

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/283151121>

Aplicación de modelos de simulación de crecimiento urbano

Chapter · September 2015

CITATIONS

0

READS

290

1 author:



[Santiago Linares](#)

National University of the Center of the Buenos Aires Province

52 PUBLICATIONS **53** CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

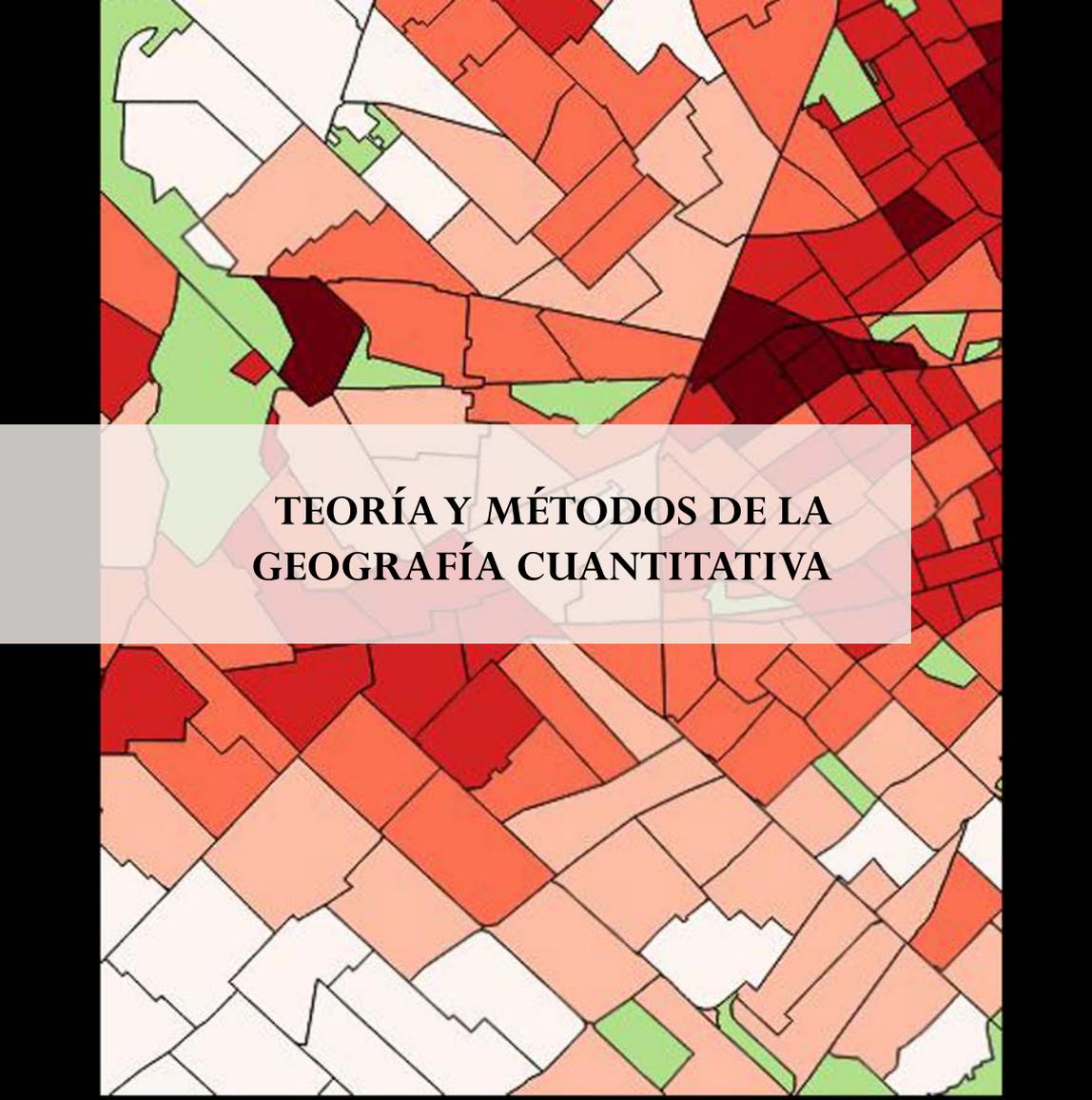
Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Modelización de la dinámica intraurbana en ciudades argentinas utilizando Tecnologías de la Información Geográfica (1991- 2010) [View project](#)



Geografía y calidad de vida en la Argentina [View project](#)



**TEORÍA Y MÉTODOS DE LA
GEOGRAFÍA CUANTITATIVA**

Libro 1: Por una Geografía de lo real

**Gustavo D. Buzai
Graciela Cacace
Luis Humacata
Sonia L. Lanzelotti
(compiladores)**



TEORÍA Y MÉTODOS DE LA GEOGRAFÍA CUANTITATIVA

Libro 1: Por una Geografía de lo real

Gustavo D. Buzai, Graciela Cacace, Luis Humacata, Sonia L. Lanzelotti
(compiladores)

TEORÍA Y MÉTODOS DE LA GEOGRAFÍA CUANTITATIVA

Libro 1: Por una Geografía de lo real



Teoría y métodos de la geografía cuantitativa : libro 1: Por una geografía de lo real / Claudia Baxendale ... [et al.] ; compilado por Gustavo Daniel Buzai ... [et al.]. - 1a ed. . - Mercedes : MCA Libros , 2015.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga

ISBN 978-987-45986-2-2

1. Geografía. 2. Sistema de Información Geográfica. I. Baxendale, Claudia II. Buzai, Gustavo Daniel, comp.

CDD 910

Fecha de Catalogación: 24/08/2015

Esta obra fue editada en el marco de la Red GESIG, dependiente del Grupo de Estudios sobre Geografía y Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica (GESIG) del Departamento de Ciencias Sociales de la Universidad Nacional de Luján, bajo la dirección del Dr. Gustavo Buzai.

