

Simulación del crecimiento urbano de la ciudad de Tandil (Argentina) aplicando el modelo SLEUTH

Santiago Linares y Keith C. Clarke

Introducción

Las áreas urbanas son las regiones más dinámicas del planeta. Su tamaño ha aumentado constantemente durante el pasado y este proceso continuará en el futuro, especialmente en los países menos desarrollados (Martine, 2007). Monitorear el crecimiento urbano y, en consecuencia, anticipar el alcance de éste, siempre se reconoce como un tema de primera necesidad para cualquier organismo de gobierno responsable de la toma de decisiones sobre la planificación urbana. Debido al aumento de la población mundial y la salida progresiva de las economías nacionales de los sistemas meramente agrícolas, las ciudades han experimentado un rápido y, a menudo, descontrolado crecimiento. Por lo tanto, la urbanización es ahora una de las causas antropogénicas más importante de muchos problemas socioeconómicos y ambientales tales como las islas de calor, crisis energética, contaminación del aire, problemas de salud pública, pérdida de tierras cultivables, destrucción de hábitats y la disminución de la cubierta vegetal natural.

Un aporte de la comunidad científica para solucionar y prevenir los problemas asociados al crecimiento urbano sin restricciones fue el desarrollo y aplicación de modelos que permitan medir cuantitativamente las interrelaciones intra e interurbanas de los factores asociados al crecimiento y conocer así la génesis y los posibles efectos futuros de su evolución.

Los modelos de crecimiento urbano son un tipo particular de modelado numérico que incluye variables económicas, geográficas, sociológicas y estadísticas para explorar los mecanismos de evolución urbana e interrelación dentro del sistema urbano (Li y Gong, 2016). En ellos se ponen en relación diferentes elementos tales como usos del suelo, viviendas, población, empleo, localización de comercios, industrias y servicios, redes e infraestructuras, movilidad y circulación (Wegener, 1994). Lejos de ser considerada un área del conocimiento estática, los modelos de crecimiento urbano han evolucionado sustancialmente desde sus orígenes hasta la actualidad (Linares, 2016), las innovaciones introducidas durante su evolución podrían clasificarse en dos grandes dimensiones, una de ellas, podemos hallarla en la capacidad que han tenido para contemplar las interacciones locales y heterogeneidad a micro escala, tal como lo hacen los Modelos Basados en Agentes y los Modelos de Autómatas Celulares (Clarke, 2014), en contraposición a los clásicos Modelos de Transporte y Uso del Suelo (Wingo, 1961). La segunda innovación por destacar es la capacidad para simular procesos dinámicos no lineales en contraposición de las representaciones estáticas de antaño, recuperando los cambios que acontecen en cada unidad de tiempo durante el proceso de simulación. Estos dos aspectos confluyen en mejoras sustanciales para modelar las relaciones espaciales y temporales que ocurren en un proceso de urbanización.

En este trabajo hemos aplicado el modelo SLEUTH desarrollado por Keith C. Clarke, investigador del Departamento de Geografía de la Universidad de California en Santa Bárbara, Estados Unidos. Es un modelo basado en autómatas celulares de crecimiento urbano y cambios de uso del suelo que se ha aplicado en más de cien ciudades del mundo para simular

escenarios de crecimiento y expansión urbana. SLEUTH es un acrónimo de los nombres en inglés de las capas de entrada requeridas por el modelo, como son *Slope*, *Land use*, *Exclusion*, *Urban extension*, *Transportation* y *Hillshade*. En realidad, SLEUTH no es un solo modelo, más bien se trata de una combinación de dos sub-modelos de autómatas celulares: uno de crecimiento urbano (UGM) y otro de cambios de usos del suelo (Deltatron). Puede ser descargado gratuitamente tanto el código como documentos de ayuda para su comprensión e implementación desde el siguiente sitio web <http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/index.html>.

