

EXPANSIÓN URBANA MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y MODELOS EMERGENTES: APLICACIÓN A LA CIUDAD TANDIL (BUENOS AIRES, ARGENTINA)

Santiago Linares
Centro de Investigaciones Geográficas, IGEHCS - CONICET / UNCPBA, Argentina
E-mail: slinares@fch.unicen.edu.ar

Mariana del Fresno
Departamento de Computación y Sistemas, PLADEMA - CIC-PBA / UNCPBA, Argentina
E-mail: mdelfres@exa.unicen.edu.ar

Martín Meliendrez
Departamento de Computación y Sistemas, UNCPBA, Argentina
E-mail: martinmeliendrez@gmail.com

Abstract

Es evidente en los estudios sobre procesos que se desenvuelven en el espacio urbano que el modelado emergente se ha afianzado como una metodología idónea para abordar procesos complejos que caracterizan a la dinámica socioespacial. La mayoría de los antecedentes desde este enfoque han aplicado satisfactoriamente autómatas celulares para simular procesos tales como desplazamientos peatonales y automotor, cambios en el uso del suelo, surgimiento de nuevas centralidades, expansión urbana y segregación socioespacial.

Sin embargo, existen escasos antecedentes de abordajes basados en esta metodología al espacio urbano latinoamericano y prácticamente inexistentes los desarrollos propios de aplicaciones informáticas que permitan ejecutar modelos de simulación emergente, es por ello que el objetivo del presente trabajo es presentar una aplicación computacional compatible con Sistemas de Información Geográfica

que brinda facilidades para el estudio y comprensión del fenómeno de crecimiento y expansión urbana en ciudades argentinas de tamaño intermedio mediante el uso de autómatas celulares.

1 Introducción

El marco teórico y metodológico que sustenta los tradicionales modelos de estructuración urbana se refieren a un período histórico en el que la ciudad era muy diferente con respecto a las manifestaciones contemporáneas. Tradicionalmente las ciudades eran representadas con un único distrito central caracterizado por la concentración de materias primas, mano de obra y densidad de comercios y servicios; mientras que en la actualidad este escenario se transformó sustancialmente, las ciudades tienden a ser policéntricas como consecuencia del acceso masivo del automóvil, la difusión y diversificación de los servicios y las nuevas tecnologías de la información y comunicación.

Es por ello que muchos abordajes actuales, basados en teorías clásicas sobre el desarrollo urbano, encuentran limitaciones para simularla y describir el carácter cambiante de los sub-espacios que en su interior se desarrollan. En consecuencia, hay una necesidad de implementar modelos que sean tan flexibles y dinámicos en sus capacidades de simulación como lo es la ciudad en su capacidad para evolucionar.

Una solución viable a estos problemas es posible encontrarla en los modelos basados en la teoría de la complejidad. Este enfoque se basa en delegar la simulación a macro-escala de la estructura urbana a un conjunto de sub-modelos dinámicos a micro-escala derivados de la teoría de la complejidad. Estos enfoques tratan de representar los actores individuales (o grupos) en un sistema dado, quienes pueden interactuar entre sí y/o con un entorno. A partir de la

agregación de estas interacciones es que se configuran los comportamientos macro-escala.

Desde este punto de vista, la teoría de la complejidad puede ser considerada como un nuevo enfoque sistémico, que estudia la relación entre las partes y el todo de una manera diferente, haciendo hincapié en la idea de una estructura emergente de un proceso ascendente, donde las acciones locales y las interacciones producen el patrón global. Los procesos dinámicos intraurbanos resultan ser más importantes que la estructura en sí, ya que permiten la comprensión de dichos sistemas para ir más allá de la descripción (en términos estáticos), hacia la captura de la esencia interna de los fenómenos de cambio (Batty 2000; Wu 2002; Casti 1997).

Diferentes modelos desde la teoría de la complejidad han sido utilizados para simular la dinámica urbana, dentro de los cuales se encuentran los modelos estadísticos, modelos basados en agentes, modelos fractales, modelos de redes neuronales artificiales y modelos basados en autómatas celulares (Buzai y Baxendale 2006). En este artículo presentamos una aplicación informática que recupera gran parte de los avances desarrollados sobre los modelos basados en autómatas celulares.

2 Autómatas celulares aplicados al crecimiento urbano

El trabajo trascendental donde el concepto de autómatas celulares (AC) fue aplicado en su totalidad para abordar procesos socio-espaciales tuvo lugar en 1979, cuando el geógrafo Waldo Tobler desarrolló el concepto de AC para

modelar y predecir el crecimiento urbano de una ciudad (Tobler 1979). En su trabajo, planteó la idea de cómo los AC pueden funcionar como una herramienta útil para el planeamiento urbano y cómo se pueden obtener las mejores reglas de transición. Tobler definió una ley que sería muy importante en el desarrollo de modelos predictivos para el crecimiento urbano: “en geografía todo está relacionado con todo, pero las cosas más cercanas están más relacionadas que las lejanas”. Esto significa que la cercanía o lejanía de ciertos tipos de procesos o actividades inhibe o estimula el surgimiento y desarrollo de otras actividades en sus cercanías.

