

## **PREDICCIÓN DEL CRECIMIENTO URBANO MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y MODELOS BASADOS EN AUTÓMATAS CELULARES<sup>1</sup>**

AGUILERA BENAVENTE, F.

Laboratorio de Urbanismo y Ordenación del Territorio. Universidad de Granada.

Campus de Fuente Nueva, Edificio Politécnico s/n, 18071 Granada, España.

e-mail: [franab@ugr.es](mailto:franab@ugr.es)

### **RESUMEN**

En este trabajo se presentan dos modelos de predicción del crecimiento urbano elaborados para el Área Metropolitana de Granada, junto con la cartografía del crecimiento urbano de dicha zona en los últimos 30 años. Los modelos de predicción elaborados están basados uno en la regresión logística y otro en Autómatas Celulares. Para la calibración y validación de estos modelos se han realizado varias simulaciones ex – post para el período 1984-1999, que han sido comparadas mediante distintos métodos con la cartografía elaborada correspondiente a dicha fecha, mostrando los resultados una mayor fiabilidad para el modelo basado en autómatas celulares. Finalmente se ha empleado este modelo para realizar un escenario futuro de crecimiento para la fecha de 2014.

Palabras clave: Predicción del crecimiento urbano, regresión logística, autómatas celulares, sistemas de información geográfica.

### **PREDICTION OF URBAN GROWTH USING GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS AND CELLULAR AUTOMATA BASED MODELS**

#### **ABSTRACT**

In this article we present two urban growth prediction models developed specifically for the Granada Metropolitan Area, and the cartography of urban growth in the latest 30 years. The two growth prediction models developed are based first on logistic regression and second on Cellular Automata. For the calibration and validation of these models we have made several simulations ex-post for the 1984-1999 period. These have been compared, using different methods, to the cartography of this year. The results indicate that the cellular automata model produces a realistic prediction of the urban growth patterns. Finally, we have used the cellular automata model to generate an urban growth scenario for 2014.

Keywords: Urban growth prediction, logistic regression, cellular automata, geographic information systems.

## 1. Introducción

La comarca de la Vega de Granada se encuentra emplazada en la depresión del Río Genil, situada a los pies del Macizo montañoso de Sierra Nevada, el más alto de la península Ibérica, constituyendo un territorio muy bien diferenciado de su entorno, hasta el punto de poder ser considerado una zona aislada ([figura 1](#)). Su ubicación dentro de la península Ibérica la encontramos en el Sudeste, perteneciendo a la región Andaluza. Esta comarca constituye la principal aglomeración urbana de la zona más oriental de Andalucía (provincias de Granada, Jaén y Almería), con una población de 450 mil habitantes en 2003.

A lo largo de la historia, las condiciones naturales de su entorno y la transformación llevada a cabo por el hombre, han conformado esta región como "un paisaje agrario singular", con un predominio de rentas agrícolas hasta hace pocas décadas, y un territorio marcado por una compleja red hidrográfica (formada por 3 ríos, Dílar, Beiro y Genil, y un intrincado sistema de acequias) y de caminos articulados por ésta (Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía, 1999; Menor, 1998).

Sin embargo, y al igual que el resto del país, a partir de la década de los 70, el proceso de transformación acontecido en la comarca de la Vega de Granada ha sido de una importancia muy considerable, siendo una de sus dimensiones más importantes el elevado crecimiento del suelo urbanizado experimentado en este período, lo que ha culminado con la metropolitanización de la comarca Granadina.

Este fenómeno de metropolitanización también está aconteciendo en las últimas décadas en otros espacios de la Europa Meridional, como muestran los trabajos de Font *et al.* (2004). Como ocurre en estas otras metrópolis, el proceso de crecimiento del suelo urbanizado y de construcción de infraestructuras, afecta a los paisajes naturales (muchos de ellos con importantes valores ambientales y naturales) en los que se produce el proceso de expansión, ocasionando su disminución en tamaño o su fragmentación (Berling-Wolff y Wu, 2004), y dando como resultado la homogeneidad del paisaje y la pérdida de diversidad regional (Antrop, 2000). Estos procesos de fragmentación se consideran negativos por sus efectos sobre la agricultura y la preservación de zonas naturales (Hidding y Teunissen, 2002), así como para el mantenimiento de la diversidad y morfología de los hábitats. En el caso concreto de la comarca de la Vega de Granada han supuesto una pérdida de suelo de alto valor ecológico, agrícola y paisajístico; sin perjuicio de que, afortunadamente, de momento se siga conservando una riqueza paisajística relevante.

Los impactos generados (pérdida de suelo de alto valor productivo, pérdida de la capacidad de infiltración del acuífero, pérdida de biodiversidad, incremento de la presión sobre las zonas de interés ecológico y paisajístico, saturación de las vías de comunicación, mayor dependencia del vehículo privado...) por la expansión urbana hacia un modelo de ciudad dispersa, han despertado el interés en tratar de identificar cuales son los factores que dirigen el crecimiento urbano hacia determinadas zonas y no hacia otras, así como intentar construir modelos que muestren escenarios

futuros de crecimiento y que ayuden a predecir las tendencias actuales y las consecuencias de las distintas acciones que se realizan a día de hoy, todo ello con el objetivo de rediseñar nuevas estrategias de desarrollo más equilibrado y respetuoso con el entorno. Para Itami (1994) el crecimiento de la concienciación y la preocupación por problemas ambientales hace necesario ahora más que nunca desarrollar teorías y metodologías que nos permitan comprender los procesos naturales y humanos como sistemas dinámicos complejos. Un ejemplo de estas metodologías es el empleo de modelos basados en autómatas celulares para acercarnos al conocimiento del fenómeno de crecimiento urbano, dada su capacidad para la representación de estos procesos urbanos complejos, que a su vez ha quedado ampliamente descrita en la bibliografía en trabajos como los de White y Engelen (1997) o los de Barredo *et al.* (2004).

En este contexto encaja el objetivo central del presente artículo, que no es otro que tratar de comprender mejor el fenómeno del crecimiento urbano mediante la identificación de algunos de los factores motrices del mismo, tratando de evaluar el grado de correlación existente con dichos factores. Igualmente se presenta un modelo predictivo del crecimiento urbano, que permita diseñar con una mayor perspectiva nuevas estrategias futuras de desarrollo más equilibrado, territorial y ambientalmente hablando. Partimos pues de la hipótesis de que existe una correlación relevante entre una serie de variables y el fenómeno del crecimiento urbano, y de que es posible construir un modelo que nos muestre, aunque sea de una forma orientativa y en lo que a patrones se refiere, cómo, donde y cuánto va a crecer el área urbana en los próximos años, y que nos ayude a intentar responder a la pregunta de ¿qué factores son los que hacen impulsar el desarrollo urbanístico?

Para alcanzar estos objetivos empleamos la capacidad de análisis de los S.I.G., junto con las herramientas de análisis espacial, lo que nos permite explorar los niveles de correlación entre variables así como llevar a cabo medidas de las formas y crecimientos urbanos (Berling-Wolf y Wu, 2004). Igualmente se emplea un modelo basado en autómatas celulares. Estos modelos generados nos pueden permitir valorar los resultados de las distintas actuaciones que se planteen en el territorio como apuntaban Barredo *et al.* (2003), además de ser un interesante herramienta tanto de discusión como de divulgación de las posibles tendencias de crecimiento y desarrollo de las zonas urbanas, a través de la generación de escenarios.

Así pues, en este trabajo se ha elaborado la cartografía del crecimiento urbano del área metropolitana de Granada desde 1970 hasta 2003, se han cartografiado un conjunto de variables como posibles factores explicativos del crecimiento, se ha realizado un análisis del grado de correlación entre dichos factores y el crecimiento urbano mediante regresión logística, y finalmente se ha construido un modelo basado en Autómatas Celulares para realizar una predicción del crecimiento del área metropolitana en los próximos 15 años.

## 2. Modelos de predicción

Según el diccionario de la Real Academia de la Lengua Española, entendemos por modelo un esquema teórico generalmente en forma matemática de un sistema o realidad compleja, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento. Englobados dentro del concepto general de modelo, encontramos aquellos que tratan sobre cambios en los usos del suelo

cuyo objetivo directo es la transición entre usos (Briassoulis, 2000). Nuestro interés se centrará, dentro de estos modelos, en los que estudian el crecimiento de las zonas urbanas.

Batty (1997b) sitúa en los años 50 los primeros intentos de construir modelos matemáticos de los sistemas urbanos, siendo la introducción de los computadores uno de los hechos que hizo comenzar la auténtica revolución en el desarrollo de estos modelos, al incrementarse enormemente la capacidad de análisis y cómputo existente hasta entonces (Berling-Wolff y Wu, 2004). El creciente interés por la modelización de estos procesos se traduce en la proliferación de distintos tipos de modelos diseñados para el estudio de fenómenos urbanos. A continuación se señalan algunos de los distintos modelos identificados por Berling-Wolff y Wu (2004):

1. Los primeros modelos empleados en estudios para la planificación del transporte, estaban generalmente basados en la teoría de la gravedad o en matemática lineal. Modificaban las ecuaciones de Newton para la gravedad y establecían que la atracción, por ejemplo entre dos ciudades era directamente proporcional al tamaño de la ciudad e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separaba. Algunos modelos de este tipo son los elaborados por Foot o el modelo de Lowry.

2. Posteriormente, aparecieron modelos de ubicación de actividades, que tenían como objetivo el determinar las zonas de residencia, zonas industriales, comerciales, etc. Estos modelos estaban basados en la teoría del lugar central, que asumía que cada familia se desplaza al centro más cercano que pudiera satisfacer el objetivo de su viaje. Otros modelos se desarrollaron con el objetivo de simular el mercado urbano, como el de Herbert-Stevens, que se basaba en la oferta y demanda existente para cada residencia, pero que no tenía representación espacial.

3. A continuación se desarrollaron nuevos modelos integrados, que incluían usos del suelo y modelos de transporte, algunos de los cuales fueron operativos; pero no fue hasta finales de los 70, cuando se empezaron a desarrollar modelos con elementos dinámicos que podían modelizar mejor las dinámicas espaciales. Una de las herramientas matemáticas que permitía realizar este propósito son los autómatas celulares (AC) diseñados por Von Neuman y Stanislaw Ulam en los años 40.

4. En estos últimos años, y en el marco de un creciente interés por la modelización de fenómenos complejos, los modelos predictivos del crecimiento urbano basados en autómatas celulares han experimentado un enorme auge (White y Engelen, 1997; Torrens, 2000; Barredo *et al* 2003; Berling-Wolff y Wu, 2004) Para White *et al* (1997) estos autómatas celulares se pueden entender como sistemas espaciales dinámicos muy simples en los que el estado de cada celda depende de los estados previos de las celdas vecinas, de acuerdo con un conjunto de reglas de transición.