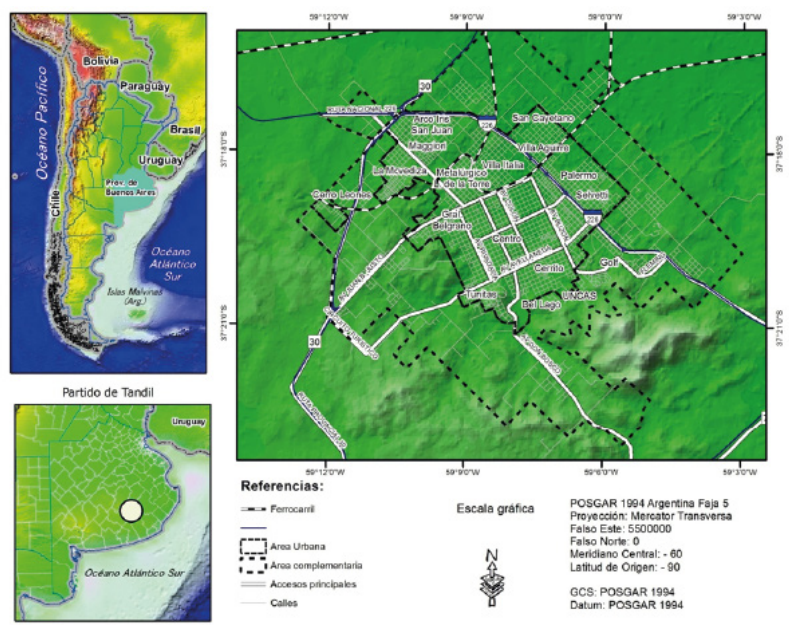
Metodología

Área de estudio

Las simulaciones se llevaron a cabo en la ciudad de Tandil, provincia de Buenos Aires, Argentina (Figura 1), utilizando como máscara de análisis los límites correspondientes al área urbana y complementaria definida por el Plan de Desarrollo Territorial del Municipio de Tandil (PDT). El área urbana es aquella destinada a asentamientos humanos intensivos, como el uso residencial, comercial e industrial. Por otro lado, el área complementaria adyacente al área urbana constituye la transición entre ésta y el área rural y representa una reserva para la expansión del área urbanizada. Entre ambos, alcanzan en la ciudad de Tandil un área de 10.195 hectáreas.

Tandil es considerada una ciudad intermedia en el sistema urbano argentino. Según el último censo, la ciudad tiene 116.916 habitantes que representan el 94% de la población del departamento (INDEC, 2010). Como centro regional, su economía se concentra básicamente en el sector de los servicios, en particular los educativos, culturales y agrícolas. Sin embargo, la ciudad tiene un historial de desarrollo industrial relacionado con la producción de autopartes y la producción primaria de roca para la construcción, una actividad que se cerró en 2012.

Figura 1. Área de estudio. Ciudad de Tandil



Fuente: elaboración personal

Geodatos

Una de las primeras preguntas previas a la utilización de cualquier modelo de crecimiento urbano es identificar las características específicas de la información requerida, qué tipo de datos se necesitan para simular un escenario futuro y, luego, en qué formato los datos deben almacenarse. A modo de síntesis, en la Tabla 1 se describen los principales aspectos para tener en cuenta cuando se pretende utilizar SLEUTH: cantidad de capas de entrada permitida y requerida, formatos de los archivos, tipo de información que representan y rangos de valores posibles.

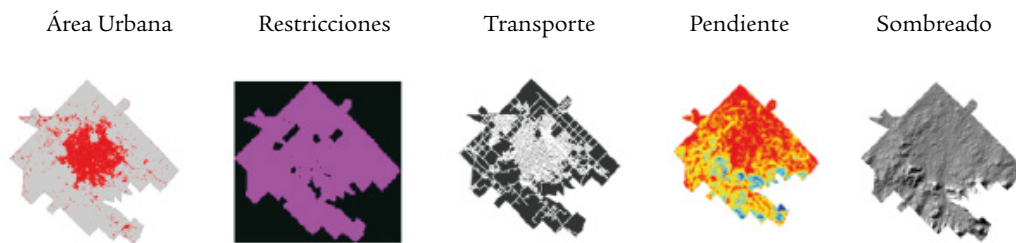
El modelado de los usos del suelo, y específicamente del crecimiento urbano, es un proceso complejo en el que interactúan una variedad de factores, los cuales se clasifican comúnmente en dos grandes grupos: factores geofísicos y factores socioeconómicos. También es recurrente la utilización de coberturas relacionadas con las regulaciones de uso del suelo que restringen o estimulan la urbanización. En función a ello SLEUTH emplea cinco o seis variables con información sobre la pendiente, uso del suelo (opcional), restricciones urbanas, mancha urbana, transporte y sombreado del relieve. En la Figura 2, se presentan las cinco variables obligatorias como datos de entrada para aplicar el modelo a la simulación del crecimiento urbano de la ciudad de Tandil.