Muchos autores siguieron la línea del modelo definido por Tobler, como por ejemplo Couclelis (1985, 1988), Itami (1988) y Phipps (1989); pero fue a partir de la década del noventa donde aparecieron los modelos con los que se ha logrado representar más fielmente la realidad y con los que mejores resultados se han obtenido. Entre estos antecedentes destacamos los trabajos de Kramer (1996), Batty (1997), Semboloni (1999), Torrens (2000), O’Sullivan y Torrens (2000), Li y Yeh (2001, 2002), Masanori (2003), Oguz et al. (2007), Watkiss (2008) y Al-ahmadi et al. (2009).

Una de las propuestas metodológicas más destacadas es el modelo SLEUTH desarrollado por Clarke et al. (1997), quienes utilizan como entradas cinco variables que definieron de la siguiente manera: *Slope*, *Land use area*, *Excluded area*, *Urban area*, *Transportation map*, *Hillshade area*. A su vez, el modelo emplea cinco factores para controlar el comportamiento del sistema: difusión, reproducción, propagación, pendiente y distancia a rutas.

Finalmente, la aplicación más aceptada de AC para modelar las dinámicas urbanas la presentan White y Engelen (1993). El procedimiento que desarrollaron une los conceptos definidos en el modelo geográfico de Tobler (1979) junto con el supuesto de que el potencial de una célula para someterse a cierta transformación del uso del suelo depende de los estados de las células vecinas.

Formalmente, el autómata celular de White y Engelen consta de un espacio celular finito que representa un área urbana hipotética. Los distintos usos de suelo son identificados con los elementos del conjunto de estados del autómata celular. Se definen dos tipos de estados: los activos y los fijos. Los primeros representan usos de suelo convencionales, tales como residencial o comercial, los cuales pueden cambiar con el tiempo. Los segundos representan la infraestructura vial o accidentes naturales del terreno como, por ejemplo, un río o una barranca.

Las reglas de transición de estado son definidas a través de una función que relaciona cuatro diferentes tipos de factores:

- Las conveniencias intrínsecas entre los distintos usos de suelo, que representan aspectos heterogéneos del espacio geográfico que está siendo modelado. Estas conveniencias para que un uso de suelo, localizado en un punto específico, se transforme en otro o permanezca sin cambio están relacionadas con cuestiones que van desde la calidad del suelo hasta restricciones legales o presiones económicas especulativas.
- El efecto que sobre un uso de suelo específico tienen los usos de suelo aledaños. Este tipo de efecto puede ser atractivo o repulsivo, ya que algunos

tipos de suelo atraen a unos y repelen a otros. Por ejemplo, un uso de suelo residencial atrae el uso comercial, mientras que repele el industrial.

- El efecto de la accesibilidad local, que representa la facilidad de acceso a la red de transporte.
- La perturbación estocástica que captura el efecto del conocimiento imperfecto y comportamientos variables de los actores sociales en relación a los usos del suelo.

El modelo de White y Engelen introduce un conjunto de cambios respecto a los modelos de AC clásicos que se venían aplicando. Por un lado, rompieron con la tradición del decaimiento monótono de la influencia del vecindario a medida que aumenta la distancia. En su lugar, usaron pesos $W_{x,d,j}$ para representar el balance de las fuerzas de atracción y repulsión que tienen lugar en los diferentes tipos de uso de suelos. Como la suma de dos fuerzas opuestas, el peso $W_{x,d,j}$ no es necesariamente monótono y hasta puede ser negativo. Otra diferencia importante respecto a los modelos tradicionales de AC radica en la introducción de un orden estricto de posibles transiciones entre los usos de suelo. El modelo solo permite que los usos de suelo cambien siguiendo una secuencia definida previamente. Por ejemplo, dado un modelo donde existen 4 posibles estados de uso de suelo una posible secuencia de cambio es: libre → vivienda → industrial → comercial.

3 Precisiones metodológicas del modelo propuesto

Muchos estudios han mostrado que la integración entre Sistemas de Información Geográfica (SIG) y modelos de CA puede ser usada para entender, simular y predecir satisfactoriamente el crecimiento urbano. En este sentido es se planteó desarrollar una aplicación en el lenguaje Java, la cual hemos llamado SACcity, que emplee las funcionalidades y modelo de datos de los productos de la empresa ESRI, como ArcGIS Desktop 9.3 y ArcGIS Engine 9.3.