Estos modelos se han vuelto tan populares gracias a su manejabilidad, su capacidad de generar dinámicas que reproducen bien los procesos tradicionales de cambio basados en la difusión (ya descritos por Haggett ¿qué año?, pag. 312)..., pero además porque son capaces de reproducir fenómenos que muestran complejidad desde el punto de vista de dinámicas determinísticas no lineales, pudiendo simular algunos procesos de cambio de los más recientes y sorprendentes (De Almeida *et al*, 2003). Batty (1997) señala cómo las ciudades crecen principalmente a causa de

acciones que tienen lugar a nivel local e individual, de modo que su morfología puede ser entendida desde su nivel más descentralizado y local, haciendo del todo idóneo el empleo de modelos que representen los procesos urbanos desde un enfoque de "abajo arriba" (botton-up), y que simulen las ciudades como conjuntos de elementos básicos que actúan como células, que crecen y cambian.

White y Engelen (2000) recogen de manera sintética las ventajas de estos modelos en los siguientes puntos:

1. Son inherentemente espaciales, al estar típicamente definidos para una malla ráster, y se pueden compatibilizar con datos geográficos existentes
2. Son dinámicos y pueden representar procesos espaciales de forma directa
3. Son adaptables a un amplio rango de situaciones
4. Son simples, lo que equivale a una gran facilidad de cálculo
5. Están basados en un conjunto de reglas, que pueden reflejar un elevado número de comportamientos espaciales
6. A pesar de su simplicidad pueden exhibir comportamientos extraordinariamente ricos.

Por todo ello, son muchos los modelos de este tipo que han aparecido en los últimos tiempos. Ejemplos de ellos son los desarrollados por White y Engelen (1997, 2000), White *et al* (1997), Barredo *et al* (2003) y Barredo *et al* (2004), que han venido construyendo modelos de este tipo con importante éxito. En la [tabla 1](#) se muestra un cuadro resumen con varios de los modelos de estos autores y algunas de sus características. Se ha considerado el ámbito del modelo, el período de tiempo considerado a la hora de realizar las distintas predicciones, las variables empleadas, las distintas categorías de usos, la extensión de la vecindad contemplada y los parámetros empleados a la hora de comprobar la validez del modelo.

Sin embargo, la escasez de modelos de este tipo aplicados en ámbitos urbanos y metropolitanos mediterráneos incentiva y estimula nuestro trabajo para la elaboración de un modelo basado en autómatas celulares diseñado para una ciudad de nuestro ámbito geográfico más cercano.

### 3. Teoría de Autómatas Celulares

Los autómatas celulares fueron diseñados por John Von Neuman y Stanislaw Ulam, aunque la idea de Autómata Celular pertenece a Alang Turing y su máquina universal (Torrens, 2000). Podemos definir un autómata celular como un sistema dinámico formado por un conjunto de elementos sencillos idénticos entre sí, pero que en conjunto son capaces de demostrar comportamientos complejos (Wolfram, 1984). En ellos el estado de cada elemento, depende del estado previo de los elementos vecinos, según un conjunto de reglas de transición (White *et al*, 1997).

De acuerdo con estos planteamientos, así como los descritos en Muñoz (1996), Torrens (2000) y White *et al* (2000) acerca de la estructura de un *Autómata Celular* podemos definir 5 componentes básicos:

- Un plano bidimensional o un espacio n-dimensional dividido en un número de subespacios homogéneos, conocidos como celdas. A todo esto se le denomina *Teselación Homogénea*. En el caso de la integración de los autómatas en un SIG, esta teselación es bidimensional y hace referencia a la malla raster empleada.
- Cada celda puede estar en uno de un *conjunto finito* de estados.
- Una *Vecindad* definida para cada celda, la que consiste en un conjunto contiguo de celdas. Esta vecindad puede estar formada por las celdas inmediatamente contiguas a la celda en cuestión ([figura 2](#)) (vecindad de Von Neuman ,4 celdas, o vecindad de Moore, 8 celdas) o en el caso de modelos mas complejos como los desarrollados por White *et al* (1997) en el que emplean una vecindad de 112 celdas y Barredo *et al* (2003) de 172.
- Una *Regla de Evolución*, la cual define el estado de cada celda, dependiendo del estado inmediatamente anterior de su vecindad.
- Un *Reloj Virtual de Cómputo*, el cual generará "tics" o pulsos simultáneos a todas las celdas indicando que debe aplicarse la regla de evolución y de esta forma cada celda cambiará de estado. En el caso de los modelos que integran SIG y autómatas celulares, se suele hablar de iteraciones, de tal modo que cada iteración supone una aplicación de la regla de evolución y un consiguiente cambio (o no) de estado.

#### 4. Cartografía del crecimiento urbano y de variables empleadas

En primer lugar se ha llevado a cabo la cartografía del crecimiento urbano del área de estudio desde 1970 hasta 2003. El área de estudio engloba distintos municipios del área metropolitana de la Vega Granada, y más concretamente está formada por 9 hojas correspondientes a la cartografía 1:10000 de la Comunidad Autónoma de Andalucía, editada por el Instituto Cartográfico de Andalucía ([figura 3](#)). Igualmente se ha procedido al cartografiado de las variables consideradas en el análisis de correlación.

##### 4.1. Cartografía del crecimiento urbano

El período para el cual se ha llevado a cabo el estudio comprende desde 1970 hasta 2003, lapso de tiempo, de más de 30 años, lo suficientemente amplio como para observar el proceso de crecimiento urbano. De hecho, estudios como el de Barredo *et al* (2003) para la ciudad de Dublín, con un lapso de tiempo de unos 30 años (1968-1998); o como el de López *et al* (2001) para el caso de Morelia (México), de 35 años, emplean períodos de tiempo similares.

Para la elaboración de esta cartografía se han empleado como fuentes la fotografía aérea en blanco y negro de los vuelos de 1956 y 1977 y las ortofotografías de 1999 y 2003, con 1 metro y ½ metro de resolución respectivamente. Igualmente se han empleado los trabajos previos existentes en Fernández (1997), en los que ya se realiza una primera zonificación del crecimiento del área metropolitana de Granada hasta 1995. Las fotografías aéreas de 1956 y 1977 han sido corregidas geométricamente mediante puntos de control, a partir de la ortofotografía de 1999 en ArcGIS 9.0.

A partir de la fotografía aérea de 1977 y los trabajos de Fernández (1997) se ha obtenido la cartografía de suelo urbano de 1970 mediante interpretación visual. Las zonas urbanas en 1984 se

han extraído de los trabajos de Fernández (1997) y las correspondientes a 1999 y 2003, de la interpretación de las ortofotografías de 1999 y 2003 respectivamente, también mediante interpretación visual, empleando como criterios, el brillo, la textura, y el color para el caso de la ortofotografía de 1999 en color.

Posteriormente se ha realizado una vectorización de las zonas urbanas identificadas, mediante el software ArcGIS 9.0 a escala 1:5000 y a continuación han sido rasterizados y exportados a IDRISI Kilimanjaro, software con el que se han realizado los análisis llevados a cabo en la investigación. El proceso de rasterizado se ha realizado empleando un tamaño de píxel de 50 metros, que en principio consideramos adecuado para, en la fase final, construir el modelo de predicción basado en AC.

La [figura 4](#) recoge el crecimiento del área metropolitana de Granada desde 1970 hasta 2003. Resulta llamativo el extraordinario crecimiento del suelo urbanizado en el período comprendido entre 1984 y 1999, con una expansión muy importante en la zona sur, así como los procesos de dispersión de la ciudad. La última imagen de la figura se corresponde con la situación en 2003, bastante similar a la de 1999.

En la [tabla 2](#) se aprecian los valores de superficie urbanizada en cada uno de los períodos contemplados en el estudio.

Podemos observar como se ha producido un incremento muy importante de la superficie ocupada en los últimos 20 años, pero especialmente en el período comprendido entre 1984 y 1999. Estos valores, coinciden de forma aproximada con los estimados por Fernández (1997), que ofrecía unas cifras de 1776 hectáreas para 1970, 2329 para 1984 y 4343 para 1995. Igualmente, Menor (1998) estimó también una superficie de 3581 para el año 1990, cifra que también se encuentra en la línea de lo determinado en el presente trabajo.

Este crecimiento urbano, como se deduce de la [figura 5](#) no se ha correspondido con un aumento similar en lo que a población se refiere, sino que supone un cambio en el modelo de crecimiento urbano, tendente a la consolidación del área metropolitana de Granada como una ciudad dispersa, con unos patrones de ocupación del territorio extensivos mediante urbanizaciones unifamiliares que se extienden por los núcleos que rodean la capital, generación de nuevas zonas comerciales en las cercanías de los nudos de la ronda de circunvalación; incremento del número de viviendas de segunda residencia; incremento del número de desplazamientos entre distintos núcleos y la capital, con 2,5 desplazamientos por persona y día... que apuntan claramente, como ya señalábamos, a la configuración de la Granada metropolitana como una ciudad dispersa, con una creciente segregación entre las zonas de trabajo y comercio y las de residencia.

#### 4.2. Variables

Junto con la cartografía del crecimiento urbano, que consideraremos la variable a explicar o dependiente, se ha construido una base de datos cartográfica de la zona de estudio que incluye distintos factores, tanto ambientales como sociales, que serán empleados en la fase de análisis como posibles variables explicativas del crecimiento urbano. Igualmente se ha generado una máscara de

análisis, que tiene como objetivo excluir a aquellas zonas en las que existe una imposibilidad, o una dificultad muy elevada en el período de tiempo considerado, de sufrir procesos de urbanización. Todas estas variables aparecen recogidas en la [tabla 3](#). Además, todas ellas se encuentran normalizadas, es decir, presentan una escala de medida común, con valores que oscilan entre 0 y 255.

En primer lugar, hemos considerado variables de proximidad, ya sea física (distancia a zonas urbanas), o en tiempo (accesibilidad) por ser, como señalan Cheng *et al* (2003), uno de los principales factores condicionantes del crecimiento urbano. Por otra parte, la red viaria y de transporte también desempeña un papel fundamental en el proceso de expansión urbana. Así mismo, las políticas de planeamiento también condicionan los procesos urbanos, y por ello han sido incluidas en el análisis representándose como *suelo urbanizable*. Las actividades socio-económicas son también uno de los principales motores de crecimiento y desarrollo, que pueden representarse como valor del suelo, empleos, densidad de población... Actualmente no disponemos de datos espaciales de este tipo para el área metropolitana de Granada, y por ello no han sido incluidos, aunque son de una importancia vital en este tipo de procesos urbanos, y con vistas a futuros trabajos deberán ser incluidos. Finalmente también se han considerado algunos factores ambientales, como pendiente y orientaciones, en el análisis de correlación, con el objetivo de cuantificar posibles obstáculos naturales al crecimiento urbano.

Las variables de *distancia a vías de comunicación* se han obtenido mediante el comando "DISTANCE" de IDRISI Kilimanjaro aplicado sobre las capas de viario de 1970, 1984 y 1999. El mismo comando se ha empleado para obtener la *distancia a zonas urbanas*, pero aplicado sobre la capa de suelo urbano de 1970, 1984 y 1999.