La edición contó con el auspicio del Instituto de Investigaciones Geográficas (INIGEO) de la Universidad Nacional de Luján y de la Dirección de Cultura y Educación de la Municipalidad de Mercedes.

Portada: Sector de la AGBA. Mapa coroplético por fracciones censales: Nivel Educativo Alto, 2001 (Gustavo Buzai y Mariana Marcos)

Primera edición: Setiembre 2015

MCA Libros

Director Editorial: Lic. Gabriel E. Acuña Suarez

Museo Municipal de Ciencias Naturales "Carlos

Ameghino" (MCA) Calle 26 N° 512

(6600) Mercedes, Buenos Aires

Argentina

mameghino@mercedes.gob.ar

GESIG

Grupo de Estudios sobre Geografía y Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica

Instituto de Investigaciones Geográficas, Universidad Nacional de Luján

www.gesig-proeg.com.ar / gesig-proeg@unlu.edu.ar

Hecho el depósito que marca la ley 11.723.

Prohibida su reproducción total o parcial sin permiso expreso de los editores.

Editado en Argentina

© Copyright MCA Libros.

ÍNDICE

Los Autores.....	9
Los Evaluadores.....	13
Presentación.....	15
Parte 1. Aspectos conceptuales	
Geografía Cuantitativa, paradigmas y simplicidad <i>Gustavo D. Buzai</i>	23
Ordenar el territorio con base en la Geografía Cuantitativa <i>Claudia A. Baxendale</i>	39
Estructura diacrónica de los procesos de investigación aplicada a la Geografía Cuantitativa <i>Eloy Montes Galbán</i>	53
Parte 2. Aplicaciones de análisis espacial	
<u>Análisis locacional</u>	
La evaluación multicriterio en contexto urbano <i>Graciela Cacace</i>	73
La evaluación multicriterio en el espacio regional y dimensión histórico-arqueológica <i>Sonia L. Lanzelotti</i>	93
Modelos multicriterio basados en funciones de utilidad <i>Liliana Ramirez y Romina Claret</i>	105

Análisis regional

Métodos de clasificación y regionalización en base cuantitativa
Luis Humacata..... 123

Los métodos de autocorrelación espacial para la regionalización
intraurbana
Patricia Iris Lucero..... 139

Análisis de interacción

Interacciones económicas transfronterizas y sus efectos
en espacios nacionales
Armando García de León..... 157

Modelos para la estimación de la demanda en transporte
público
*Oswaldo Cardozo, Cristian Javier Da Silva
y Érica Leonor Gómez*..... 175

Modelización por isócronas. Aplicación al transporte
Alejandro Parras..... 195

Análisis espacio-temporal

Procedimientos cuantitativos vigentes para el análisis de la
estructura de series de tiempo geográficas
Arnobio Germán Poblete..... 213

Aplicación de modelos de simulación de crecimiento urbano
Santiago Linares..... 231

Convergencia

Gustavo Buzai..... 249

APLICACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN DE CRECIMIENTO URBANO

Santiago Linares

PERSPECTIVAS SOBRE LA MODELIZACIÓN DEL ESPACIO URBANO

EL USO DE MODELOS en la investigación urbana se remonta al modelo clásico de localización agrícola de von Thünen, publicado en su famoso libro *Der Isolierte Staat* (1826). En él, este autor considera la relación de tres factores: la distancia de los agricultores al mercado, los precios recibidos por los agricultores por sus productos y la renta de la tierra. Sobre la base de un análisis econométrico de los Estados de Mecklemburgo en el Norte de Alemania, el autor argumenta que la intensidad del uso de la tierra era inversamente proporcional al costo de transporte o a la distancia del mercado. En un *estado aislado* con un solo centro de la ciudad como mercado único y una llanura uniforme que rodea la ciudad, se genera un patrón concéntrico de uso de la tierra con el menor uso intensivo de ésta situada lo más lejos del centro de la ciudad (Henshall 1967).

Los posteriores modelos sobre el desarrollo urbano se encuentran muy relacionados con el modelo de von Thünen. Pero específicamente orientados a la estructura urbana interna, podemos afirmar que, sin duda, existe una clara inflexión a partir de los modelos clásicos sobre el crecimiento y patrones de uso del suelo de Burgess (1925), quién publica el modelo de los anillos concéntricos; posteriormente Hoyt (1939) que plantea el modelo de los sectores y, Harris y Ullman (1945) quienes formulan el modelo de los núcleos múltiples. Estos modelos tienen como factor común que se basaron en la comprensión del desarrollo urbano desde el distrito central de negocios (CDB) hacia el exterior.