El desarrollo de aplicaciones utilizando las funcionalidades desarrolladas por ESRI tiene una serie de ventajas:

- El framework proporcionado por ArcGIS para el desarrollo de aplicaciones SIG, es el mismo utilizado en la construcción de los productos ArcGIS Desktop, lo que facilita que las entradas y salidas del programa desarrollado puedan ser manipuladas con los demás productos ArcGIS existentes.
- Para facilitar el diseño de las aplicaciones, ArcGIS Engine incluye un conjunto de componentes reutilizables para proporcionar funciones gráficas, los cuales están desarrollados como componentes AWT. La API de Java para ArcObjects permite que estos controles estén disponibles para su uso como componentes visuales.
- ArcGIS Engine proporciona múltiples interfaces para la programación de aplicaciones (APIs). El software ArcGIS Engine Development Kit para Java viene con una colección de herramientas que permiten realizar una serie de

funciones tales como: mostrar mapas con múltiples capas, buscar y encontrar características en el mapa, dibujar imágenes a partir de fotografías aéreas o imágenes de satélite, dibujar las características gráficas, tales como puntos, líneas, círculos y polígonos, identificar las características en el mapa.

La Figura 1 muestra la interfaz del usuario donde puede observarse la integración entre ambos componentes.

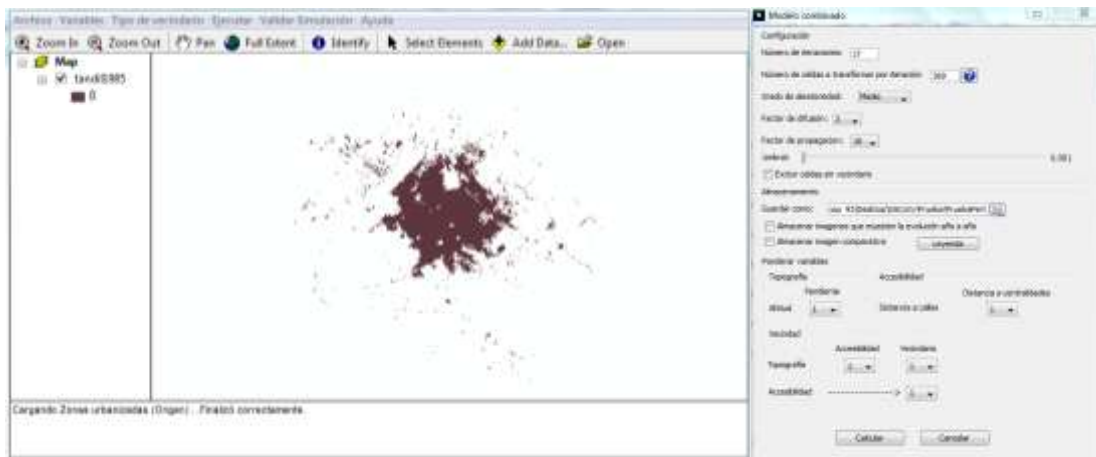


Figura 1 Aplicación SACcity

3.1 Variables del modelo

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 en esta aplicación son las más utilizadas en los antecedentes basados en AC.

En primer lugar se tuvo en cuenta el suelo urbanizado representado por el área urbana construida en la ciudad de Tandil para los años 1985 y 2002 (Figura 2), que se considera como la variable a explicar o dependiente.

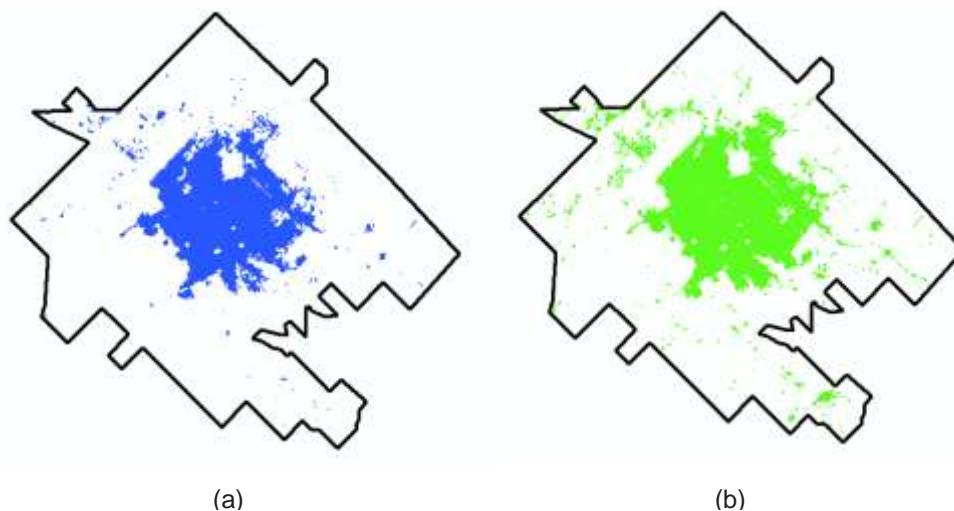


Figura 2 Mapa de áreas construidas: Tandil, años 1985 (a) y 2002 (b)

En segundo lugar se considera que la red de transporte desempeña un papel fundamental en el proceso de expansión urbana, y es por ello que las variables de distancia a vías de comunicación fueron tenidas en cuenta. La distancia simplemente se calcula como la distancia euclidiana a la vía de transporte más cercana y es considerada como una medida de accesibilidad geográfica, por lo que los valores más bajos de distancia implican una mayor probabilidad de cambio. La Figura 3 muestra un mapa de de distancias a calles representado con una escala de grises, que va desde el negro más profundo (distancia cero, o mínima distancia que puede existir entre un punto de la zona estudiada y la calle más cercana a ese punto) variando gradualmente en

intensidad hasta llegar al blanco (máxima distancia que puede haber entre un punto de la zona estudiada y la calle más cercana a ese punto).