La variable de *pendientes y orientaciones* se han obtenido a partir del modelo digital de elevaciones, mediante análisis de superficies realizado con ArcGIS 9.0, con los comandos "SLOPE" y "ASPECT". Para el caso de las orientaciones, puesto que se trata de una variable que oscila entre 0 y 360 grados se ha realizado una reclasificación, de tal modo que se han generado 3 categorías de orientación en función de su aptitud hipotética: a la orientación sur (150-210°) se le ha asignado un valor máximo de "aptitud", para la norte (330-30°) se asignó un valor bajo, y a las este y oeste, valor medio de aptitud ([figura 6](#)).

La *accesibilidad a servicios básicos* se ha construido a partir de un inventario de colegios, institutos y hospitales existente y de una capa de impedancia o costes de transporte en tiempo, elaborada a partir del viario, para las fechas de 1970, 1984 y 1999. Estos costes de transporte se han construido asignando a cada píxel de la capa raster del viario, un tiempo necesario para atravesarlo, en función del tipo de vía al que correspondiese. Las velocidades asignadas corresponden con las máximas permitidas para cada tipo de vía, corregidas de acuerdo con el grado de congestión que presentaba cada una. Esta corrección se ha realizado de acuerdo con el conocimiento local acerca del funcionamiento de la red viaria del área metropolitana de Granada.

Una vez calculados los costes de transporte, se ha realizado, mediante ArcGIS 9.0 un análisis de proximidad con costes de transporte mediante el comando "COST WEIGHTED", para obtener el tiempo necesario en acceder desde cualquier lugar de la zona de estudio a los hospitales, colegios e institutos. Posteriormente, para su inclusión en el análisis se han convertido los valores

de tiempo de acceso en valores de 0 a 255, de tal modo que a menor tiempo de acceso, mayor valor en la escala de accesibilidad

El *suelo urbanizable* se ha obtenido de las distintas zonas identificadas como tales en los planes de ordenación de 1970 (Plan Comarcal de 1970), 1983 y 1999 (Plan de Ordenación del Territorio del Aglomeración Urbana de Granada)

Finalmente, también se ha construido una máscara de análisis en la que se eliminaban aquellas zonas tales como las zonas que ya eran urbanas, red viaria, así como las zonas destinadas a uso militar. Esta capa se ha denominado "*mask*" y se empleará en los sucesivos análisis y en el modelo de crecimiento como zonas en las que el crecimiento urbano no se podrá producir.

## 5. Metodología

Con la cartografía del crecimiento urbano y de las distintas variables a emplear en el análisis, a continuación se detalla el proceso seguido para la evaluación del grado de correlación y la elaboración del modelo de predicción, en función de la metodología basada en regresión logística y la basada en autómatas celulares.

### 5.1 Análisis mediante regresión logística

En primer lugar se ha llevado a cabo un análisis mediante regresión logística espacial para determinar el grado de correlación existente entre las distintas variables empleadas y el crecimiento urbano. Cheng y Masser (2003) ya señalan la importancia del hecho de conocer y comparar los distintos factores determinantes del crecimiento urbano, y emplean para el caso de Wuhan City (China) la regresión logística como método de análisis. En otros estudios como los de López *et al.* (2001) también se han empleado métodos de regresión (en este caso lineal) para predecir el crecimiento urbano en función del crecimiento poblacional, obteniendo unos resultados muy satisfactorios.

El método de análisis de regresión es una técnica estadística que permite examinar las relaciones funcionales entre variables. Existen distintos tipos de análisis de regresión que varían en función del número y la naturaleza de las variables involucradas y de la fórmula matemática capaz de describir la relación que las vincula. En nuestro caso hemos realizado un análisis de regresión mediante regresión logística para determinar el grado de correlación entre distintos factores (variables explicativas) y el crecimiento urbano acontecido en el área de estudio en los últimos 30 años, así como para tratar de estimar el comportamiento de dicho crecimiento en el futuro.

Este método lo podemos considerar pues un recurso muy eficiente para representar el vínculo funcional entre una variable binaria (como es el caso del crecimiento urbano), y un grupo de variables explicativas independientes.

El modelo logístico toma la forma siguiente:

$$\ln \frac{P}{1-P} = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (1)$$

Donde  $P$  representa la probabilidad de que se de un fenómeno determinado, que en nuestro caso será el hecho de que un píxel se transforme en urbano;  $x_1$  hasta  $x_n$  son las distintas variables explicativas contempladas en el análisis y  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros estimados por el método de la regresión logística. Para poder aplicar este método es condición necesaria que la variable a explicar, el crecimiento urbano en el caso que nos ocupa, sea una variable binaria, pudiendo tomar únicamente valores de 0 y 1.

El análisis de regresión logística viene incorporado en el software IDRISI Kilimanjaro, dentro del módulo CHANGE/TIME SERIES con la denominación "LOGISTICREG". El comando permite introducir una variable dependiente, la cual tratamos de explicar (variable binaria de crecimiento urbano), un conjunto de variables explicativas y una máscara de análisis, para excluir ciertas zonas del proceso de cálculo. En nuestro caso hemos empleado como zonas a excluir del análisis aquellas zonas que pertenecían a la categoría de urbano, así como aquellas zonas contempladas en la máscara de análisis,

La metodología empleada utiliza como valores de la variable dependiente los datos de crecimiento urbano correspondiente al período de 1970 a 1984 y 1984 a 1999, y como variables explicativas todas las comentadas pero referidas a la fecha de 1970 y 1984 respectivamente. El resultado ofrecido por el comando LOGISTICREG consiste en el cálculo de los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  y con ellos el de una nueva capa, que nos muestra la probabilidad de que cada píxel pase de la categoría "no urbano" a "urbano" en el período en cuestión, de acuerdo con las variables explicativas. También nos calcula el valor del parámetro estadístico ROC, (*Relative Operating Characteristic*) que es un excelente método para evaluar la validez del resultado de un modelo predictivo en el que se muestre la probabilidad de pertenecer a una categoría determinada (en nuestro caso suelo urbanizado), comparándola con una imagen binaria en la que se muestra realmente donde existe esa categoría. Sus valores oscilan entre 0 y 1, de modo que valores de 0,5 o menores indican ningún grado de correlación y valores cercanos a 1 indican un buen ajuste entre variables.

Así pues podemos decir que el parámetro ROC nos da una medida de la correlación existente entre la variable explicativa y la variable dependiente (el crecimiento urbano). Se ha realizado este tipo de análisis para cada una de las variables por separado, con el objetivo de valorar su grado de correlación con el crecimiento urbano de manera individual, y posteriormente se ha realizado un análisis empleando todas las variables, para intentar evaluar el grado de correlación global.

Una vez obtenida la imagen de probabilidad de cambio empleando todas las variables, ordenamos los píxeles de la capa resultante de mayor a menor probabilidad y seleccionamos como más probables nuevas zonas urbanas un número de píxeles que vendrá dado por la superficie que realmente se ha transformado en suelo urbano en el período contemplado. De esta forma obtenemos una predicción *ex post* de las zonas que, de acuerdo con las variables explicativas, deberían haber pasado a ser zonas urbanas para el período de 1984-1999. A continuación, el resultado de esta

predicción se compara con los datos de suelo urbano correspondientes a 1999 mediante diversos métodos, los cuales se detallan en el apartado 5.

De esta forma se obtiene tanto una primera predicción del crecimiento urbano en el área de estudio, como una valoración del grado de correlación existente entre las distintas variables explicativas y el crecimiento urbano, lo que nos será de gran importancia a la hora de elaborar un modelo predictivo basado en autómatas celulares, ya que se han tenido en cuenta aquellos factores que el análisis de regresión logística ha mostrado como más relevantes.

En el apartado de resultados se comparan los resultados obtenidos mediante todos los métodos empleados, incluyendo la regresión logística.

## 5.2. Modelo basado en AC

A la vista de los valores resultantes del análisis de regresión logística y de la bibliografía existente en este campo, se ha elaborado un modelo predictivo del crecimiento urbano basado en autómatas celulares y se ha implementado en IDRISI Kilimanjaro mediante el constructor de modelos que presenta dicho software.

Para ello se han empleado diversas variables, cuya influencia en el proceso de expansión urbana ha quedado patente en los resultados de la regresión logística. Posteriormente ha sido implementado en el MODELER de IDRISI. Se ha construido sobre la base teórica desarrollada por White *et al* (1997), aunque únicamente se ha contemplado una categoría única de urbanización, con objeto de facilitar la implementación en IDRISI, en lugar de las distintas categorías empleadas en el modelo de White *et al* (1997).

Para el modelo elaborado podemos detallar los distintos componentes que en el apartado 2 identificábamos para un autómata celular:

*Teselación*: se ha empleado una malla raster de 50 x 50 metros de tamaño de píxel, de dimensiones las del área de estudio.

*Conjunto finito de estados*: cada celda puede pertenecer a la categoría urbano (1) o no urbano (0)

*Vecindad*: se ha empleado una matriz de 9x9 celdas, lo que nos da una vecindad de 81 celdas.

*Regla de evolución*: al final de cada iteración del modelo se transforman en urbano (1) aquellas celdas con mayor potencial de transición.

*Reloj Virtual de Cómputo*: Cada iteración del modelo supone una aplicación de la regla de evolución. Estas iteraciones representan un año de crecimiento.

Como resultado del modelo, se obtiene un *potencial de cambio*, que nos muestra la tendencia que muestra cada píxel a la hora de transformarse en suelo urbano. Este potencial, para cada celda en el tiempo  $t$ , viene dado de forma genérica por la siguiente ecuación.

$${}^tP = f({}^tI, {}^tA, {}^tN, {}^tE) \quad (2)$$

Donde  ${}^tP$  es el potencial de cambio o transición,  ${}^tI$  la *potencialidad para la urbanización*,  ${}^tA$  la *accesibilidad* y  ${}^tE$  un parámetro de *perturbación aleatoria*. Todas estas variables pueden entenderse como los inputs, o parámetros requeridos por el modelo:

La *potencialidad para la urbanización* ( $I$ ) se ha calculado a partir de varios factores de los analizados mediante regresión logística. Representa la aptitud de cada píxel para ser ocupado por zonas urbanas, y depende de los valores de *pendiente* y *suelo urbanizable* en ese píxel. Estos 2 parámetros se han combinado mediante evaluación multicriterio. Presenta unos valores de 0 a 1 y viene dada por la capa *Potenci0\_1\_50m*. El resultado puede observarse en la [figura 7](#).

La *accesibilidad* ( $A$ ) viene dada por la distancia de cada píxel a los distintos elementos de la malla viaria. Se ha optado por utilizar la distancia como medida de la accesibilidad ya que como se verá en el apartado de resultados, existe mayor grado de correlación entre el crecimiento urbano y esta variable que para el caso de la accesibilidad a servicios básicos.