No obstante, el uso generalizado de modelos en Geografía urbana se produjo durante el período de la denominada *revolución*

cuantitativa, que se inició a finales de 1950 y se extendió hasta finales de 1960. Este desarrollo proviene casi exclusivamente desde los Estados Unidos, como resultado de necesidades prácticas coyunturales y del surgimiento de novedosas aplicaciones informáticas. Entre las necesidades prácticas existió un aumento descomunal de automóviles en circulación durante la década de 1940 y principios de 1950, que llevó a que aquellas ciudades encorsetadas en sus estructuras físicas tradicionales, no soportaran la nueva movilidad de sus habitantes. Así, se sentaron las bases para el desarrollo de varios modelos de transporte que fueron consolidándose hacia finales de 1950. Posteriormente, el desarrollo de la informática profundizó esta tendencia al proporcionar un entorno digital para trabajar con modelos matemáticos complejos. Durante este período, una gran variedad de tipos de modelos urbanos se desarrollaron, siendo los temas de aplicación más frecuentes el uso del suelo, el transporte, la población y actividades económicas urbanas. Estos modelos fueron considerados por los planificadores como laboratorios artificiales para experimentar con estructuras urbanas reales (Dyckman 1963).

El énfasis de estos modelos estuvo tradicionalmente orientado a la sofisticación técnica del modelado y no a sus fundamentos teóricos, razón por la cual fueron seriamente criticados a finales de 1970 llevando a un cambio radical sobre el abordaje del desarrollo urbano y pasando de un uso intensivo de modelos matemáticos a análisis fundamentalmente cualitativos. Esta tradición se mantuvo hasta fines de 1980, cuando los enfoques desde la complejidad van a proporcionar alternativas prácticas de entender y estudiar a las ciudades como sistemas evolutivos y emergentes, superando la simplicidad que caracterizaba a la modelización urbana tradicional (Allen 1997).

El desarrollo de Sistemas de Información Geográfica (SIG), su integración con las modelizaciones urbanas preexistentes, las nuevas fuentes de datos y las innovaciones en las técnicas de análisis, han llevado a la tradición de modelos urbanos hacia un nuevo y renovado estadio en proceso de investigación y evaluación.

COMPLEJIDADES TEÓRICAS Y ADAPTACIONES TECNOLÓGICAS PARA MODELIZAR EL ESPACIO URBANO

Si bien a partir de la Teoría General de los Sistemas se logró modelizar con gran eficacia el comportamiento de gran cantidad de fenómenos urbanos, se mostraba también cierta insuficiencia ante circunstancias recurrentes en los estudios de dichos procesos signados por la incertidumbre y la imprecisión que caracteriza a lo social. A partir de la década de 1980, los desarrollos científicos sobre sistemas complejos no-lineales, caóticos y auto-organizados han dado lugar a nuevas formas de interpretar y analizar las ciudades y su desarrollo, contribuyendo a considerables mejoras en la modelización del espacio urbano contemporáneo (Wilson 1981; Batty y Longley 1994; Allen 1997). Estos estudios han permitido comprender el desarrollo urbano como un proceso irregular, resultante de las tensiones propias de un sistema abierto sujeto a decisiones internas y externas, donde tienen predominancia las configuraciones no-euclidianas y las conjunciones entre el espacio y el tiempo (Buzai y Baxendale, 2006).

Caos, complejidad y auto-organización del espacio urbano

El concepto de Caos comenzó a desarrollarse por Edward Lorenz, en la década del 60 quien verificó que pequeñas diferencias en las condiciones iniciales de un sistema podían traducirse rápidamente en significativas diferencias en el resultado. Este fenómeno recibió el nombre de *dependencia sensible de las condiciones iniciales*. Lorenz observaba que, en un dominio dado, un fenómeno presentaba repeticiones que nunca eran perfectamente iguales, pero había un patrón, es decir, un *orden del desorden*. En busca de explicaciones para este *orden del desorden*, surgen en la década de 1970 estudios que fueron constituyendo la *Teoría del Caos*.

En este contexto, los trabajos realizados en la Escuela de Bruselas han producido resultados importantes sobre los sistemas físicos y químicos que se aplican también a los modelos urbanos. La idea principal desde esta óptica es que: para un sistema abierto

donde hay un intercambio instantáneo de materia y energía con su entorno, el flujo de energía o material podría llevar al sistema a un estado "lejos del equilibrio" (Prigogine y Stengers 1984:141). El proceso no-lineal de interacción entre diferentes elementos del sistema puede generar *catástrofes* o *bifurcaciones* que alteren el estado global, dando lugar a un nuevo "orden por fluctuaciones" (Prigogine y Stengers 1984:178).

Dentro de este enfoque, una ciudad es vista como un sistema abierto y complejo que lejos está de alcanzar un equilibrio y que se encuentra en un constante intercambio de bienes y energía con otras ciudades y sus alrededores. En ellas se reconocen múltiples elementos interactuantes, con autonomía relativa pero cohesionados. Esta cohesión no está explicada por la existencia de una racionalidad universal abstracta o por un principio general organizador del todo; sino, por un proceso involuntario derivado del juego de múltiples interacciones entre agentes, escalas y temporalidades (Cuervo González 2000).

Esta cohesión posee adicionalmente dos características dinámicas complementarias: la de la reproducción y la del cambio impredecible. El juego interno de los agentes y elementos explican la cohesión del sistema; característica que se define como *capacidad de auto-organización*. Así, las formas urbanas, construidas involuntariamente por el accionar de agentes que ajustan continuamente su comportamiento en función de las interrelaciones mutuas y de los cambios en el entorno urbano, concretan el fenómeno de auto-organización.