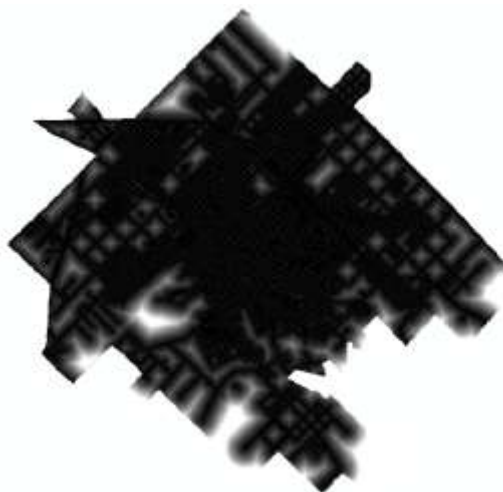


Figura 3 Mapa de distancias a calles

En tercer lugar, se han tenido en cuenta las variables de pendiente y de altura (sobre el nivel del mar). Para el caso de la pendiente, se trata de una variable que oscila entre 0% (0 grados) y 100% (90 grados), mientras que la altura es una variable que puede tomar cualquier valor positivo. Cuanto mayor es el ángulo de la pendiente, menor es la probabilidad de cambio. De forma similar, y en concordancia con las restricciones a la construcción que caracterizan a Tandil, cuanto menor es la altura, mayor es la probabilidad de cambio. La Figura 4 muestra mapas de pendientes (a) y de altitudes (b), también representados con escalas de grises. En el caso del mapa de pendientes, el negro más profundo equivale al menor grado de pendiente que existe en el área de estudio, mientras que el blanco representa el mayor grado posible. En el caso del mapa de altitudes,

el negro simboliza la menor altitud que existe en el área de estudio, mientras que el blanco simboliza la máxima.

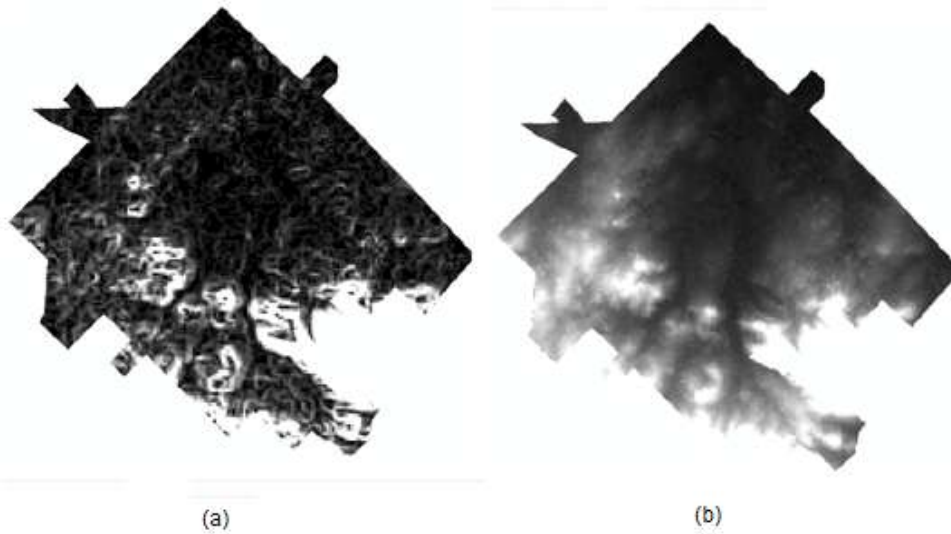


Figura 4 Mapa de pendientes (a) y mapa de altitud (b)

En cuarto y último lugar, se considera que las políticas de planeamiento también condicionan los procesos urbanos, y por ello han sido incluidos dos aspectos básicos asociados a ello. Primero, al momento de definir el área potencialmente urbanizable, representado en nuestro caso por las zonas urbanas y complementarias que se encuentran delimitadas en el Plan de Desarrollo Territorial de Tandil (2005); y segundo, incluyendo una máscara de análisis que permite eliminar aquellas zonas con restricciones a ser urbanizadas, tales como zonas destinadas a uso militar, recreativo o equipamiento colectivo (Figura 5).