La *vecindad* ( $N$ ) es el componente de autómatas celulares del modelo. Consiste en una matriz de filtrado de  $9 \times 9$  celdas, mediante la cual se recalcula el valor de cada píxel de la capa de entrada (input del modelo), en función de los valores de los 80 píxeles circundantes. Mediante esta matriz, se multiplica el valor (0 o 1) de los píxeles vecinos por un determinado factor, que representa la influencia de los píxeles circundantes, y que muestra un efecto de decaimiento con la distancia ([figura 8](#)). Finalmente se suman todos los valores y se normaliza el valor resultante entre 0 y 1. Este efecto de decaimiento consiste en que la influencia de "atracción" de las zonas urbanas sobre los píxeles vecinos a la hora de desarrollarse nuevas zonas, se hace menor a medida que nos alejamos de ellas. Este mismo efecto ha sido planteado en otros modelos basados en autómatas celulares (White *et al*, 1997, 2000; Barredo *et al*, 2003, Barredo *et al*, 2004).

Este proceso se repite para todas las celdas existentes, obteniéndose así un potencial de transición en función de la vecindad.

El *parámetro estocástico* ( $E$ ) o de *perturbación aleatoria*. Este parámetro se emplea para tratar de replicar el grado de aleatoriedad inherente a los procesos sociales. White *et al* (1997) señalan cómo gracias a este parámetro, se consigue generar una simulación con un grado de "desorden" real, de modo que se consigan medidas similares a las reales de la dimensión radial, y viene dado por la ecuación:

$$v = 1 + (-\ln(rand))^\alpha \quad (3)$$

$rand$  es un número aleatorio entre 0 y 1

$\alpha$  es un parámetro que nos permite ajustar el grado de perturbación.

En nuestro caso hemos ajustado en principio el valor de  $\alpha$  al valor de la dimensión radial calculada para la región del área metropolitana de Granada, al igual que realiza Barredo *et al* (2003) para el caso de Dublín en Irlanda. La dimensión radial puede ser interpretada como la pendiente de la relación entre el tamaño de un objeto (por ejemplo, el número de celdas que conforman una ciudad) y su diámetro (Barredo *et al*, 2003). Para el área metropolitana de Granada hemos calculado su valor representando la superficie urbanizada en distintos radios crecientes en intervalos de un kilómetro, y obteniendo el valor de pendiente de la recta de regresión, obteniéndose un valor de 0,62.

Consideramos que la dimensión radial nos puede dar una idea del patrón de ocupación del suelo, como medida del grado de compacidad de la región metropolitana. De esta forma, valores elevados mostrarían una fuerte compacidad, mientras que valores bajos muestran un crecimiento más disperso.

Posteriormente se han llevado a cabo simulaciones con distintos valores de este parámetro  $\alpha$ .

Finalmente todos estos parámetros se combinan de acuerdo con la siguiente ecuación para darnos los valores de probabilidad de cambio:

$$P = I \times v \times 2A \times (N + I) \quad (4)$$

Todos los parámetros de esta ecuación, excepto para el caso de  $v$ , se encuentran en un rango de valores comprendido ente 0 y 1. La fuerte correlación existente entre el crecimiento urbano y la accesibilidad así como entre dicho crecimiento y la cercanía a zonas urbanas hace que en la ecuación exista un mayor peso de los factores de accesibilidad y vecindad. Sin embargo, en algunas de las simulaciones generadas, esta ecuación ha sido alterada ligeramente para evaluar distintos resultados del modelo.

Una vez que se han realizado todos los cálculos del modelo para cada iteración, se realiza un "ranking" de los píxeles en función de su potencial de cambio, y se seleccionan de esos píxeles los de mayor valor, en un número tal que sea igual en superficie a la tasa anual de crecimiento obtenida para la zona de estudio, de modo que estos píxeles se añaden al suelo urbano existente y comienza una nueva iteración del modelo, de tal forma que cada iteración es equivalente al crecimiento experimentado en un año.

Así, y a partir de los datos de suelo urbano de 1984, se ha ejecutado el modelo empleando 15 iteraciones y se ha obtenido una predicción del suelo ocupado para 1999. Con esta predicción se ha efectuado una comparación con los valores disponibles de ocupación para 1999, para observar la bondad del modelo. Los resultados se comentan en el apartado 6. En otros modelos más complejos, como los desarrollados por White y Engelen (1997) y Barredo *et al* (2003) la demanda de suelo urbano (así como de suelo industrial o comercial) es generada de manera externa al modelo de autómatas celulares mediante modelos demográficos y económicos que operan a una escala regional y que permiten realizar también una estimación de las demandas de una forma más compleja.

Por último se ha empleado el modelo para realizar una predicción a partir de los valores de ocupación de 1999 y generar un escenario futuro hipotético en 2014.

### 5.3. Verificación de resultados

Para evaluar si estas zonas se corresponden con las áreas urbanas, en los dos modelos desarrollados, empleamos tres métodos de comparación de resultados con los valores reales de suelo ocupado por la ciudad: la comparación visual de los mapas (1), la comparación del patrón de distribución mediante la dimensión radial (2) y una evaluación cuantitativa mediante matrices de comparación y su *índice Kappa (k-index en adelante)* (comando CROSSTAB de IDRISI) (White *et al*, 1997; Barredo *et al*, 2003) (3). Este índice varía de 0 a 1, de tal modo que 0 indica ausencia de correlación y 1 indicaría un ajuste perfecto. En el apartado 6 se comentan los resultados de esta verificación.

## 6. Resultados

A continuación se detallan los resultados del análisis del grado de correlación llevado a cabo mediante la regresión logística así como las predicciones obtenidas para la fecha de 1999 mediante el modelo basado en autómatas celulares y regresión logística. Igualmente se lleva a cabo una comparación de los resultados obtenidos con los valores reales de urbanización para dicha fecha, y finalmente se ha realizado una predicción a partir de datos de 1999 para un período de 15 años en el futuro, mediante el modelo de autómatas celulares.

### 6.1 Resultados obtenidos mediante regresión logística

Se ha analizado el grado de correlación de las variables ya comentadas para el período 1970-1984 y para el período 1984-1999. En primer lugar se ha realizado el análisis para cada una de las variables de manera individual, con el objetivo de cuantificar la importancia de cada una de ellas.

Para el período de 1970 a 1984 la [tabla 4](#) muestra los valores de correlación obtenidos mediante el parámetro estadístico ROC, así como los valores de los coeficientes de la ecuación de regresión.

Podemos observar en la [tabla 4](#) como la mayor correlación la encontramos en la variable distancia a zonas urbanas, con un ROC de 0,86, lo que consideramos una correlación positiva relevante con el crecimiento urbano. Este hecho es fácilmente explicado si tenemos en cuenta que el crecimiento urbano en esta época se produjo generalmente por agregación a los núcleos ya existentes, principalmente a Granada y a los núcleos históricos del área (Fernández, 2004), como podemos observar en la [figura 9](#). También es destacable por otra parte la creación de los polígonos industriales de A.S.E.G.R.A y de Juncaril en la zona Norte.

La accesibilidad a servicios básicos muestra igualmente un grado de correlación importante, de 0,79. Esto es fácilmente entendible desde el punto de vista de que las zonas con mayor accesibilidad se encuentran cerca del núcleo de Granada, y la ciudad presenta un importante crecimiento por agregación en este período, como ya comentamos con anterioridad. Otras variables como la distancia a las vías de comunicación también presentan un grado de correlación considerable, con un ROC de 0,76.

Resulta bastante paradójico el hecho de que no exista una correlación muy elevada con el suelo declarado como urbanizable durante los años 70, más concretamente en el plan comarcal de 1970, como demuestra un valor de ROC de 0,69. Sin embargo, esto se debe a que dicho planeamiento no llegó a ponerse en práctica de forma operativa, resultando para Fernández, (2004) un fracaso.

Para el caso de las variables ambientales empleadas en el análisis (la pendiente y las orientaciones) encontramos valores bastante bajos de correlación, lo que nos indica que no son realmente factores muy influyentes en el crecimiento urbano. Para el caso de la pendiente, con un ROC de 0,52, encontramos una baja correlación con el crecimiento, y por ello al elaborar el modelo de autómatas celulares sí se ha tenido en cuenta dentro de la denominada *potencialidad para la urbanización*.

A continuación se ha repetido el mismo análisis de regresión para todo el conjunto de variables, con el objetivo de cuantificar el grado de correlación total con el crecimiento urbano para este período. Los resultados arrojan un ROC de 0,8803, que nos muestra un valor de correlación bastante elevado

En la [figura 10](#) encontramos el resultado espacial de la regresión logística para este primer período, una salida cartográfica en la que se señala la probabilidad de pertenecer a la categoría urbano en 1984, a partir de los datos de 1970.

Seguidamente se ordenan los píxeles de mayor a menor probabilidad de cambio, y se seleccionan los de mayor probabilidad como candidatos a pasar a convertirse en suelo urbano en 1984. Se han seleccionado un número de píxeles igual a los que pasaron a urbano en el período 1970 – 1984, de tal modo que obtenemos una imagen ([figura 11](#)) con las zonas que el modelo de regresión logística predice como áreas urbanas.

## 6.2. Verificación de resultados para el modelo de regresión logística.

La comparación visual de las dos imágenes muestra una cierta similitud entre ambas, aunque la simulación concentra la mayor parte del crecimiento en las zonas adyacentes a el núcleo de Granada. No contempla igualmente la aparición de los polígonos industriales de Juncaril y A.S.E.G.R.A. y no recoge el crecimiento experimentado en la zona Sur.

Sin embargo y como señalan White *et al.* (1997), además de éste análisis visual, sería bueno disponer de una medida cuantitativa que nos indicara el grado de similitud entre la

simulación y la imagen real. Para ello emplearemos el método de la matriz de coincidencia o comparación, mediante el comando CROSSTAB de IDRISI.

Los resultados arrojan unos valores de 0,7116 para el *k-index*, que muestran un nivel de correlación elevado. Sin embargo, a pesar de aportar un valor cuantitativo acerca del grado de coincidencia de las dos imágenes, este índice no nos permite cuantificar patrones de por sí, porque sólo se cuantifican el número de celdas (una a una) coincidentes en los dos mapas, de tal modo que un pequeño desplazamiento, aun con un patrón idéntico, generaría una discordancia elevada (White et al, 1997). Por ello emplearemos también el método de comparación de los valores de la relación área-radio. En la [figura 12](#) se muestran los valores superficie urbanizada para distintos radios medidos desde el centro de la ciudad.

Se observa como la simulación obtenida mediante la regresión logística para 1984 muestra unos valores más elevados de superficie urbanizada para las zonas comprendidas entre 4 y 8 kilómetros del centro de la ciudad, mostrando así una agregación de las zonas urbanas mayor que la real. Parece ser pues que la simulación no reproduce muy bien el patrón de crecimiento.

Para el período de 1984 a 1999 se ha realizado un análisis similar empleando las mismas variables referidas a dicho período. La [tabla 5](#) recoge los resultados del análisis. Al igual que sucedía para el período anterior, la máxima correlación la encontramos para la distancia a las zonas urbanas, aunque en un grado sensiblemente inferior al caso de 1970-1984. El descenso de la correlación para esta variable es achacable al cambio en el modelo de crecimiento experimentado en el área metropolitana, que empieza a crecer de una forma mucho más dispersa, de tal forma que la agregación deja de ser el principal modo de crecimiento.