Las especificidades de una ciudad se definen, por lo tanto, por ser un sistema evolutivo con capacidades diferenciales de adaptación al cambio en el medio exterior y cuyo proceso de estructuración depende de variables específicas de cada núcleo urbano en particular. Este enfoque parece abarcar lo que los estudios urbanos han estado buscando durante mucho tiempo, la integración analítica entre espacio, tiempo y acción de la sociedad, para entender el comportamiento y evolución del patrón espacial que tradicionalmente denominamos estructura urbana.

Estas ideas han dado lugar a la aparición de nuevas clases de modelos para simular el desarrollo urbano dentro de los que se

destacan: la *agregación por difusión limitada* (DLA), los *modelos basados en agentes* y la *simulación basada en autómatas*. En los siguientes apartados se presentarán una serie de antecedentes y conceptos sobre la última de las alternativas propuestas, además de un ejemplo empíricos de simulación del crecimiento urbano sobre la ciudad de Tandil.

Autómatas celulares y simulación urbana

Dentro de los modelos de simulación urbana basada en la técnica de los *autómatas*, los más implementados son los *autómatas celulares* (AC). Los AC son herramientas que llaman poderosamente la atención para realizar estudio de sistemas auto-organizados debido a su simplicidad práctica y capacidad analítica de estructuras espacio-temporales complejas.

Su origen se remonta a los trabajos de John Von Neumann, quien propone modelar máquinas que trabajando en forma autónoma (autómatas) tienen la posibilidad de auto-reproducirse (Buzai y Baxendale 2006). Continuó con el aporte de Stanislaw Ulam, quién creó a partir de los fenómenos de crecimiento de cristales, una red infinita desplegada como un tablero de ajedrez donde cada cuadrado de la red podría ser, esencialmente, una máquina que actuaría de acuerdo con un conjunto compartido de reglas. La configuración de la red cambiaría a medida que ocurrieran los pasos del tiempo discreto. Cada célula (casillero del tablero) contendría información que podría conocerse como su estado y, que consultaría la *tabla de reglas* para así determinar su estado en los siguientes momentos.

Aplicado al análisis de procesos espaciales se debe pensar en un AC como en un conjunto de objetos situados sobre una región geográfica o asociados a puntos en el espacio susceptibles de adquirir ciertos estados según transcurre el tiempo, siempre en forma discreta o de a saltos. Estos objetos cambian sus estados en función de sus propios estados previos y de los de aquellos otros entes o individuos situados en su vecindad. El problema es entonces saber cuál será la evolución de la configuración del sistema según avance el tiempo (Wolfram 1983).

Aunque la técnica de los autómatas celulares se remonta a los orígenes de la computación digital, es a partir de la década de 1990 que esta técnica se ha utilizado para explorar el comportamiento de sistemas auto-organizados y modelar el proceso de crecimiento urbano, pudiendo citar los trabajos pioneros de White y Engelen (1993), White *et al.* (1997), y una serie de estudios aplicados a diferentes ciudades tales como: Clarke y Gaydos (1998), Batty, Couclelis y Eichen (1997), Polidori (2004).

PRECISIONES METODOLÓGICAS SOBRE EL MODELO PROPUESTO PARA LA CIUDAD DE TANDIL

Para la simulación del crecimiento urbano de la ciudad de Tandil se utilizó una aplicación en el lenguaje Java, llamada SACcity (Meliendrez y Milfa 2011), que emplea las funcionalidades y modelo de datos de los productos de la empresa ESRI, como ArcGIS Desktop 9.3 y ArcGIS Engine 9.3.

Para ejecutar el modelo de simulación, el usuario debe ingresar un conjunto de capas temáticas que representan diferentes factores que afectan (en mayor o menor medida) al crecimiento urbano. Las variables consideradas para este ejemplo (pendiente, altitud, distancia a calles, distancia al área central, restricciones a la urbanización, superficie edificada) son las más utilizadas en los antecedentes basados en AC.

La aplicación permite la ejecución de un modelo de AC en el cual se incorpora un método de decisión multicriterio, que introduce un factor de difusión y uno de propagación y, en donde la regla de transición está definida como una función que contempla todos los parámetros de entrada en forma combinada, obteniendo así una simulación más cercana a la realidad (Figura 1).

El modelo de AC diferencia entre dos usos del suelo, definidos como urbanizado y no-urbanizado. El uso de suelo urbanizado incluye el suelo residencial, comercial y de servicios, industrial, transporte y comunicación, equipamientos colectivos o usos mixtos. Los restantes usos del suelo se agrupan en una sola categoría como

no-urbanizados donde se incluyen bosques, pastizales, terrenos baldíos o cultivos.