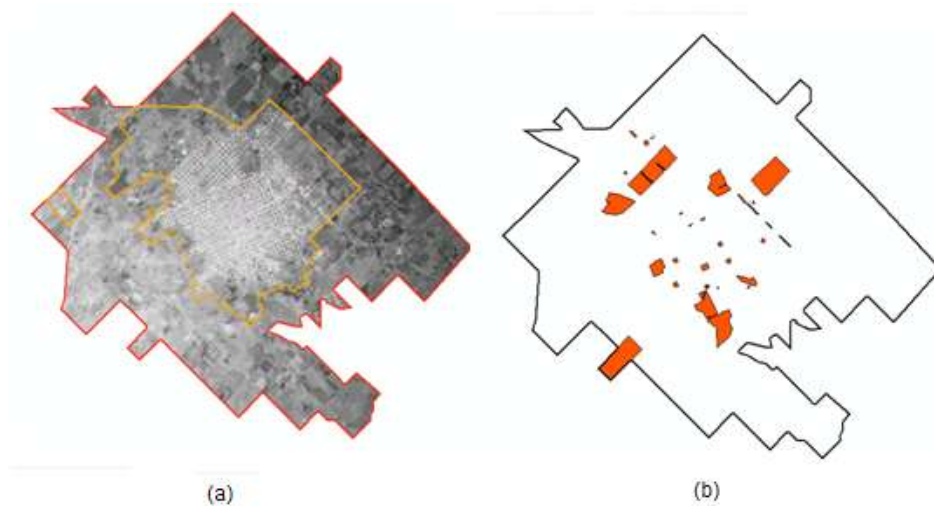


Figura 5 Mapa de áreas complementarias y urbanas (a) y zonas restrictivas (b)

3.2 Modelado de algoritmos para predecir el crecimiento urbano

La aplicación construida permite la ejecución de dos modelos diferentes: un **modelo de AC clásico**, en donde a partir de reglas locales simples se buscan generar patrones complejos de urbanización a nivel global; y un **modelo de AC combinado** en el cual se incorpora un método de decisión multicriterio, que introduce un factor de difusión 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. Es por ello que este artículo profundiza solo sobre el último de los modelos citados.

El modelo de AC diferencia entre dos usos del suelo, definidos según el sistema de clasificación de Anderson et al. (1976) 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.

En la construcción del modelo de AC combinado se decidió hacer una adaptación del desarrollado por White y Engelen (1997), introduciendo los factores de difusión y propagación considerados en el modelo de Clarke et al. (1997) y agregando un método de decisión multicriterio para permitirle al usuario ponderar las variables consideradas. Para el modelo elaborado podemos detallar los distintos componentes que conforman un autómata celular:

- **Conjunto finito de estados:** a diferencia del modelo desarrollado por White y Engelen, donde varios tipos de uso de suelo son considerados, 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.
- **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. 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.

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

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

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.
- $I_{C,i}$ es el efecto que la topografía tiene sobre la celda C para que esta tenga un uso de suelo i . Se calcula como:

$$I_{C,i} = Pendiente * \vartheta^4 + Altitud * \vartheta^5 \quad (2)$$

y

$$Pendiente = \frac{Máxima Pendiente - Pendiente del pixel}{Máxima Pendiente} \quad (3)$$

El cálculo de *Altitud* es similar al mostrado para *Pendiente*.

- $A_{C,i}$ es el efecto que la accesibilidad tiene sobre la celda C para que esta tenga un uso de suelo i .

$$A_{C,i} = \text{DistaciaCentro} * \vartheta^6 + \text{DistanciaCalle} * \vartheta^7 \quad (4)$$

Los valores de *DistanciaCentro* y *DistanciaCalle* se calculan de forma similar a la ecuación 3.

- $N_{C,i}$ 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 (ver Tabla 1). 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. Este mismo efecto ha sido planteado en otros modelos basados en autómatas celulares (White et al. 1997; White y Engelen 2000; Barredo et al. 2003).

Tabla 1 Matriz que indica el efecto que tienen las celdas del vecindario sobre la celda central.

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

- La introducción de los parámetros de ponderación $\vartheta^1, \vartheta^2, \vartheta^3, \vartheta^4, \vartheta^5, \vartheta^6, \vartheta^7$ 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 consideradas a la hora de realizar la simulación. Para permitirle al usuario ponderar las variables del modelo, se optó por usar un método de decisión multicriterio: *el proceso de análisis jerárquico* (Saaty 1980).

Dos aspectos que nos parecieron interesantes dentro del modelo SLEUTH y que decidimos integrar al modelo desarrollado, son la existencia de 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* (1) y una *evaluación cuantitativa mediante matrices de confusión* (2). 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*.

4 Aplicación y análisis de los resultados

Tandil es una ciudad de la Provincia de Buenos Aires que se encuentra situada a 331 km de Buenos Aires, capital federal del país y cuenta con una población de 116.945 habitantes según los datos oficiales del último Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas (2010); su población se distribuye en un área urbanizada de aproximadamente 48 km² de tal forma que la densidad demográfica promedio es de 2.500 hab/km², existiendo importantes diferencias en su interior que van desde 8.000 hab/km² en el área central a 1.000 hab/km² en las áreas transicionales entre los usos rurales y urbanos.