Repetiendo el mismo análisis con todas las variables anteriores alcanzamos unos valores de correlación de 0,84, ligeramente inferiores a los encontrados para el período 1970-1984, en el que encontramos 0,88.

En la [figura 13](#) podemos observar la imagen resultado de la regresión logística, que nos muestra la probabilidad para cada píxel de transformarse en suelo urbano. Encontramos valores del 65 % como máximo, lo cual es una probabilidad considerable, aunque no muy elevada.

Se procede a la ordenación de los píxeles de mayor a menor probabilidad de cambio, de manera análoga al período anterior. Seleccionamos un número de píxeles igual a los que pasaron a urbano en el período 1984-1999, obteniendo así la imagen de la predicción de la regresión logística ([figura 14](#)).

La comparación visual muestra como, a nivel general, el resultado de la predicción se parece en cierta forma a la ocupación real del suelo en 1999. Sin embargo, se observa claramente que la predicción no recoge la fuerte tendencia a la dispersión de la ciudad, de tal modo que no aparecen nuevas zonas urbanas, sino que parece dominar un crecimiento por agregación en las zonas más cercanas a áreas urbanas consolidadas, y con el comando CROSSTAB de IDRISI obtenemos la matriz de coincidencia entre los resultados de la regresión logística y los valores reales de suelo urbano para 1999. El valor del *k-index* es de 0,65, un valor sensiblemente más bajo

que el mostrado para el período anterior, lo que parece mostrar un cambio en el patrón de crecimiento, puesto que con las mismas variables obtenemos peores resultados.

A continuación se realiza un análisis de las medidas de la forma urbana basadas en la relación área-radio. La [figura 15](#) muestra la relación área-radio para la predicción realizada mediante regresión logística. Podemos observar como el resultado de la predicción nos muestra unos valores de este parámetro poco coincidentes con los valores reales, de tal modo que en las zonas situadas en un radio por encima de 3 km, la simulación tiende a sobreestimar la superficie de suelo urbano presente. Estas zonas se corresponden con los lugares en los que predomina la urbanización dispersa en la Vega de Granada, y que el modelo de predicción basado en la regresión logística no simula bien.

### 6.3. Resultados obtenidos mediante el modelo de AC

Los resultados obtenidos con los modelos estadísticos parecen no ser muy satisfactorios, como demuestran los distintos análisis de similitud realizados, a pesar de haber obtenido valores de correlación bastante elevados con las variables empleadas. A continuación se comentan los resultados obtenidos con el modelo basado en autómatas celulares desarrollado. Este modelo incluye un parámetro estocástico, como se comentó con anterioridad, que pretende solventar en la medida de lo posible el "problema" ocasionado por la aparición de nuevas zonas urbanas de forma dispersa.

El modelo se ha ejecutado para el período comprendido entre 1984 y 1999 y finalmente se ha realizado una simulación para un escenario futuro dentro de 15 años a partir de la cartografía de 1999. Para el período 84-99, los parámetros empleados en el modelo son la distancia a vías de comunicación, la potencialidad para urbanizar y el suelo urbano en 1984. Es sobre la capa de suelo urbano sobre la que se aplica la regla de vecindad de los autómatas celulares. La capa de distancia a zonas urbanas se combina con la de potencialidad y con el parámetro estocástico. Posteriormente se aplica la máscara de análisis, y se combina con el resultado de aplicar la regla de vecindad a las zonas urbanas. De esta forma obtenemos el potencial de transición de cada píxel. A continuación se ordenan los píxeles de mayor a menor potencialidad y seleccionamos los 668 que presentan mayor valor, que son los que se corresponden con la tasa de crecimiento anual del suelo urbano en el área metropolitana de Granada para el período contemplado. De manera inicial se estableció el parámetro estocástico en el valor de la dimensión radial, 0,62, pero se han llevado a cabo otras pruebas con valores menores de perturbación, concretamente con valores de 0,4 y 0,3.

### 6.4. Verificación de resultados del modelo basado en AC

Al igual que para el caso de la regresión logística, serán tres los métodos de comparación de los resultados de las simulaciones con los valores reales de suelo urbano: la comparación visual de los mapas, la comparación del patrón de distribución mediante la dimensión radial y una evaluación cuantitativa mediante matrices de comparación.

Se han realizado diversas simulaciones con el modelo, empleando distintos valores del parámetro estocástico, que finalmente se ha establecido en 0,32 para todas las simulaciones mostradas; y del valor de la potencialidad para la urbanización (parámetro  $I$  en el modelo) dependiendo de si se incluía o no el planeamiento (*suelo urbanizable*) en su cálculo. La [figura 16](#) muestra algunas de las imágenes obtenidas con el modelo para el período 1984-1999.

La simulación 5 se ha obtenido empleando la ecuación original. La imagen correspondiente a la simulación 6 se ha obtenido empleando la pendiente y el planeamiento en el cálculo de  $I$  y sumando 1 a la accesibilidad en la ecuación final de  $P$  en lugar de multiplicarla por 2. En la simulación 7 no se ha empleado el suelo urbanizable a la hora de calcular  $I$  y la accesibilidad no iba multiplicada por 2 al igual que en la ecuación final. Se han empleado estas variantes de la ecuación con el objetivo de tratar de identificar el efecto de modificar tanto el patrón de accesibilidad como el de potencialidad para la urbanización.

La comparación visual arroja, sobre todo para las dos últimas simulaciones mostradas, una similitud elevada, a nuestro entender, con la situación real de suelo urbano en 1999. En efecto, podemos decir que la simulación "se parece" al área metropolitana de Granada.

Podemos ver como el crecimiento del núcleo de Granada es reproducido de forma bastante acertada. La zona Sur, con los núcleos de Armilla y Churriana, también muestra un grado de realismo interesante. El crecimiento en los núcleos de Cúllar-Vega, Belicena, etc... es menos similar al real, si bien en líneas generales se muestra la fuerte tendencia al crecimiento de estos municipios. Una zona que difiere de una forma importante de la realidad es la zona norte, que en las simulaciones muestra un fuerte crecimiento en el entorno de los polígonos industriales de Juncaril y A.S.E.G.R.A, cuando en la realidad no se ha producido de forma tan importante.

En cualquier caso, y según nuestro parecer, el principal mérito de la simulación es reproducir de forma bastante acertada la tendencia general mostrada en el área metropolitana a una cada vez mayor dispersión del uso urbano en el territorio.

Para el caso de la matriz de coincidencia los valores del  $k$ -index obtenidos para las distintas simulaciones realizadas se sitúan entorno a un 0,65, parecidos a los que encontramos para la predicción realizada mediante la regresión logística. Estos valores no son muy elevados, pero son similares, aunque ligeramente más bajos, que los calculados por White *et al.* (1997). En la [tabla 6](#) se muestran los valores del  $k$ -index para varias de estas simulaciones.

El último método que emplearemos para evaluar las simulaciones generadas mediante el modelo basado en AC son, al igual que para las obtenidas con la regresión logística, las medidas de la forma urbana basadas en la relación área-radio (medido este último desde el centro de la ciudad). La [figura 17](#) muestra el gráfico representando el área en ha frente al radio en metros, para varias de las simulaciones construidas, así como para la ciudad "real". Las simulaciones previas a la 5, se emplearon para el calibrado del modelo, por lo que no se han incluido sus resultados. Observamos como los valores de la simulación 5 y 7 se ajustan muy bien a los valores de la ciudad en 1999, especialmente los valores de la simulación 5, (la obtenida mediante la ecuación original) de tal forma que los patrones son muy similares. Los valores de la simulación 6, que eran los que ofrecían unos valores más altos del índice  $k$  en la matriz de coincidencia son los que en cambio ofrecen

peores resultados en las medidas área-radio. Esta simulación parece mostrar una compacidad mayor de la ciudad que la que existe realmente.

A nuestro modo de entender, consideramos que esta medida es la que nos da unos valores más adecuados para evaluar la validez de las simulaciones construidas. Basamos esta afirmación en el hecho de que es para nosotros más interesante que el modelo genere unas simulaciones que reproduzcan bien los patrones de crecimiento, que generar unas simulaciones extraordinariamente realistas, ya que podemos decir que esto es prácticamente imposible. Además, si tenemos en cuenta que uno de los principales problemas del área de estudio es la enorme dispersión que se está produciendo en la ciudad, nos parecen más interesantes aquellas simulaciones que recogen mejor los patrones de crecimiento, que se demuestra en un ajuste bueno en la relación área-radio, que aquellas en las que los valores de la matriz de coincidencia arroja un ajuste mayor, con valores más altos del *k-index*.

### 6.5 Predicción futura mediante el modelo de autómatas celulares

Finalmente, a partir de la cartografía de suelo urbano de 1999, y manteniendo la misma tasa de crecimiento que la aplicada para el período comprendido entre 1984 y 1999, se ha aplicado el modelo para realizar una predicción de 15 años en el futuro. Se trata del mismo modelo basado en AC empleado en la simulación 5, pero tomando como suelo urbano de partida el existente en 1999. Como viario hemos empleado el correspondiente a 1999 añadiéndole la 2ª ronda de circunvalación proyectada en el Plan de Ordenación del Territorio de la Aglomeración Urbana de Granada. La potencialidad para la urbanización (*I*) se mantiene igual que en el modelo anterior. La [figura 18](#) muestra los resultados de la predicción.

Podemos observar como el resultado muestra un fuerte crecimiento en varios de los nudos de comunicaciones entorno a la ronda de circunvalación, así como en algunos núcleos de la primera corona metropolitana, generalmente aquellos cercanos a la futura 2ª ronda de circunvalación. Entendemos que el patrón de crecimiento resultante es muy semejante al existente actualmente, sin que el modelo muestre un crecimiento de la tendencia a la dispersión del suelo urbano.

En cualquier caso el resultado obtenido ha sido generado con los valores de crecimiento del período 1984-1999, que se ha caracterizado por una intensa urbanización, por lo que podría ser posible, si la velocidad del crecimiento urbano disminuye, que los valores de la simulación tiendan a sobreestimar la ocupación urbana del territorio, por lo que los resultados deben ser interpretados con mucha cautela.

## 7. Conclusiones

A la vista de los resultados mostrados por los análisis de correlación y los resultados de la predicción mediante regresión logística y así como los del modelo basado en autómatas celulares, podemos decir que es posible construir un modelo predictivo, como el desarrollado en este trabajo, basado en autómatas celulares que nos proporcione una herramienta más de análisis de alternativas, de evaluación de actuaciones, y que se convierta en un argumento para la reflexión y para el diseño

de estrategias de planeamiento que permitan la construcción, en la Vega de Granada, de un territorio metropolitano más sostenible y habitable.

El modelo basado en autómatas celulares es capaz de generar una representación bastante razonable del crecimiento del Área metropolitana de Granada, sobre todo en lo referente a los patrones mostrados, como muestran los análisis de la relación área-radio, de una forma mucho más realista que las predicciones generadas mediante regresión logística. Se consigue mostrar de una forma aceptable el proceso de dispersión urbana acontecido en los últimos años, si bien existen determinadas zonas en las que el crecimiento ha sido sobreestimado bastante, como en los polígonos industriales de la zona norte. Esto se debe a que las zonas industriales también se han incluido dentro de la categoría urbano, y por el efecto de vecindad, atraen crecimiento urbano a su alrededor. Así pues, consideremos que este modelo constituye una herramienta de generación de posibles escenarios futuros, que puede ayudar a valorar los resultados de diferentes políticas de planificación a nivel infraestructural o territorial.