Tabla 1. Datos de entrada al modelo SLEUTH

Características	Descripción
Cantidad de capas de entrada permitidas y requeridas	Seis variables posibles y cinco obligatorias [algunas requieren más de una escena durante el periodo]
Formato del archivo	GIF [8 bit escala de grises] Las capas deben contener la misma proyección, extensión y resolución
Tipo de información y rango de valores	1- Área Urbana: cuatro escenas para diferentes años [0 no edificado y de 1 a 256 edificado] 2- Transporte: cuatro escenas para diferentes años [0 no es vía de transporte y mayor a 0 es vía de transporte] 3- Restricción: una escena [> 100 son áreas con restricción y <100 áreas sin restricción, pero con diferentes elasticidades de cambios] 4- Uso del Suelo: dos escenas para diferentes años [codificación de categorías de 0 a 255] 5- Pendiente: una escena [% pendiente de 0 a 100] 6- Sombreado: Visualización del relieve de la imagen en base a un DEM [0 a 255, 0 = agua]

Fuente: elaboración personal

Figura 2. Capas de entrada. Ciudad de Tandil



Fuente: elaboración personal

Calibración

La calibración del modelo incluye una amplia gama de herramientas y técnicas con el objetivo de optimizar el rendimiento del modelo. En todos los casos, la calibración busca determinar el impacto de los cambios en una constante o variable particular en términos de los resultados del modelo. Las constantes son los valores que permanecerán estables en el modelo, y pueden ser definiciones del investigador sobre algunos parámetros (como la máxima pendiente sobre la que se puede construir) o elementos estructurales del modelo (como la definición del tamaño de vecindad de una ventana móvil de un autómata celular). La determinación de estas constantes constituye la primera etapa de calibración porque se define durante el diseño del modelo. Los métodos utilizados incluyen desde el análisis visual de la correspondencia de los resultados hasta una variedad de medidas estadísticas de exactitud.

El segundo tipo de calibración implica la aplicación repetida del modelo, la medición de la precisión del rendimiento del modelo, y el ajuste de las variables de entrada hasta que se maximice el rendimiento. Por lo general, un modelo se inicia en algún momento del pasado y se ejecuta sin más entradas hasta el último período de datos conocidos (el presente), haciendo coincidir periódicamente sus salidas numéricas y espacialmente distribuidas con datos reales.

Un tercer enfoque es automatizar el proceso de calibración. Se pueden compilar una o más medidas que representan el rendimiento de un conjunto de parámetros y repetir el proceso tantas veces hasta que se obtenga la configuración de mejor rendimiento. Los modelos usan cada vez más los algoritmos de aprendizaje automático (Inteligencia Artificial) para lograr esta maximización; en SLEUTH se emplea un algoritmo genético de este tipo que elimina por completo la interacción del usuario durante el proceso de calibración.

En este trabajo el intervalo tenido en cuenta para la calibración del modelo fue de 26 años (de 1985 a 2011), mientras que el período de simulación fue de 22 años, de 2011 a 2033.

Factores explicativos

SLEUTH utiliza factores explicativos clásicos dependiente de las condiciones iniciales del uso del suelo urbano como son la proximidad a las vías de transporte, el grado de pendiente, las restricciones a la urbanización y las elasticidades de transición entre diferentes usos del suelo; a la vez, emplea parámetros explicativos basados en la proximidad a otras áreas edificadas como, la propensión a la dispersión, la auto-reproducción de nuevos centros de expansión y la propagación y aglomeración. A partir de ese conjunto de factores, el potencial de cambio se calcula utilizando técnicas cuantitativas que determinan la probabilidad de que una ubicación cambie de un estado no edificado a otro edificado, ponderando los factores mediante mecanismos de iteración y retroalimentación (Algoritmos Genéticos). Una de las principales diferencias entre el clásico enfoque basado en la aptitud del suelo y este basado en la probabilidad es que en el primero no se considera explícitamente el cambio pasado y simplemente se necesita un mapa de uso del suelo para su ejecución (t_1), la aptitud expresa el uso más apropiado de una parcela de tierra según una decisión subjetiva basada en el conocimiento u opinión. Mientras que, en el segundo, que es el empleado en SLEUTH, los mapas de potencial de transición derivan explícitamente de la transición real en cambios pasados (de t_0 a t_1). Como resultado obtenemos el peso óptimo de los factores expresados en un rango que van del 0 al 100, el cual podemos recuperar y analizar en los archivos de salida generados durante el proceso de calibración (Figura 3).