Para obtener una óptima simulación de la ciudad de Tandil durante el período considerado (1985-2002), se optó por realizar evaluaciones sucesivas de la incidencia o sensibilidad que los parámetros incluidos en SACcity poseen para modelizar el crecimiento y expansión de la ciudad.

El primer parámetro a analizar fue el grado de aleatoriedad óptimo para simular la expansión de la ciudad de Tandil. Este parámetro, que permite seleccionar cuatro niveles (nulo, bajo, medio y alto), captura el efecto del conocimiento imperfecto y de las tendencias variables entre los actores implicados en la producción y estructuración del espacio urbano.

En la Figura 6 se muestra como la inclusión del grado de aleatoriedad favorece crecientemente los resultados de la simulación, corroborando la existencia de factores azarosos en los procesos territoriales que acontecen en la realidad. Podemos afirmar también que el nivel medio parece ser el más apropiado para implementar al simular la expansión de las ciudades, o al menos en las de tamaño intermedio como es este caso.

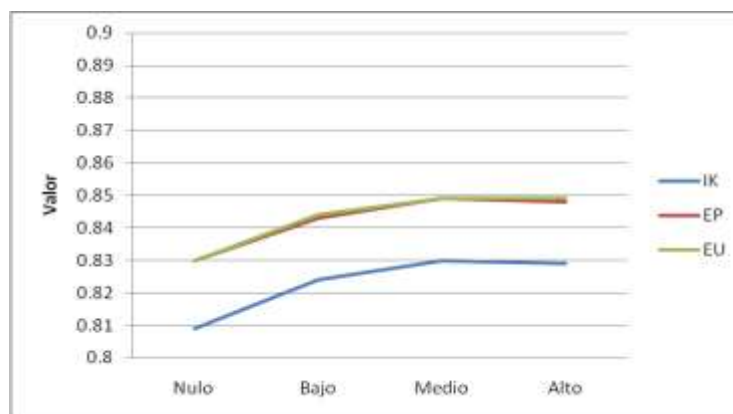


Figura 6 Comportamiento de los índices de validación según el grado de aleatoriedad introducido al modelo

Siguiendo los requerimientos solicitados para ejecutar el modelo AC combinado, es necesario completar los factores de difusión y propagación. Ambos,

aunque con características diferentes, permiten al usuario introducir el grado de dispersión asociado al crecimiento urbano de la ciudad en cuestión, y que por ende, será incorporado en la simulación posterior. La Figura 7 presenta los resultados de ejecutar el modelo con diferentes valores de difusión y propagación. De alguna manera este parámetro permite evaluar si el crecimiento de una ciudad se produce de forma continua o compacta, o por el contrario, si refleja una expansión dispersa o difusa. Se observa para el caso de Tandil que valores altos y medios altos de difusión y propagación estarían exagerando la dispersión urbana, mientras que valores nulos asociado a una compactación extrema tampoco parecen adecuados, la opción de difusión y propagación media sería la más representativa para esta escala urbana.

Validación			Parámetro	configuración
IK	EP	EU		
0.859	0.866	0.885	difusión	1
			propagación	1
			umbral	0.7
0.864	0.863	0.895	difusión	2
			propagación	4
			umbral	0.5
0.813	0.834	0.834	difusión	3
			propagación	7
			umbral	0.2
0.752	0.78	0.78	difusión	4
			propagación	10
			umbral	0.05

Figura 7 Comportamiento de los índices de validación según el grado de difusión y propagación introducido al modelo

Finalmente, es posible ponderar diferencialmente las variables tenidas en cuenta para ejecutar el modelo. Esta ponderación, que se basa en el *Proceso de Análisis Jerárquico* otorgando la posibilidad al usuario de asignarle mayor peso a aquella variable que considere, en base a su conocimiento específico del área de estudio, más importantes o determinantes para explicar la expansión de la ciudad.

En nuestro caso, para conocer la sensibilidad que cada factor posee para explicar la expansión urbana de Tandil, realizamos tres ensayos en donde fueron sobreestimados respectivamente los factores considerados (Topografía, Accesibilidad y Vecindad). El resultado que se presenta en la Figura 8, mostró la destacada importancia que posee la configuración de la red de transporte para explicar la forma en que se expande la ciudad de Tandil, siendo ese factor de accesibilidad, compuesto por la distancia a calles y rutas y distancia al centro, el que mejor explica el crecimiento horizontal de la ciudad. En segunda instancia podrían señalarse las relaciones de contigüidad (vecindad) y finalmente las características topológicas, que parecieran ser un obstáculo de menor peso para la localización de nuevas edificaciones.