Con vistas a la mejora del modelo implementado, sería necesario distinguir varias categorías de ocupación del suelo, que permitieran establecer un efecto de atracción-repulsión entre distintos usos, como por ejemplo una atracción del suelo urbano para con nuevas zonas urbanas, o una repulsión del suelo industrial para con el suelo urbano, y que de esta forma no se situasen en las cercanías de los polígonos industriales nuevos crecimientos urbanos.

### Referencias bibliográficas

- Antrop, M. (2000): "Changing patterns in the urbanized countryside of Western Europe", *Landscape Ecology*, 15, pp. 257-270.
- 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*, 64, pp. 145-160.
- Barredo J. I, Demicheli, L, Lavalle, C, Kasanko, M, y McCormick, N. (2004): "Modelling future urban scenarios in developing countries.: an application case study en Lagos, Nigeria", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32, pp. 65-84.
- Batty, M. (1997): "Sobre el crecimiento de la ciudad", en Ballesteros, J A (editor), *Las ciudades inasibles. Fisuras de la cultura contemporánea*. Madrid, pp. 4-53
- Batty, M. (1997): "Urban systems as cellular automata", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24, pp. 159-164.
- Berling-Wolf, S. y Wu, J. (2004): "Modelling urban landscape dynamics: A review", *Ecological Research*, 19, pp. 119-129.
- Briassoulis, H. (2000): <http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm> [Mayo, 2005]
- Cheng, J. y Masser, I. (2003): "Urban growth pattern modelling: a case study of Wuhan city, PR China", *Landscape and Urban Planning*, 62, 199-217.
- Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía (1999): *Plan de Ordenación del Territorio de la Aglomeración Urbana de Granada*. Sevilla
- De Almeida, C. M, Batty, M, Vieira, A. M, Câmara, G, Silveira, B, Coutinho, G, y Lopes, C. (2003): "Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation", *Computers, Environment and Urban Systems*, 27, pp. 481-509.

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. ISSN: 1578-5157

---

- Fernández, A. (1997): *Granada: Estructura de un espacio metropolitano*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada.
- Fernández, D. (2004): "Bases para la evaluación ambiental y territorial del Área Metropolitana de Granada", *Congreso Nacional de Medio Ambiente*. Colegio Nacional de Físicos. Madrid.
- Font, A. et al. (2004): *L'explosió de la ciutat*. COAC i Fòrum Universal de les Cultures de Barcelona. Barcelona.
- Hagget, P. (1983): *Geografía, una síntesis moderna*. Barcelona, Ed. Omega.
- Hidding, M C. y Teunissen, A. T. J. (2002): "Beyond fragmentation: Nex concepts for urban-rural development", *Landscape and Urban Planning*, 58, pp. 287-308.
- Itami, R M (1994): "Simulating spatial dynamics: cellular automata theory", *Landscape and Urban Planning*, 30, pp. 27-47
- López, E, Bocco, G, Mendoza, M, y Duhau, E. (2001): "Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe. A Case in Morelia City, Mexico", *Landscape and Urban Planning* 55, pp. 271-285.
- Menor, J. (1998): *La Vega de Granada: Transformaciones recientes de un espacio agrario tradicional*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.
- Muñoz, J.D, (1996): "Autómatas celulares y Física Digital", *Memorias del Primer Congreso Colombiano de Neuro Computación*. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Santa Fé. Bogotá ,D.C
- Torrens, P. M. (2000): "How cellular models of urban systems work", *CASA working paper series*, nº 28.
- White, R; Engelen, G. (1997): "Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24, pp. 235-246.
- White, R, Engelen, G, y 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, pp. 323-343.
- White, R y Engelen G. (2000): "High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems", *Computers, Environment and Urban Systems*, 24, pp. 383-400.
- Wolfram, S. (1984): "Cellular automata as model of complexity", *Nature*, 311, pp. 419-424

## TABLAS

**Tabla 1. Características de algunos modelos basados en autómatas celulares**

Autor	Ámbito	Período considerado	Factores del modelo	Tamaño de celda	Categorías	Vecindad	Parámetros de evaluación
White y Engelen (1997)	Cincinnati (USA)	¿? - 1960	Aptitud para cada categoría, accesibilidad, vecindad.	80 m	Vacío, comercial, residencia, industrial	112 celdas	Visual, K-index, dimensión radial
White, et al (1997)	Santa Lucía	1987-2027	Aptitud para cada categoría, accesibilidad, vecindad, modelo económico-demográfico	250 m	Agrícola, bosques, residencial, playas, manglares,...	112 celdas	Sin datos
White y Engelen (2000)	Holanda	1989-2029	Aptitud para cada categoría, accesibilidad, vecindad, modelo económico-demográfico	500 m	16 categorías	196 celdas	Visual, K-index, dimensión radial, comparación de polígonos (compacidad, tamaño)
Barredo et al (2003)	Dublín (Irlanda)	1968-1998	Aptitud para cada categoría, accesibilidad, vecindad, modelo económico-demográfico	100 m	22 categorías	172 celdas	Visual, dimensión radial, K index
Barredo et al (2004)	Lagos (Nigeria)	1984-2020	Aptitud para cada categoría, accesibilidad, vecindad,	100 m	Res. denso, Res. discont, industrial, comercial, servicios, puerto, ...	172 celdas	K- index, medidas espaciales (área media de parches, longitud de bordes...)

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 2. Superficie urbanizada por fechas en el área de estudio**

Fecha	Superficie (ha)
1970	1598,26
1984	2543,19
1999	5060,23
2003	5492,85

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 3. Variables empleadas en el análisis de correlación con el crecimiento urbano**

Variable	Tipo
Distancia a vías de comunicación	<i>Continua</i>
Pendientes	<i>Continua</i>
Orientaciones	<i>Discreta</i>
Distancia a zonas urbanas	<i>Continua</i>
Accesibilidad a servicios básicos	<i>Continua</i>
Suelo urbanizable	<i>Binaria</i>
Máscara de análisis	<i>Binaria</i>
Crecimiento urbano (variable a explicar)	<i>Binaria</i>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4. Resultados del análisis de correlación mediante regresión logística para el período 1970-1984**

Variable	ROC
Distancia a zonas urbanas	0,8609
Accesibilidad a servicios básicos	0,7900
Distancia a vías de comunicación	0,7647
Suelo urbanizable	0,6888
Pendientes	0,5228
Orientaciones	0,4973

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5. Resultados del análisis de correlación mediante regresión logística para el período 1984-1999**

Variable	ROC
Distancia a zonas urbanas	0,8065
Accesibilidad a Servicios básicos	0,7469
Distancia a vías de comunicación	0,7426
Suelo Urbanizable	0,6284
Pendientes	0,5991
Orientaciones	<0,5

Fuente: Elaboración propia

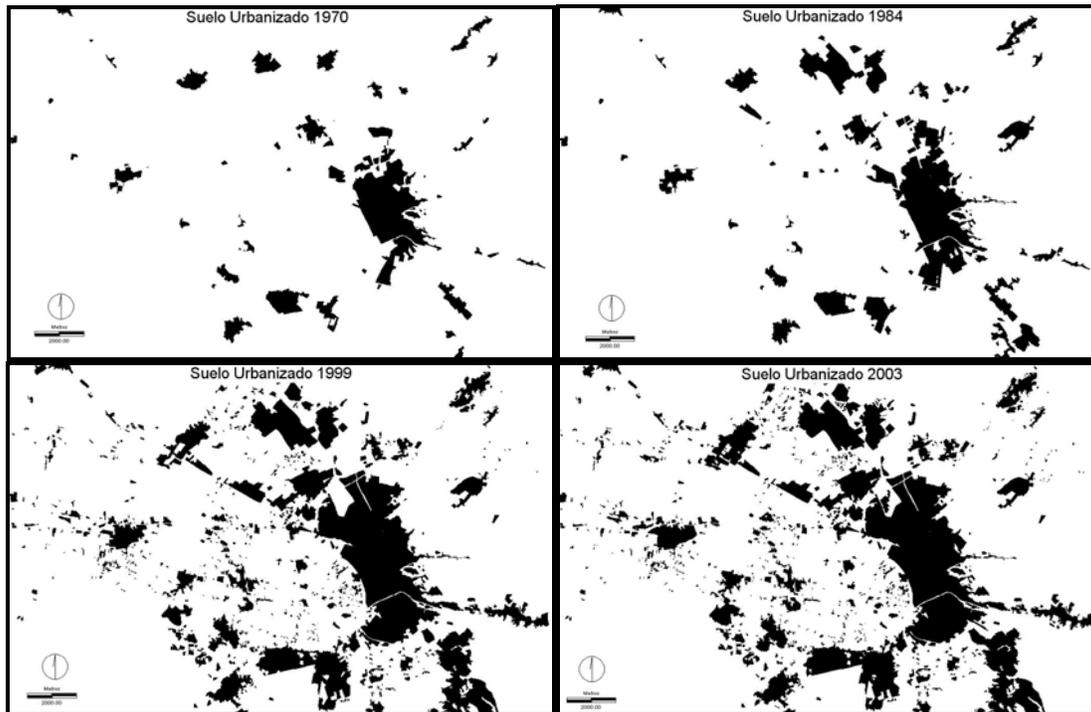
**Tabla 6. Valores del k-index para varias de las simulaciones obtenidas**

Simulación	Descripción	k-index
Simulación 5	Obtenida con la ecuación inicialmente descrita. Parámetro estocástico = 0,32	0,6556
Simulación 6	No se incluye el planeamiento.	0,6655
Simulación 7	No se incluye el planeamiento. La accesibilidad no va multiplicada por 2.	0,6310

Fuente: Elaboración propia

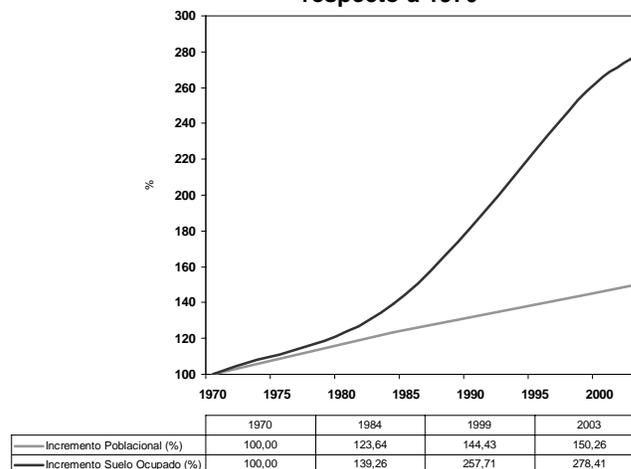


Aguilera Benavente, F. (2006): "Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, n° 6, p. 81-112. ISSN: 1578-5157