Figura 3. Reporte del Algoritmo Genético en SLEUTH. Ciudad de Tandil

```

*****GENERATION 19 *****
Stored Gene: 9, 5, 28, 81, 76, 0.855028
Total fitness=18.417042Standard Dev : 0.283351
Generation: 19, Average: 0.329783
Sub Population: 0

CALIBRATION_DIFFUSION_START= 9
CALIBRATION_DIFFUSION_STEP= 1
CALIBRATION_DIFFUSION_STOP= 9

CALIBRATION_BREED_START= 28
CALIBRATION_BREED_STEP= 1
CALIBRATION_BREED_STOP= 28

CALIBRATION_SPREAD_START= 5
CALIBRATION_SPREAD_STEP= 1
CALIBRATION_SPREAD_STOP= 5

CALIBRATION_SLOPE_START= 81
CALIBRATION_SLOPE_STEP= 1
CALIBRATION_SLOPE_STOP= 81

CALIBRATION_ROAD_START= 76
CALIBRATION_ROAD_STEP= 1
CALIBRATION_ROAD_STOP= 76

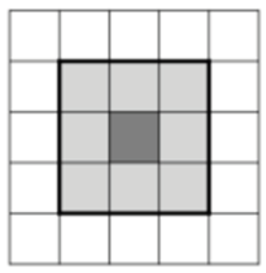
PREDICTION_DIFFUSION_BEST_FIT= 20
PREDICTION_BREED_BEST_FIT= 20
PREDICTION_SPREAD_BEST_FIT= 20
PREDICTION_SLOPE_BEST_FIT= 20
PREDICTION_ROAD_BEST_FIT= 20
    
```

Fuente: elaboración personal

Filtros y coeficientes espaciales

La idea de introducir filtros espaciales en los modelos de crecimiento urbano se debe a que un nuevo uso del suelo en una parcela no solo depende de sus características previas y propias, sino también de sus vecinos según algunas reglas de transición preestablecidas.

Figura 4. Vecindad de Moore en SLEUTH (3x3)



Fuente: elaboración personal

Estas reglas afectan el crecimiento urbano, indicando fortalezas o limitaciones ambientales y socioeconómicas. Esta estructura espacial es el principio de los modelos de Autómatas Celulares que representan a la superficie terrestre como un tablero de ajedrez donde cada celda es una ubicación y tiene un uso específico del suelo. Usando filtros espaciales, podemos precisar las interacciones locales entre una célula y su vecindario y la dimensión del vecindario expresacuan grande o pequeña es la interrelación de la célula central con su entorno. SLEUTH usa un filtro espacialde 3 por 3 o también conocida como vecindadde Moore (Figura 4).

Las reglas de crecimiento en SLEUTH se aplican secuencialmente durante cada año de crecimiento y se controlan a través de las interacciones de cinco coeficientes espaciales, donde se incluyen: (1) la pendiente, que es la resistencia de un área al desarrollo debido al terreno; (2) la difusión, que es la urbanización

aleatoria de un píxel; (3) reproducción, que es la probabilidad de que el crecimiento espontáneo genere nuevos centros urbanos; (4) propagación, que es el crecimiento de viejos o nuevos centros urbanos; y (5) influencia de las vías de transporte, que es la capacidad de las rutas y calles para atraer nuevo crecimiento (Clarke, Gaydos y Hoppen, 1997). Hay otras dos opciones espaciales que nos gustaría destacar, como son la opción de jerarquización de las vías de transporte y el grado de resistencia a la urbanización, estas opciones permiten discriminar diferencias entre categorías de vías de transporte, así como entre diferentes aptitudes para la urbanización, muy útil para obtener un mejor modelado de los procesos en la realidad.