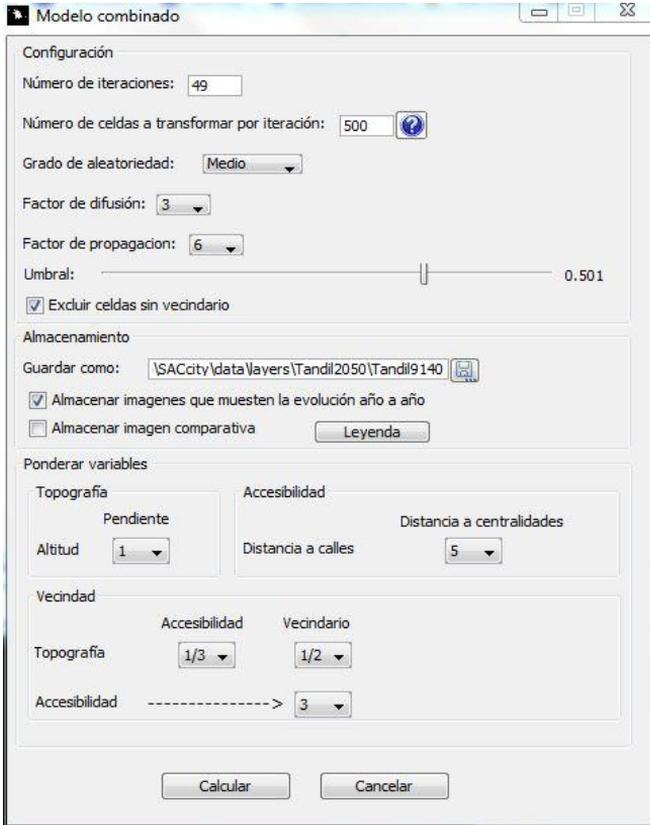


Figura 1. Modelo de simulación combinado en SACcity. Elaboración del autor.

Los distintos componentes que conforman el autómata celular serían:

- Conjunto finito de estados: cada celda puede pertenecer a la categoría de *urbanizado* o *no-urbanizado*. Sólo la transición del estado *no-urbanizado* a *urbanizado* es permitida.

- Vecindad: se ha empleado una matriz de 9 x 9 celdas, lo que nos da una vecindad de 81 celdas, cuya influencia decae con la distancia.
- Regla de evolución: para cada celda del autómata se calcula el potencial de transición y al final de cada iteración del modelo se transforman al estado *urbanizado* aquellas celdas con mayor potencial, sujeto al límite impuesto por el usuario. Para aquellas celdas cuyo estado es *urbanizado* el potencial no se calcula debido a que el estado de las mismas no puede ser modificado.
- Reloj Virtual de Cómputo: Cada iteración del modelo supone una aplicación de la regla de evolución. Estas iteraciones representan una unidad de tiempo de crecimiento que en nuestro ejemplo representan un año.

La función para calcular el potencial de transición del estado actual de una celda C al estado i se calcula de la siguiente manera (1):

$$P_{C,i} = I_{C,i} * \vartheta^1 + A_{C,i} * \vartheta^2 + N_{C,i} * \vartheta^3 + \varepsilon \quad (1)$$

donde:

- $P_{C,i}$ es el potencial de la celda C para que el uso de suelo pase a ser i .
- ε es un término de perturbación aleatoria. Debido a que en la fórmula utilizada en el presente modelo los valores del potencial de cada celda varían entre 0 o 1, Se definieron cuatro posibles valores que permiten ajustar el grado de aleatoriedad: nulo, donde el término de perturbación no es utilizado para el cálculo del potencial de las celdas; bajo, valores que oscilan entre 0 y 0.1; medio, valores en el rango de 0 a 0.3; y alto, valores entre 0 y 0.6.
- $I_{C,i}$ y $A_{C,i}$ es el efecto que el factor I y A tienen sobre la celda C para que esta tenga un uso de suelo i .
- $N_{C,i}$ es el efecto que el vecindario tiene sobre la celda C para que esta tenga un uso de suelo i . Para determinar cuál es el efecto que tiene una celda del vecindario sobre

la celda central se optó por utilizar una vecindad Moore de radio 4, lo cual significa que el valor del efecto del vecindario de una celda depende de las 80 celdas circundantes a la misma. Este efecto de decaimiento consiste en que la influencia de “atracción” de las áreas urbanas sobre las celdas vecinas a la hora de desarrollarse nuevas edificaciones, se hace menor a medida que nos alejamos de ellas.

- La introducción de los parámetros de ponderación $\vartheta^1, \vartheta^2, \vartheta^3$ se debe a que uno de los requerimientos principales del modelo es proveerle al usuario la capacidad de variar la importancia que tienen las diferentes variables y factores considerados a la hora de realizar la simulación, mediante el método de decisión multicriterio AHP (Saaty 1980).

Fue posible también aplicar un factor de difusión y uno de propagación. A través de su incorporación se logra evitar que, luego de una cierta cantidad de iteraciones, las celdas que son pasadas a un uso de suelo urbanizado se encuentren concentradas en una misma zona y, de esta forma, se logra aumentar el grado de similitud de los resultados con respecto a las muestras reales.

Los valores del factor de difusión están comprendidos en el rango entre 0 y 4 y su valor es utilizado en el momento que el estado de una celda está por ser transformado. Por ejemplo, un factor igual a tres indica que la celda solo puede ser pasada al estado “urbanizado” si, y solo si, dentro de un radio de tamaño tres ninguna celda ha sido transformada dentro de la misma iteración.

El factor de propagación es utilizado para controlar el porcentaje de celdas que son pasadas al estado de urbanizada dentro de la cercanía o lejanía a las construcciones existentes. Los valores van desde 0, en donde la totalidad de las celdas a transformar son escogidas comenzando por aquellas que se encuentren más cercanas a celdas urbanizadas, hasta 10, valor que significa que el 100% de las celdas a transformar son elegidas sobre aquellas que se encuentren más alejadas a celdas urbanizadas. Para definir los conceptos de

cercanía o lejanía en el modelo se hizo uso del vecindario de 80 celdas que rodea a la celda en cuestión; de esta forma se consideró como celdas cercanas a aquellas cuyo valor de vecindario sea elevado y, celdas lejanas a aquellas cuyo valor de vecindario es mínimo. Las celdas con valores inferiores al umbral establecido por el usuario quedan excluidas de los cálculos. Este umbral se expresa en puntajes estandarizados entre 0 y 0.7, donde el 0 indica el mínimo de vecindad posible y 0.7 cercano a la máxima que es 1.