**Figura 4. Crecimiento urbano 1970-2003.**  
Fuente: elaboración propia.

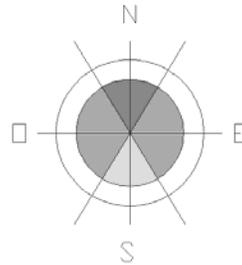
**Incremento Poblacional - Suelo Construido  
respecto a 1970**



**Figura 5. Incremento del suelo urbanizado y de la población en % con respecto a valores de 1970. Se observa el crecimiento urbano no justificado por un crecimiento poblacional.**

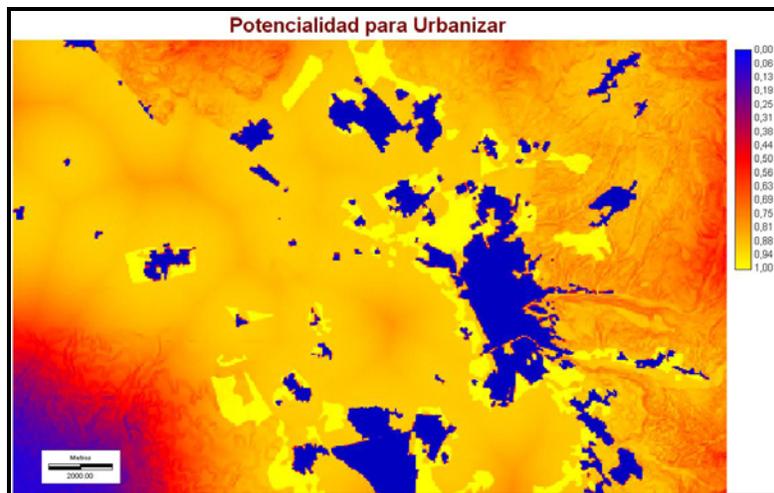
Fuente: elaboración propia.

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. ISSN: 1578-5157



**Figura 6. División en categorías de las orientaciones**

Fuente: elaboración propia.



**Figura 7. Potencialidad para urbanizar en 1984. Las zonas con mayor potencialidad son aquellas que en el planeamiento estaban catalogadas como urbanizables. Las zonas en azul muestran potencialidad nula.**

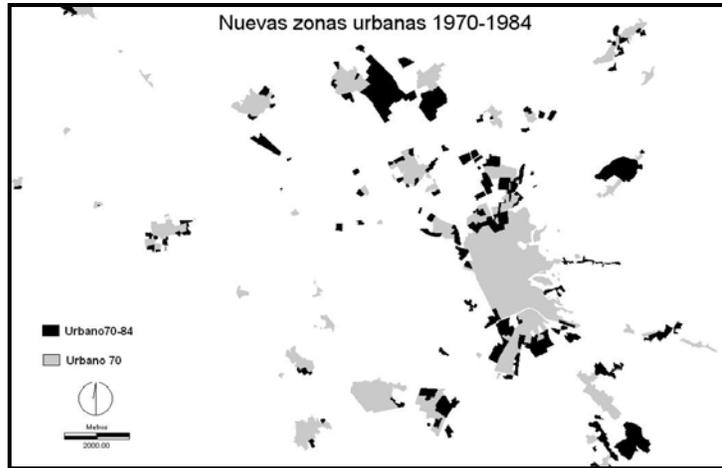
Fuente: elaboración propia.

0	0.15	0.3	0.6	1	0.6	0.3	0.15	0
0.15	0.3	0.6	1.25	2	1.25	0.6	0.3	0.15
0.3	0.6	1.25	3.5	5	3.5	1.25	0.6	0.3
0.6	1.25	3.5	7	10	7	3.5	1.25	0.6
1	2	5	10	1	10	5	2	1
0.6	1.25	3.5	7	10	7	3.5	1.25	0.6
0.3	0.6	1.25	3.5	5	3.5	1.25	0.6	0.3
0.15	0.3	0.6	1.25	2	1.25	0.6	0.3	0.15
0	0.15	0.3	0.6	1	0.6	0.3	0.15	0

**Figura 8. Matriz de filtrado empleada para obtener el parámetro de vecindad.**

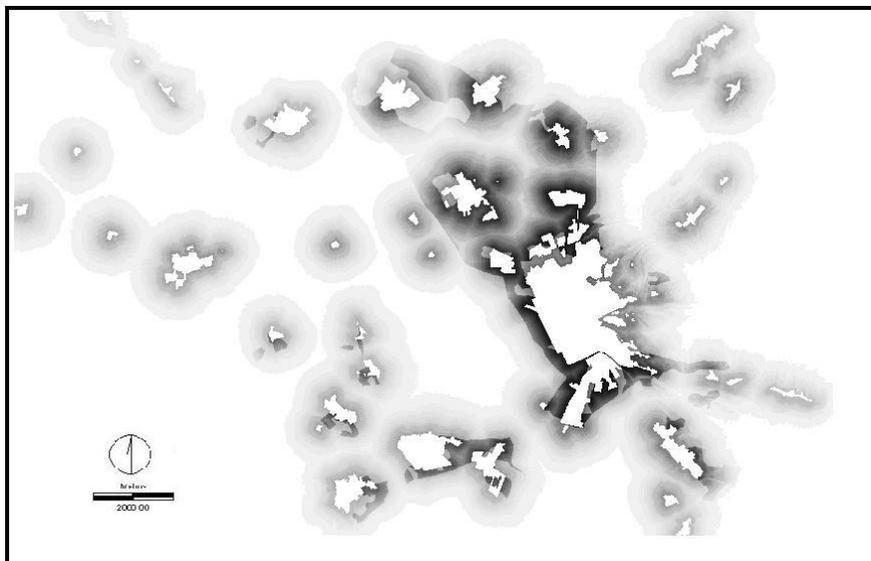
Fuente: elaboración propia.

Aguilera Benavente, F. (2006): "Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, n° 6, p. 81-112. ISSN: 1578-5157



**Figura 9. Crecimiento urbano en el período de 1970 a 1984. Se observa como ha dominado el crecimiento por agregación.**

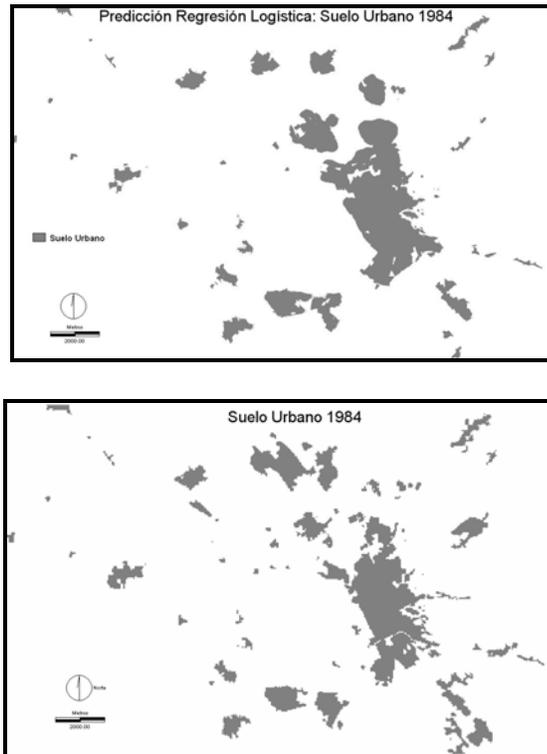
Fuente: elaboración propia.



**Figura 10. Probabilidad de ser urbano en 1984 obtenida mediante regresión logística a partir de datos de 1970. Los tonos oscuros indican aquellos píxeles de mayor probabilidad.**

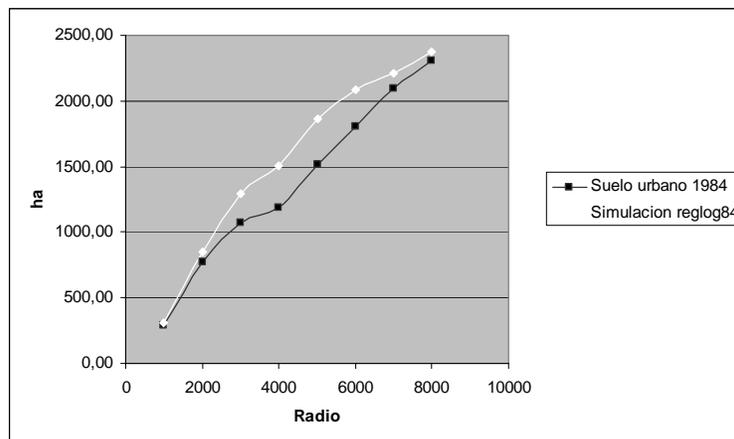
Fuente: elaboración propia.

Aguilera Benavente, F. (2006): "Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, n° 6, p. 81-112. ISSN: 1578-5157



**Figura 11. Suelo Urbano predicho para 1984 mediante regresión logística (1) y suelo urbano en 1984(2).**

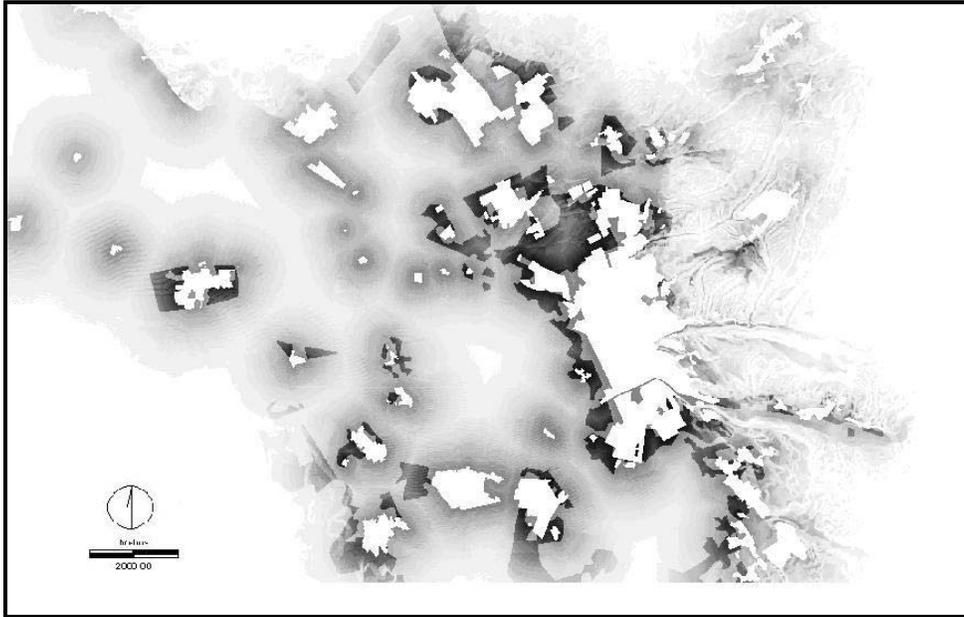
Fuente: elaboración propia.