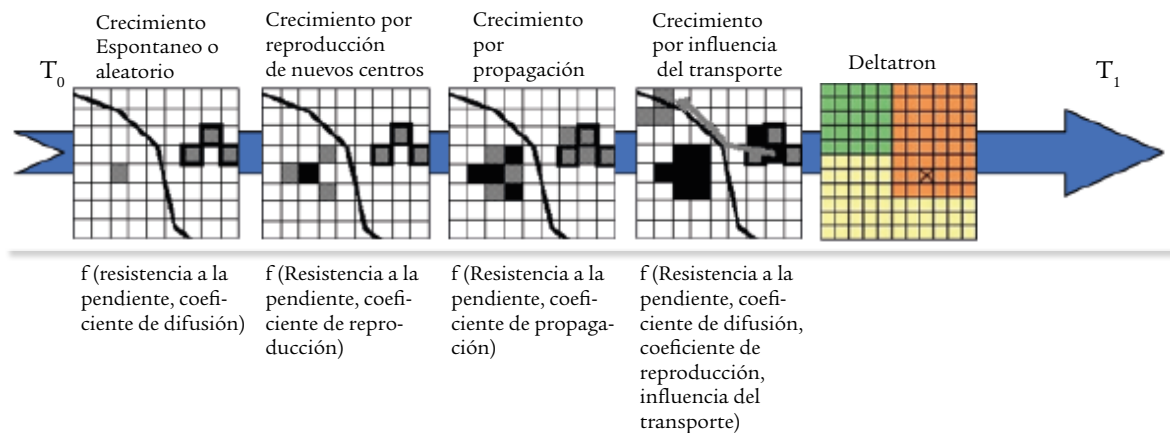
Validación y simulación

La validación es la comparación entre el mapa simulado y el observado (verdadero). Los dos componentes más importantes son el desacuerdo de cantidad (es decir, el cambio neto) y el desacuerdo de ubicación (es decir, el cambio de localización).

SLEUTH genera trece indicadores que se pueden utilizar para determinar la bondad del modelo posteriormente al proceso de calibración, dentro de los cuales se encuentran: *Product*, es la multiplicación de todas las medidas de evaluación que se presentan a continuación; *Compare*, pone en relación la cantidad de píxeles urbanos para el último año modelado con la del último año del mapa de referencia; *Pop*, es el valor resultante de aplicar una regresión por mínimos cuadrados entre la urbanización simulada y la real en los años donde se ingresaron escenas intermedias para el control de la calibración; *Edges*, es el r^2 entre el número de celdas sin píxeles vecinos urbanos con respecto a la cantidad real para los años de control; *Clusters*, es el r^2 entre los agrupamientos urbanos modelados con respecto a los agrupamientos reales para los años de control; *Cluster Size*, es el r^2 entre el tamaño promedio de los agrupamientos urbanos modelados con respecto al tamaño promedio de los agrupamientos urbanos reales para los años de control; *Lee-Salee*, es un índice de forma, una medida de correspondencia espacial entre la mancha urbana simulada por el modelo y la extensión urbana conocida para los años de control, se calcula dividiendo la intersección sobre la unión de ambas; *Slope*, es el r^2 entre la pendiente promedio de la urbanización modelada con respecto a la pendiente promedio de la urbanización de referencia para los años de control; *% Urban*, es el r^2 entre el porcentaje de píxeles urbanizados modelados con respecto al porcentaje para los años de control; *X-mean*, es el r^2 entre el valor medio de X para los píxeles modelados con respecto al valor medio de X para los años de control; *Y-mean*, es el r^2 entre el valor medio de Y para los píxeles modelados con respecto al valor medio de Y para los años de control; *Rad*, es el r^2 entre el valor de radio estándar de distribución de píxeles urbanos modelados con respecto al valor de radio estándar de distribución de píxeles urbanos para los años de control; y finalmente, *F-Match* es la proporción de usos del suelo correctamente asignado, se obtiene del cociente entre el uso del suelo modelado correctamente sobre la suma del uso modelado correcta e incorrectamente, este último indicador solo es utilizado cuando se emplea delta tron. Todos los indicadores poseen un rango de 0.0 a 1.0, siendo 1 el ajuste perfecto. La última innovación respecto al proceso de validación propone una medida sintética denominada OSM (*Optimal SLEUTH Metric*) (Dietzel y Clarke, 2007). Esta medida usa un subconjunto de siete de las Plan de Desarrollo Territorial del Municipio de Tandil métricas, también combinadas por multiplicación, seleccionadas para reducir las interdependencias entre las trece métricas.