Finalmente, contar con la situación real de las áreas urbanas permite validar el resultado, es decir, verificar cual es el grado de correspondencia entre lo predicho por el modelo y la realidad. Para tal fin, en este trabajo se emplean dos métodos de comparación de los resultados simulados con los valores reales de suelo ocupado por la ciudad: la comparación visual de los mapas y una evaluación cuantitativa mediante matrices de confusión. La matriz de confusión permite deducir cuatro medidas relativas a la exactitud de los resultados: exactitud global, exactitud del usuario, exactitud del productor y coeficiente Kappa.

APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La aplicación se realiza sobre la ciudad de Tandil, una ciudad intermedia de la Provincia de Buenos Aires que cuenta con una población de 116.945 habitantes según los datos oficiales del último Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas (2010). En esta aplicación se pretende experimentar mediante simulaciones los diferentes tipos de escenarios que podrían darse en dicha ciudad en el año 2040 según evolucione su tasa y forma de urbanización.

Para obtener los diferentes escenarios se partió por extraer el área urbana edificada para el año 1991 (Figura 2) y desde ese año se realizaron las simulaciones sucesivas modificando significativamente la sensibilidad de los parámetros incluidos en SACcity.

En el escenario 1 (Figura 2) se intenta reproducir hasta 2040 las lógicas de crecimiento ocurridas durante 1991 y 2001, en donde el factor de accesibilidad resulta ser el más importante y donde los

factores de difusión y propagación son medios (Aleatoriedad: Media; Difusión: 3; Propagación: 6; Umbral: 0.5 y Ponderación: Topografía=1/3, Accesibilidad=3 y Vecindad=2).

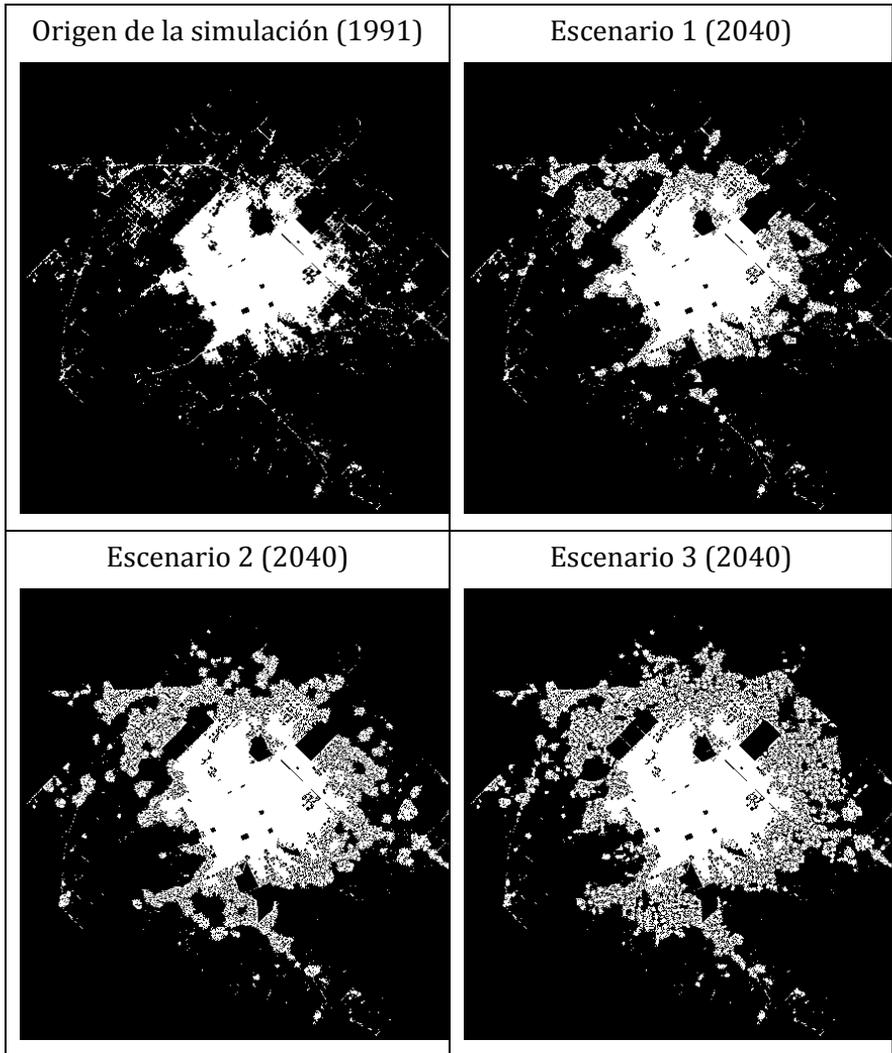


Figura 2. Mapas respectivos a la superficie edificada en 1991 y escenarios alternativos en 2040. Ciudad de Tandil. Elaboración del autor.

En el escenario 2 (Figura 2) se aplica un similar comportamiento con respecto a los factores pero se duplica la tasa de edificación con respecto a lo ocurrido durante el decenio 1991-2001, pasando de 500 a 1000 nuevas celdas por año (Aleatoriedad: Media; Difusión: 3; Propagación: 6; Umbral: 0.5 y Ponderación: Topografía=1/3, Accesibilidad=3 y Vecindad=2).