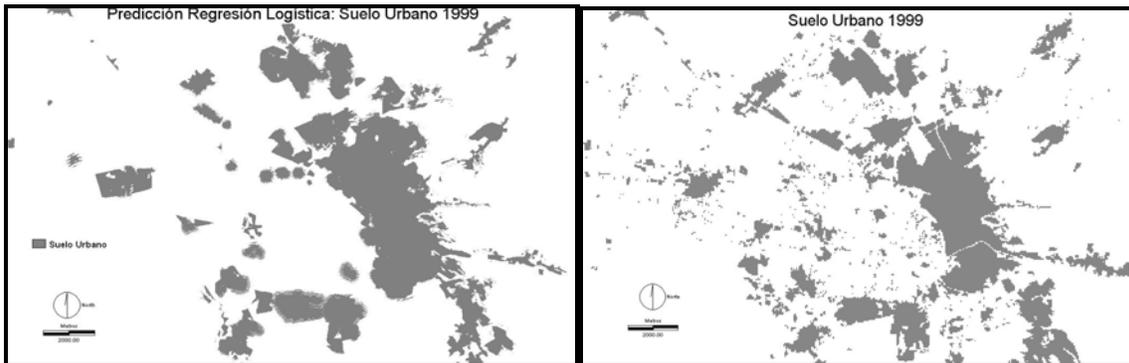
**Figura 12. Relación área-radio para la simulación obtenida mediante regresión logística y para la ciudad en 1999.**

Fuente: elaboración propia.

Aguilera Benavente, F. (2006): "Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, n° 6, p. 81-112. ISSN: 1578-5157

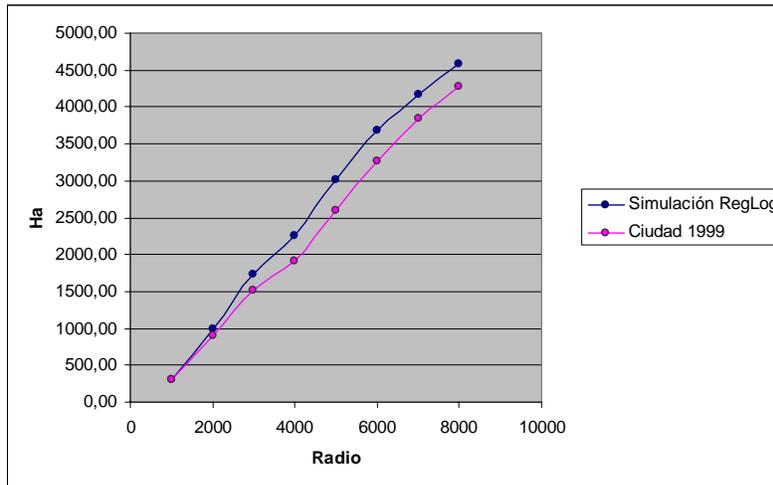


**Figura 13. Probabilidad de ser urbano en 1999 obtenida mediante regresión logística a partir de datos de 1984. Los tonos oscuros indican aquellos píxeles de mayor probabilidad.**  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 14. Suelo urbano predicho para 1999 mediante regresión logística y suelo urbano real.**  
Fuente: elaboración propia.

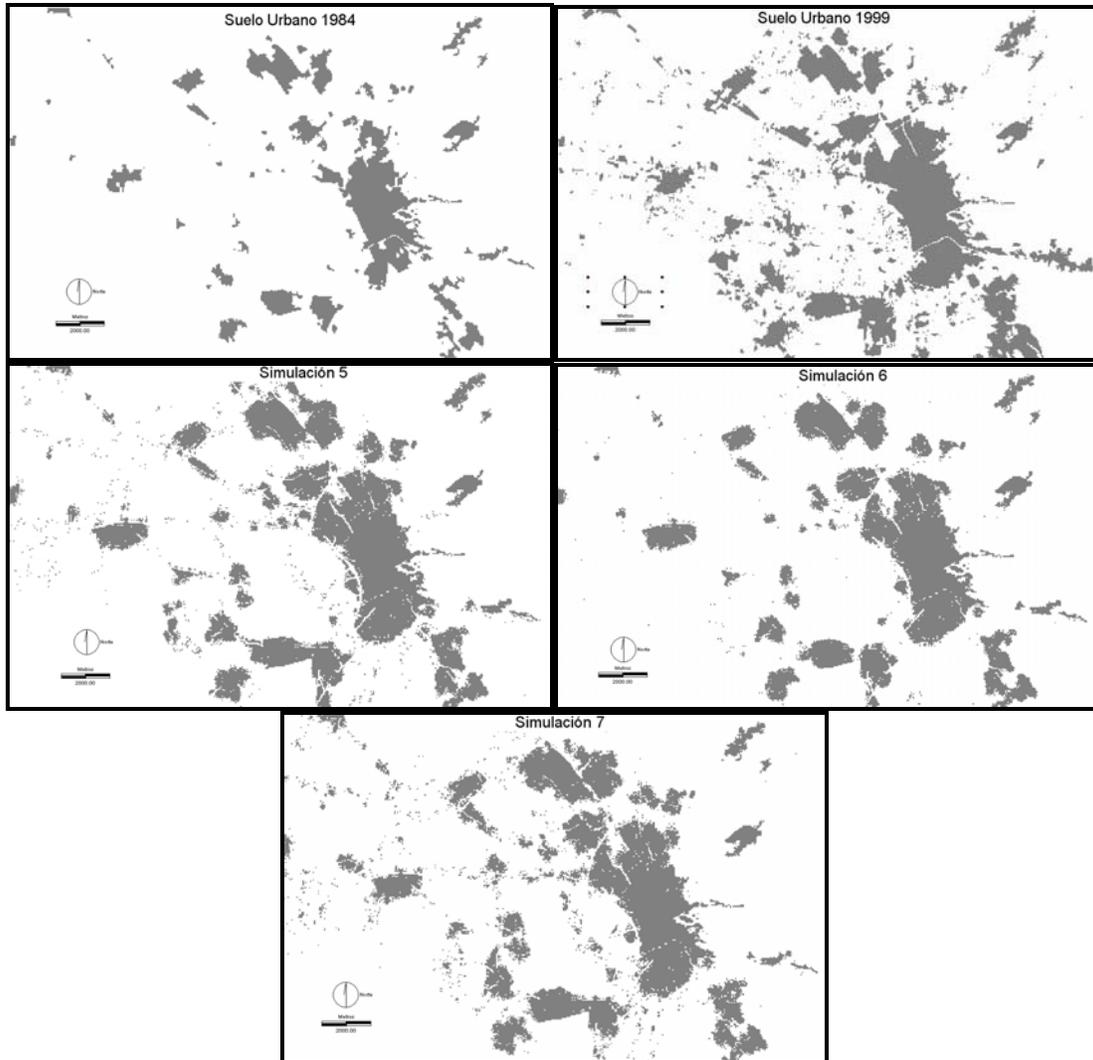
Aguilera Benavente, F. (2006): "Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, n° 6, p. 81-112. ISSN: 1578-5157



**Figura 15: Relación área-radio para la simulación obtenida mediante regresión logística y para la ciudad en 1999**

Fuente: elaboración propia.

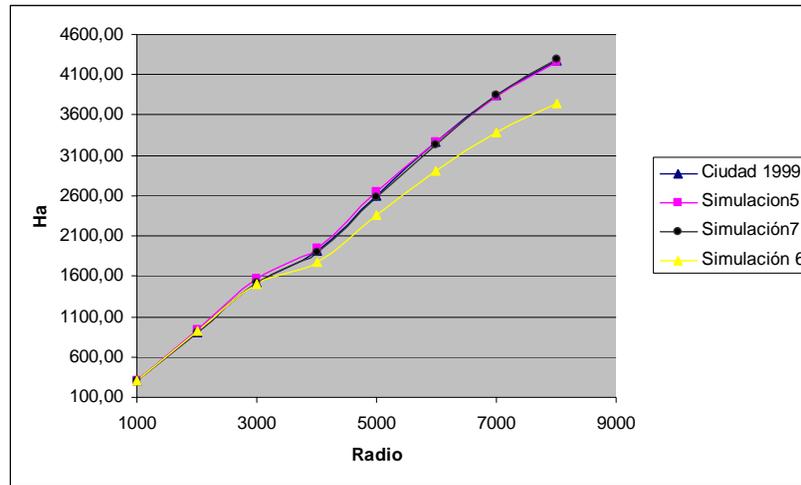
Aguilera Benavente, F. (2006): "Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares", *GeoFocus (Artículos)*, n° 6, p. 81-112. ISSN: 1578-5157



**Figura 16. Diferentes simulaciones generadas con el modelo basado en AC (a, b, c) e imagen real del área metropolitana en 1999. En la primera y en la segunda se ha incluido el planeamiento en el cálculo de la potencialidad para la urbanización, mientras que en la tercera no.**

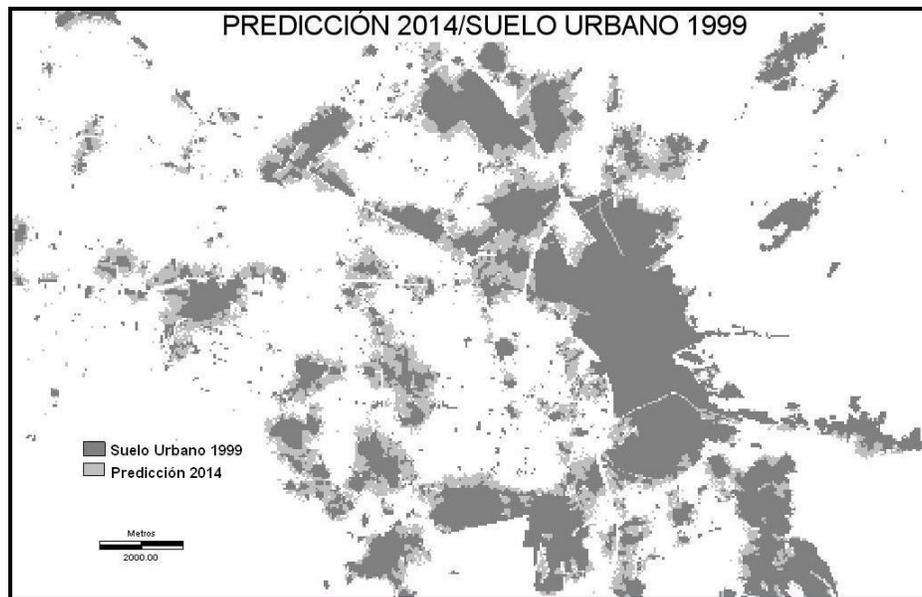
Fuente: elaboración propia.

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. ISSN: 1578-5157



**Figura 17. Relación área-radio para varias de las simulaciones obtenidas mediante el modelo de autómatas celulares y para la ciudad en 1999.**

Fuente: elaboración propia.



**Figura 18. Predicción del crecimiento urbano para 2014 y Suelo urbano en 1999.**

Fuente: elaboración propia.

<sup>1</sup> Este artículo ha sido realizado en el marco del Convenio de la Universidad de Granada y La Excm. Diputación de Granada para el desarrollo del proyecto de investigación "Dibujando un corredor metropolitano de desarrollo territorial sostenible en la Vega de Granada".