SLEUTH realiza la simulación tomando los datos más recientes como entradas y se ejecuta hacia un futuro tan lejano como se establezca en la sección del rango de fechas de predicción en el archivo de predicción de escenarios. Para simular usa cuatro tipos de reglas de comportamiento de CA (Figura 5): crecimiento difuso o aleatorio, reproducción de nuevos centros de expansión, crecimiento orgánico o propagación y crecimiento influenciado por la distancia a vías de comunicación (Clarke y Gaydos 1998, Candau, 2002). Los resultados del modelo incluyen informes, estadísticas para evaluar y observar el comportamiento dinámico del crecimiento urbano pronosticado (población, dispersión, agrupamiento y tamaño del agrupamiento), mapas de probabilidad, animaciones y mapas del tipo de crecimiento. Si no hay datos de uso del suelo, el modelo simplemente simula el crecimiento urbano.

Figura 5. Reglas de transición en SLEUTH



Fuente: elaboración personal adaptado de Clarke (2018)

Resultados

Los resultados se presentan organizados en cuatro etapas, la primera presenta un conjunto de medidas de validación propias del modelo referidas al periodo de calibración, la segunda muestra una tabla y un gráfico donde se observa la cantidad neta de cambios que se esperan producto de ejecutar una simulación y los cambios de referencia en la realidad; la tercera presenta un conjunto de mapas individuales que permiten visualizar e interpretar el patrón espacial de crecimiento para los años 2011/2013/2018/2023/2028/2033 y en la cuarta y última parte se analizan mapas que aportan nueva información con respecto a la calidad y reglas predominantes durante la asignación de cambios.

Medidas de evaluación en el proceso de calibración (1985-2011)

En la Tabla 2 se observan valores altos de *Compare* 0.92, *Pop* 0.93, *% Urban* 0.93, *Edges* 0.96, *Clusters* 0.99, *X-Mean* 0.76, *Y-Mean* 0.97 y *Rad* 0.93, lo cual permite afirmar que en términos generales la predicción del modelo fue muy similar a lo que sucedió en la realidad con relación a la tasa de crecimiento urbano y patrón global. Mientras que, a una resolución espacial menor, los cambios simulados exhiben menos correspondencias, tal como lo expresan las medidas espaciales locales de *Cluster Size* 0.51 y *Lee-Salle* 0.53.

Tabla 2. Medidas de evaluación en SLEUTH. Ciudad de Tandil (1985-2011)

SLEUTH	Compare: 0.92
	Pop: 0.93
	Edges: 0.96
	Clusters: 0.99
	Cluster Size: 0.51
	Lee-Salle: 0.53
	Slope: 0.99
	% Urban: 0.93
	X-Mean: 0.76
	Y-Mean: 0.97
	Rad: 0.93
OSM: 0.62	

Fuente: elaboración personal

Evaluación de la cantidad neta de cambio (1985-2011)

En términos generales se observa un muy buen resultado al simular la tasa de cambio anual del uso no edificado al edificado durante el proceso de calibración con respecto a los cambios reales acontecidos, existiendo una diferencia no mayor al 1% (Tabla 3). Claramente, el hecho de que SLEUTH utilice cuatro escenas de las áreas edificadas para diferentes años al momento de calibrar el modelo, favorece la capacidad de predicción de los cambios de usos del suelo con respecto a aquellos modelos que no lo contemplan.

Tabla 3. Tasa de cambio neto simulada y real durante el periodo de calibración. Ciudad de Tandil (1985-2011)

Ciudad	Intervalo de validación (año de inicio-final)	Píxeles urbanos simulados (2011)	Píxeles urbanos de referencia (2011)	Diferencia de cambios (%)
Tandil	1985-2011	6587	6650	-0.95%

Fuente: elaboración personal

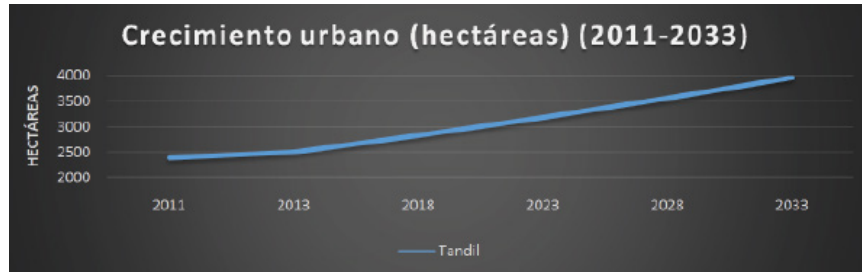
Análisis de la cantidad de pronósticos de crecimiento urbano (2011-2033)

La Figura 6 muestra los cambios esperados en la ciudad de Tandil desde 2011 a 2033 expresados en celdas, el crecimiento relativo sería del 66% durante el periodo considerado, lo que en términos digitales representaría para 2033 unos 11.018 píxeles y su equivalente en superficie edificada sería de 3.966 hectáreas.