En el escenario 3 (Figura 2), se emplea una elevada tasa de edificación anual, idéntica a la del escenario 2, pero simulando un patrón de urbanización mucho más disperso, con altos factores de difusión y propagación (Aleatoriedad: Media; Difusión: 4; Propagación: 8; Umbral: 0.5 y Ponderación: Topografía=1, Accesibilidad=1 y Vecindad=1).

Los indicadores de validación de las simulaciones indican que un patrón de dispersión medio y crecimiento moderado es el comportamiento que mejor se adecua para describir el crecimiento de la ciudad de Tandil, arrojando un coeficiente Kappa de 0.83 para el escenario 1, superior a 0.72 y 0.66 correspondiente a los escenarios 2 y 3. Sin embargo, vale la pena destacar que las evaluaciones fueron ejecutadas sobre lo ocurrido en los primeros 10 años del proceso de simulación (1991-2001), y es de esperar que los patrones de expansión urbana hayan sido fuertemente influenciados por el dinamismo del sector inmobiliario (y económico en general) que caracterizo a la última década de nuestro país, mostrando cambios sustantivos en los indicadores obtenidos.

Los resultados de las simulaciones nos permiten demostrar cómo, de seguir con la una tasa de edificación anual similar al período 1991-2001 (escenario 1), en el 2040 el área urbana edificada de Tandil aumentaría un 26,5 por ciento, es decir pasaría de 2113 ha en 1991 a 2674 ha en 2040. Mientras que si se duplica la tasa de edificación anual de referencia, aunque sin modificar los parámetros, se estima un crecimiento futuro de 58,2 por ciento, llegando a 3.344 ha para el año 2040. Esto se incrementaría si los procesos de difusión y propagación avanzan y las restricciones para la urbanización asignadas disminuyen, llegando a 3754 ha para 2040, es decir, un 77,6 por ciento.

El área de crecimiento en el escenario 1 estaría definida por la zona residencial en proceso de consolidación hacia el Norte y

Noreste de la ciudad, manteniendo algunos intersticios entre los barrios que la conforman, y una franja próxima circundante a la actual zona residencial consolidada en el Sur y Sur-Oeste del área urbana. Al duplicar la tasa de edificación, el escenario cambiaría significativamente, los vacíos urbanos desaparecen en el Norte y Noreste mientras que hacia el Sur-Este, Sur y Sur-Oeste se observa un incremento considerable de la superficie edificada, tanto alrededor de las áreas residenciales consolidadas como sobre los ejes turísticos de la ciudad. Finalmente, si el peso de la accesibilidad deja de incidir positivamente, ni el de la topografía negativamente y la difusión y propagación (dispersión) aumenta, una cuarta corona continua a una distancia de 5500 metros del área central se habrá consolidado por completo.

CONCLUSIÓN Y REFLEXIONES

Los diferentes escenarios obtenidos permiten corroborar la versatilidad de las simulaciones para adaptarse a los conocimientos y criterios de los usuarios expertos. La posibilidad de incorporar parámetros de aleatoriedad, difusión y propagación en una misma aplicación, resulta un aporte novedoso para la simulación urbana, y permite una mayor utilidad de la herramienta al adaptarse a diferentes contextos urbanos.

De la misma manera, la posibilidad de realizar una ponderación diferencial permite, por un lado, darle la justa importancia a cada uno de los factores considerados, y por otro, como se presenta en nuestro ejemplo, conocer efectivamente cuál de ellos resulta determinante para explicar la forma en que una ciudad se expande.

Resumiendo estos rasgos, podríamos decir que la aplicación de AC en la investigación de fenómenos urbanos, significa un estrechamiento de la distancia entre los procesos que ocurren en la realidad y los modelados mediante tecnologías de la información geográfica. Los muy altos resultados arrojados en los índices de validación empleados así lo manifiestan.

Podemos considerar que los resultados de los modelos y datos obtenidos poseen un alto potencial de transferencia al proceso de ordenamiento territorial, como insumo para la regulación y ordenamiento del crecimiento urbano. Específicamente podrían ser empleados para evaluar si es necesario readecuar los planes de desarrollo urbano en las ciudades en orientación a regenerar y reutilizar las zonas degradadas y abandonadas; evitar el crecimiento urbano desmesurado, logrando densidades urbanas apropiadas y priorizando el desarrollo urbano en áreas ocupadas frente a áreas de valor ambiental; asegurar un urbanismo de usos del suelo mixtos, con un balance equilibrado entre la actividad laboral, residencial y de servicios, dando prioridad a un uso residencial en el núcleo urbano y, asegurar una conservación, renovación y reutilización apropiada de nuestra herencia cultural urbana.

No obstante, existen muchos aspectos en los que se podría avanzar en esta aplicación, o en desarrollos similares futuros. En principio, sobre las variables tenidas en cuenta en este trabajo (área urbanizada, distancia a red de transporte, distancia a centralidades, altitud, pendiente, área urbanizable y áreas prohibidas), las cuales son consideradas como las principales condicionantes del crecimiento urbano pero la simulación de este fenómeno se optimizaría considerablemente si se incluyen otras variables vinculadas a las actividades socio-económicas, características geotécnicas del suelo, zonas de riesgos y diversos indicadores urbanísticos que rigen legalmente el uso del suelo urbano.

