automata. *Environment and Planning A*, 30, 1943-1967.
- Batty, M., (2007): *Cities and complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. The MIT press.
- Berling-Wolff, S., Wu, J., (2004): Modeling urban landscape dynamics: a case study in Phoenix, USA. *Urban ecosystems*, 7(3), 215-240.
- Briassoulis, H. (2000): *Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches*. Regional Research Institute, West Virginia University. Disponible en (Abril 2015): <http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm>
- Dietzel, C., Clarke, K.C., (2004): Spatial Differences in Multi-Resolution Urban Automata Modeling. *Transactions in GIS*, 8(4), 479-492.
- Foundation, O.S.G.,(2008): GDAL-OGR: Geospatial Data Abstraction Library/Simple Features Library Software.
- Hagberg, A., Swart, P., S Chult, D., (2008): *Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX*. Los Alamos National Laboratory (LANL).
- Jantz, C.A., Goetz, S.J., (2005): Analysis of scale dependencies in an urban land-use-change model. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2), 217-241.
- Jokar Arsanjani, J., Helbich, M., Kainz, W., Darvishi Bolorani, A., (2013): Integration of logistic regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 265-275.

- Leao, S., Bishop, I., Evans, D., (2004): Simulating urban growth in a developing nation's region using a cellular automata-based model. *Journal of Urban Planning and Development*, 130(3), 145-158.
- Li, X., Yang, Q.S., Liu, X.P., (2008): Discovering and evaluating urban signatures for simulating compact development using cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 86(2), 177-186.
- Liu, Y., (2012): Modelling sustainable urban growth in a rapidly urbanising region using a fuzzy-constrained cellular automata approach. *International Journal of Geographical Information Science*, 26(1), 151-167.
- Ménard, A., Marceau, D.J., (2005): Exploration of spatial scale sensitivity in geographic cellular automata. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32 (5), 693-714.
- Mitsova, D., Shuster, W., Wang, X.H., (2011). A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth with open space conservation. *Landscape and Urban Planning*, 99(2), 141-153.
- Moreno, N., Ménard, A., Marceau, D.J., (2008): VecGCA: a vector-based geographic cellular automata model allowing geometric transformations of objects. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 35(4), 647-665.
- Moreno, N., Wang, F., Marceau, D.J., (2009): Implementation of a dynamic neighborhood in a land-use vector-based cellular automata. *Computers Environment and Urban Systems*, 33(1), 44-54.
- O'Sullivan, D., (2001a): Exploring spatial process dynamics using irregular cellular automaton models. *Geographical Analysis*, 33(1), 1-18.
- O'Sullivan, D., (2001b): Graph-cellular automata: a generalised discrete urban and regional model. *Environment and Planning B*, 28(5), 687-706.
- O'Sullivan, D., Torrens, P., (2000): *Cellular Models of Urban Systems*, CASA Working Paper Series. London, Centre for Advanced Spatial Analysis (University College London),
- Paegelow, M. y Camacho, M.T (2008): *Modelling Environmental Dynamics*. Berlin, Springer-Verlag.
- Pinto, N.N., Antunes, A.P., (2010): A cellular automata model based on irregular cells: application to small urban areas. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37(6), 1095-1114.
- Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J., (2009): Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la Comunidad de Madrid (1990-2000). *Scripta Nova*, Vol. XIII (293).
- Sante, I., Garcia, A.M., Miranda, D., Crecente, R., (2010): Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis. *Landscape and Urban Planning*, 96(2), 108-122.
- Semoloni, F., (2000): The growth of an urban cluster into a dynamic self-modifying spatial pattern. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 27(4), 549-564.
- Shafizadeh Moghadam, H., Helbich, M., (2013): Spatiotemporal urbanization processes in the megacity of Mumbai, India: A Markov chains-cellular automata urban growth model. *Applied Geography*, 40, 140-149.
- Shi, W.Z., Pang, M.Y.C., (2000): Development of Voronoi-based cellular automata - an integrated dynamic model for Geographical Information Systems. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(5), 455-474.
- Stevens, D., Dragicevic, S., (2007): A GIS-based irregular cellular automata model of land-use change. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 34(4), 708-724.
- Stevens, D., Dragicevic, S., Rothley, K., (2007): iCity: A GIS-CA modelling tool for urban planning and decision making. *Environmental Modelling & Software*, 22 (6), 761-773.
- Triantakostas, D., Mountrakis, G., (2012): Urban Growth Prediction: A Review of Computational Models and Human Perceptions. *Journal of Geographic Information System*, 4(6), 555-587.
- Velasco Martín-Varés, A. (2009): La importancia de llamarse parcela catastral. *Revista de la Red de Expertos Iberoamericanos en Catastro*, 4, 13-21.
- Verburg, P.H., Schot, P.P., Dijst, M.J., Veldkamp, A., (2004): Land use change modelling: current practice and research priorities. *GeoJournal*, 61(4), 309-324.

- White, R., Engelen, G. (1993): Cellular-Automata and Fractal Urban Form –a Cellular Modeling Approach to the Evolution of Urban Land-Use Patterns. *Environment and Planning A*, 25 (8), 1175-1199.
- White, R., Engelen, G., Uljee, I., (1997): The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24(3), 323-343.
- Wu, F., (2002): Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions. *International Journal of Geographical Information Science*, 16(8), 795-818.
- Zhang, Q., Ban, Y., Liu, J., Hu, Y., (2011): Simulation and analysis of urban growth scenarios for the Greater Shanghai Area, China. *Computers, Environment and Urban Systems*, 35(2), 126-139.