Figura 6. Crecimiento del uso del suelo urbano (en celdas y hectáreas) según SLEUTH. Ciudad de Tandil (2011-2033)

Variación en valores absolutos (celdas)	
	2011 2013 2018 2023 2028 2033
Tandil	6650 6966 7882 8857 9887 11018

Variación en valores absolutos (hectáreas)	
	2011 2013 2018 2023 2028 2033
Tandil	2394 2508 2838 3189 3559 3966

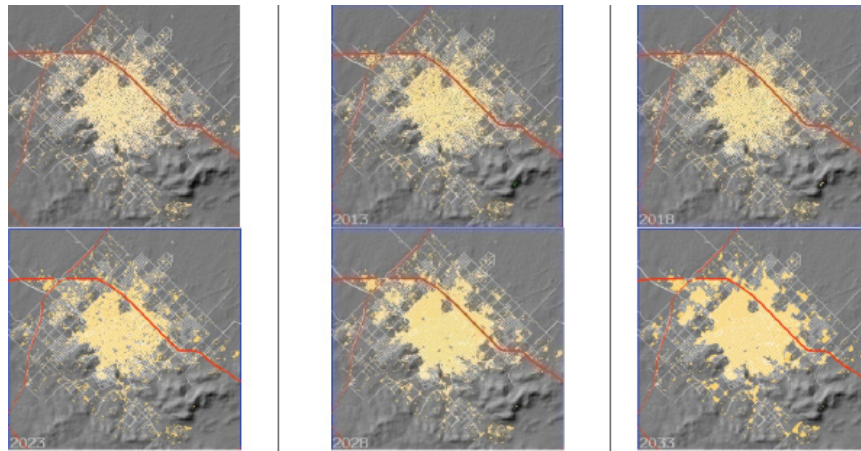


Fuente: elaboración personal

Análisis del patrón de crecimiento urbano (2011-2033)

La Figura 7 muestra la distribución y evolución espacial del crecimiento urbano de Tandil según SLEUTH. Sobre el escenario obtenido podemos decir que exhibe un patrón complejo y cercano a los procesos acontecidos en la realidad; muestra proceso de compactación del área central, pero sobre todas las cosas, un fuerte crecimiento de nuevas áreas de expansión no consolidadas en la periferia de la ciudad. Si complementamos esta información con aquella provista por la ponderación de los coeficientes de la Figura 3, diríamos que predomina una expansión urbana periférica fuertemente determinada por la topografía (*slope*) y en segundo lugar por la configuración de la red vial (*roadgravity*), donde procesos de crecimiento en áreas nuevas o de baja densidad predominan sobre procesos tradicionales de propagación y compactación.

Figura 7. Crecimiento urbano simulado utilizando SLEUTH para los años 2011, 2013, 2018, 2023, 2028 y 2033. Ciudad de Tandil