Por otra parte, los modelos desarrollados en este trabajo sólo consideran dos posibles coberturas o clases de suelo: urbanizado y no-urbanizado. De esta forma, las simulaciones permiten ver cómo crece o se expande la ciudad en su conjunto. En trabajos futuros se podrían incorporar más clases que representen con mayor fidelidad a la morfología interna de las ciudades. Así, por ejemplo, podríamos tener los tipos de suelo residencial, comercial, industrial, etcétera, permitiendo ver, no sólo cómo crece la ciudad en su conjunto, sino también de qué manera crece cada uso a medida que crece la ciudad. Varios autores trabajan los modelos de crecimiento urbano de esta forma, como es el caso de Alkheder y Shan (2005), que representan la estructura de la ciudad con siete tipos de coberturas distintos (Agua, Camino, Urbanizado, Bosque, Pastura, Cultivo, Sin-Clasificar),

o el de Lahti (2008) que permite configurar la aplicación para incorporar hasta 15 tipos de uso de suelo diferentes.

BIBLIOGRAFÍA

- Alkheder, S. y J. Shan 2005. *Cellular Automata Urban Growth Simulation and Evaluation - A Case Study of Indianapolis*. Geomatics Engineering. School of Civil Engineering. Purdue University. Disponible en:
<http://www.geocomputation.org/2005/Alkheder.pdf>
- Aguilera Ontiveros, A. 2002. *Ciudades como tableros de ajedrez. Introducción al modelado de dinámicas urbanas con autómatas celulares*. Colección Investigaciones del Colegio de San Luis. San Luís de Potosí, México.
- Allen, P.M. 1997. Cities and regions as evolutionary, complex systems. *Geographical Systems* 4:103-30.
- Batty, M. y P. Longley. 1994. *Fractal cities: a geometry of form and function*. London, Academic Press.
- Batty, M.; H. Couclelis y M. Eichen. 1997. Urban systems as cellular automata. *Environment and Planning B: Planning and Design* 24(2): 159-164.
- Buzai, G. y C. Baxendale. 2006. *Análisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica*. Buenos Aires, Lugar editorial S.A.
- Clarke, K.C.; S. Hoppen y L.J. Gaydos. 1997. A self modifying cellular automaton of historical urbanization in the San Fransico Bay area. *Enviroment and Planning B*. 24(2): 247-261.
- Cuervo González, L.M. 2000. Economía y ciudad: algunas propuestas teóricas. En A. C. Torres Ribeiro, *Repensando a experiênciã urbana da América Latina: questões, conceitos e valores*: 61-76.
- Dyckman, J.W. 1963. The scientific world of the city planners. *American Behavioral Scientist* 6: 46-50.
- Gómez Delgado, M. y V.M. Rodríguez Espinosa. 2012. *Análisis de la dinámica urbana y simulación de escenarios de desarrollo futuro con tecnologías de la información geográfica*. RA-MA Editorial, Madrid, España.
- Henríquez, C., G. Azócar y M. Aguayo. 2006. Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación

- espacial en Los Ángeles, VIII región del Biobío, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande* 36: 61-74.
- Lahti, J. 2008. *Modelling urban growth using cellular automata: a case study of Sydney, Australia*. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. Holanda. Disponible en:
http://www.itc.nl/library/papers_2008/msc/gem/lahti.pdf
- Lan, D., S.Linares, J. Di Nucci y M. López Pons. 2010. La lógica de la organización espacial en la Ciudad de Tandil. En: D. Elias; M. E. B. Sposito y B. R. Soares (Org.). *Agentes econômicos e reestruturação urbana e regional: Tandil e Uberlândia*: 29-155. São Paulo.
- Longley, P.A., M.F. Goodchild, D.J. Maguire y D.W. Rhind. 2013. Modelagem Espacial com SIG. En: P. A. Longley *et al. Sistemas e Ciência da Informação Geográfica*: 403-423. Bookman, Porto Alegre, Brasil. (Tercera edición).
- Meliendrez, M. y S. Milía 2011. Modelos de autómatas celulares aplicados al estudio de crecimiento urbano. Tesis de Licenciatura en Sistemas inédita. Facultad de Ciencias Exactas, UNCPBA.
- Polidori, M. C. 2004. *Crescimento urbano e ambiente – Um estudo exploratório sobre as transformações e o futuro da cidade*. Tese de Doutorado. UFRGS - PPGECCO. Porto Alegre.
- Prigogine, I. y I. Stengers. 1984. *Order out of chaos: man's new dialogue with nature*. London, UK, Heinemann.
- Saaty, T. L. 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill. Nueva York.
- Tobler, W. 1979. Cellular Geography. En: S. Gale and G. Olsson (eds.), *Philosophy in Geography*: 379-386.
- Von Neumann, J. 1966. *Theory of self-reproducing automata*. (Burks, A.W. Ed.). University of Illinois Press, Urbana: 63-87.
<http://www.history-computer.com/Library/VonNeumann1.pdf>
Acceso: 10 de Junio de 2015.
- White, R. y G. Engelen, 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., G. Engelen y I. Uljee. 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.
- Wilson, A. G. 1981. *Catastrophe theory and bifurcation: applications to urban and regional systems*. London, Croom Helm.
- Wolfram, S. 1986. Theory and applications of cellular automata. *World Scientific Publishing Co.* : 333-342. Hong Kong.