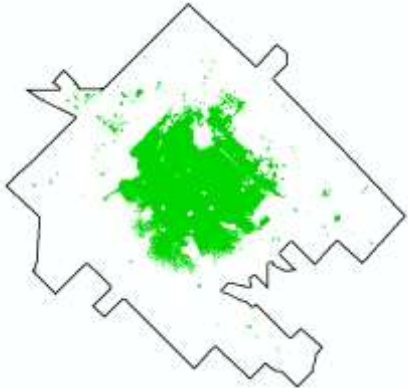
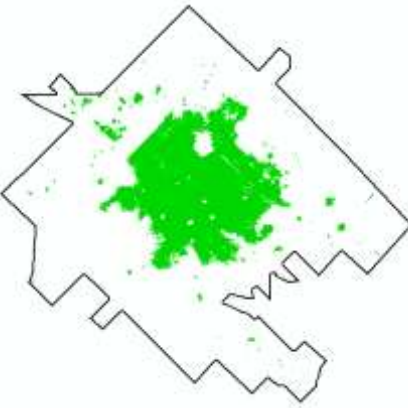
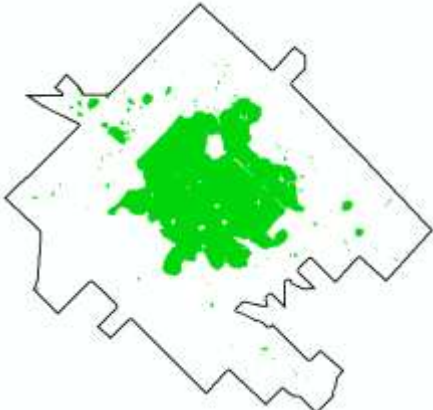
Modelo AC combinado	
Resultado	Parámetros
	<p>Aleatoriedad: Media Difusión: 2 Propagación: 4 Umbral: 0.5 Ponderación: T=9 A=1/9 V=1/9 Validación <i>Índice Kappa: 0.824</i> <i>Exactitud Productor: 81.3%</i> <i>Exactitud Usuario: 87.6%</i></p>
	<p>Aleatoriedad: Media Difusión: 2 Propagación: 4 Umbral: 0.5 Ponderación: T=1/9 A=1/9 V=9 Validación <i>Índice Kappa: 0.866</i> <i>Exactitud Productor: 85.6%</i> <i>Exactitud Usuario: 90.0%</i></p>
	<p>Aleatoriedad: Media Difusión: 2 Propagación: 4 Umbral: 0.5 Ponderación: T=1/9 A=9 V=1/9 Validación <i>Índice Kappa: 0.87</i> <i>Exactitud Productor: 86.9%</i> <i>Exactitud Usuario: 90.0%</i></p>

Figura 8 Resultados del modelo combinado variando las ponderaciones sobre los factores

5 Conclusión y recomendaciones para trabajos futuros

Los diferentes resultados del modelo propuesto permiten corroborar la versatilidad de la aplicación 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.

Consideramos 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.

Finalmente, se podrían incorporar a la investigación otro tipo de modelos de nueva generación como por ejemplo, los modelos basados en multi-agentes, que vienen mostrando excelentes propiedades para representar la complejidad que caracteriza a la dinámica socioespacial (Benenson 2004; Batty 2008; O'Sullivan 2008).

Agradecimientos

Nos gustaría expresar nuestro agradecimiento especial a Cristina Beatriz Massera, coordinadora de la Tecnicatura en SIG y Teledetección de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, por compartir mediante un trabajo conjunto de cooperación e investigación la licencia del software ArcGIS 9.3 necesaria para el desarrollo de esta aplicación.

Bibliografía

AGUILERA, F. Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares. *Revista*

Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica. N° 6. España. 2006 p. 81-112.

AGUILERA, F.; SORIA, J. A. y VALENZUELA, L. M. Explorando el crecimiento en la aglomeración urbana de Granada: un modelo basado en autómatas celulares. *El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas: actas [del] XII congreso nacional de tecnologías de la información geográfica*. España. 2006. p. 3-16.

ALKHEDER, S. y SHAN, J. *Cellular Automata Urban Growth Simulation and Evaluation - A Case Study of Indianapolis*. Geomatics Engineering. School of Civil Engineering. Purdue University. 2005. [En Línea]: <http://www.geocomputation.org/2005/Alkheder.pdf> Acceso: 9 de Febrero de 2011.

ALMEIDA, C. M.; BATTY, M.; MONTEIRO, A. M. V.; CAMARA, G.; SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C. y PENNACHIN C. L. Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. *Computers, Environment and Urban Systems*. Vol. 27. N° 5. 2003. p. 481-509.

ANDERSON, J. R.; HARDY, E. E.; ROACH, J. T. y WITMER, R. E. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. *U.S. Geological Survey Professional Paper*. N° 964. 1976.

BARREDO, J. I.; KASANKO, M.; MCCORMICK, N. y LAVALLE, C. Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata. *Landscape and Urban Planning*. Vol. 64. 2003. p. 145-160.

BATTY, M.; COUCLELIS, H. y EICHEN, M. Urban systems as cellular automata. *Environment and Planning B: Planning and Design*. Vol. 24. N° 2. 1997. p. 159-164.

BATTY, M. Less Is More, More Is Different: Complexity, Cities, and Emergence. *Environment and Planning B: Planning and Design*. Vol. 27. N° 2. 2000. p. 167-168.

BUZAI, G. D. Actualización de cálculos y distribuciones espaciales a través de Cadenas de Markov y Autómatas Celulares: Pérdida de suelos en el Área Metropolitana de Buenos Aires. *Primeras Jornadas Argentinas de Ecología de Paisajes*. 2005. [En Línea]: <http://www.gepama.com.ar/buzai/publicaciones/Buzai-JEP.pdf> Acceso: 4 de Septiembre de 2010.

BUZAI, G. D. y BAXENDALE, C. A. *Análisis socioespacial con sistemas de información geográfica*. Grupo de Ecología del Paisaje y Medio Ambiente (GEPAMA). Argentina. 2006. 400 p.

CASTI, J. L. *Would-Be Worlds: How Simulation Is Changing the Frontiers of Science*. John Wiley and Sons. Inglaterra. 1997. 256 p.

CHUVIECO, E. *Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio*. Editorial Ariel S. A. 3ª Edición. Barcelona. 2008. 610 p.

CLARKE, K. C.; HOPPEN, S. y GAYDOS, L. J. A self modifying cellular automaton of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B*. Vol. 24. N° 2. 1997. p. 247-261.

COUCLELIS, H. Cellular worlds: a framework for modeling micro-macro dynamics. *Environment and Planning B*. Vol. 17. N° 5. 1985. p. 585-596.

COUCLELIS, H. Of mice and men—what rodent populations can teach us about complex spatial dynamics. *Environment and Planning A*. Vol. 20. N° 1. 1988. p. 99-109.

HENRÍQUEZ, C.; AZÓCAR, G. y AGUAYO, M. 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*. Pontificia Universidad Católica de Chile. Chile. N° 36. 2006. p. 61-74.

ITAMI, R. Cellular worlds: models for dynamic conception of landscapes. *Landscape Architecture*. Vol. 78. N° 5. 1988. p. 52-57.

LAHTI, J. *Modelling urban growth using cellular automata: a case study of Sydney, Australia*. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. Holanda. 2008. 77 p. [En Línea]: http://www.itc.nl/library/papers_2008/msc/gem/lahti.pdf Acceso: 7 de Octubre de 2010.

LAN, D.; LINARES, S.; DI NUCCI, J. y LOPEZ PONS, M. La lógica de la organización espacial en la Ciudad de TANDIL. (ELIAS, D.; SPOSITO, M.; ENCARNAÇÃO, B.; SOARES, B. R. Org.). *Agentes econômicos e reestruturação urbana e regional: Tandil e Uberlândia*. São Paulo. 2010. p. 29-155.

PHIPPS, M. Dynamic behavior of cellular automata under the constraint of neighborhood coherence. *Geographical Analysis*. Vol. 21. N° 3. 1989. p. 197-215.

SAATY, T. L. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill. Nueva York. 1980. 287 p.

SUI, D. Z. y ZENG H. Modeling the dynamics of landscape structure in Asia's emerging desakota regions: a case of study in Shenzhen. *Landscape and Urban Planning*. Vol. 53. N° 1-4. 2001. p. 37-52.

TOBLER, W. "Cellular Geography", in: Gale, S. and Olsson, G. (eds.), *Philosophy in Geography*. 1979. 379-386.

VON NEUMANN, J. *Theory of self-reproducing automata*. (Burks, A.W. Ed.). University of Illinois Press, Urbana. 1966. p. 63-87. [En Línea]: <http://www.history-computer.com/Library/VonNeumann1.pdf> Acceso: 27 de Agosto de 2010.

WHITE, R. y ENGELEN, G. Cellular-Automata and Fractal Urban Form—a Cellular Modeling Approach to the Evolution of Urban Land-Use Patterns. *Environment and Planning A*. Vol. 25. N° 8. 1993. p. 1175–1199.

WHITE, R. Cities and Cellular Automata. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. Vol. 2. 1997. p. 111-125. [En Línea]: <http://downloads.hindawi.com/journals/ddns/1998/245791.pdf> Acceso: 2 de Octubre.

WHITE, R. y ENGELEN, G. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. *Environment and Planning B: Planning and Design*. Vol. 24. N° 2. 1997. p. 235-246.

WHITE, R.; ENGELEN, G. y ULJEE I. The use of constrained cellular automata for high resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B: Planning and Design*. Vol. 24. N° 3. 1997. p. 323-343.

WHITE, R. y ENGELEN, G. High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems. *Computers, Environment and*

Urban Systems. Vol. 24. N°5. 2000. p. 383-400. [En Línea]:
http://www.tau.ac.il/~benny/nordgis/White_High-resolution%20integrated%20modelling%20of%20the%20spatial%20dynamics%20of%20urban%20and%20regional%20systems.pdf Acceso: 20 de Agosto de 2010.

WOLFRAM, S. Theory and applications of cellular automata. *World Scientific Publishing Co.* Hong Kong. 1986. p. 333-342.

WU, F. Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural urban land conversions. *International Journal of Geographical Information Science*. Vol. 16. N° 8. 2002. p. 795-818.