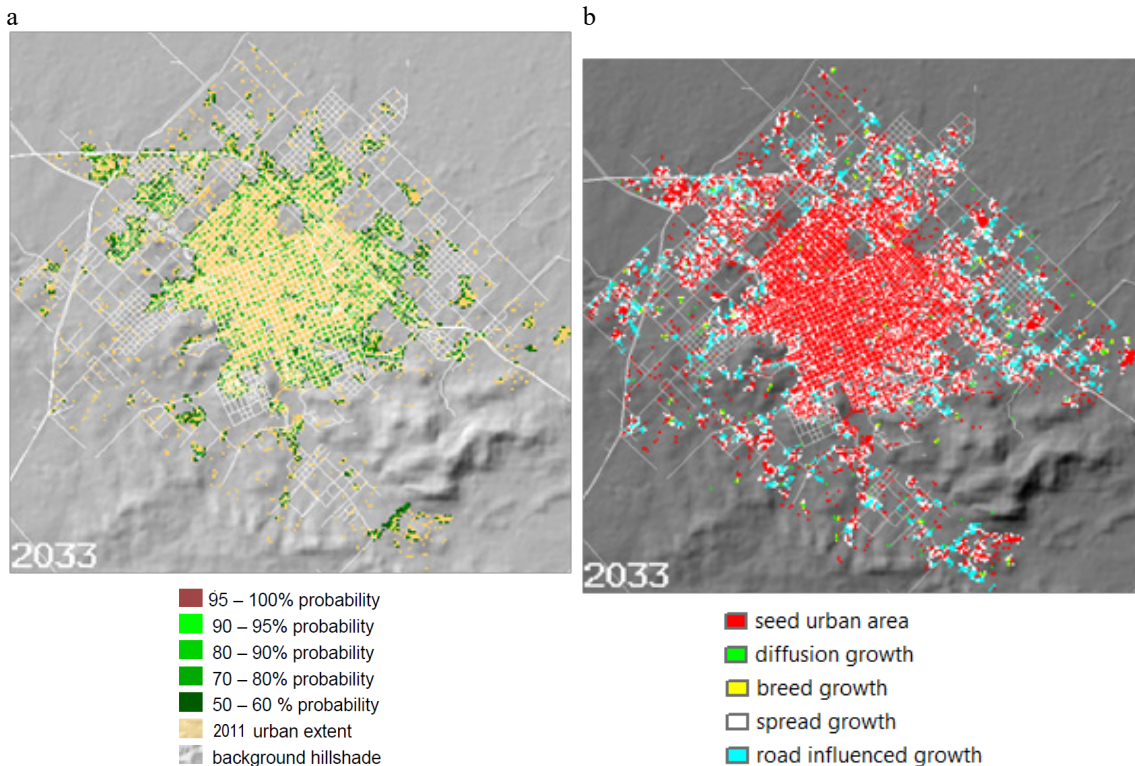


Fuente: elaboración personal

Análisis de la asignación de cambio (2011-2033)

A los fines de analizar la asignación de los nuevos píxeles urbanos, SLEUTH genera dos tipos de mapas, uno que indica el nivel de confianza de las celdas transformadas en términos de probabilidad (Figura 8a), el cual indica en amarillo aquellas celdas edificadas previamente existentes en 2011 (t_0); en verde oscuro los nuevos píxeles urbanos con probabilidades de 50 a 79; en verde claro los nuevos píxeles urbanos con probabilidades de 80 a 90 y en rojo oscuro aquellos con niveles de confianza de 90 a 100. Complementariamente, SLEUTH genera otro mapa de salida que nos permite interpretar el tipo de crecimiento o regla predominante durante el periodo simulado (Figura 8b), gracias a este mapa, es posible aprender sobre los factores y procesos que dinamizan la expansión urbana en un área determinada de la ciudad, en color rojo se observa el área urbana de origen, en color verde el crecimiento difuso o espontáneo, en color amarillo la reproducción de nuevos centros de expansión, en color blanco el crecimiento orgánico o por propagación y en color celeste el crecimiento influenciado por la distancia a la red vial.

Figura 8. Análisis y evaluación de los mapas de asignación en SLEUTH. Ciudad de Tandil (2011-2033)



Fuente: elaboración personal

Conclusión

Esta primera aplicación de SLEUTH al contexto urbano argentino comprueba la idoneidad de este modelo para simular el crecimiento urbano fuera del ámbito regional de creación. La fortaleza de esta herramienta proviene de la habilidad para calibrar y luego modelar escenarios futuros, evaluar los coeficientes a modo de factores explicativos de la

expansión urbana, contrastar los resultados con una extensa variedad de medidas de validación y analizar los resultados cartográficos y alfanuméricos para estimar el patrón resultante del crecimiento urbano. La simulación digital permite entre otras cosas, obtener un conocimiento medible acerca de la influencia del entorno para explicar los cambios de usos del suelo, los principales factores de restricción o estimulación a la urbanización y la magnitud de cambios esperados en un futuro cercano.

Esperamos continuar las aplicaciones de SLEUTH en áreas urbanas de Argentina, no solo realizando escenarios predictivos, sino también exploratorios y normativos donde podamos visualizar el efecto de un crecimiento acelerado, o de un desarrollo urbano lento o un crecimiento deseable de acuerdo a lo estipulado en la planificación de usos del suelo.

Agradecimientos

Esta aplicación forma parte de una serie de actividades de investigación desarrolladas en el marco de un proyecto financiado por una Beca Externa Postdoctoral cofinanciada entre la Comisión Fulbright y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) durante el período noviembre 2017 - febrero 2018, bajo la dirección del Dr. Keith CLARKE en el Department of Geography, University of California, Estados Unidos.

Referencias

- Candau, J. (2002). *Temporal calibration sensitivity of the SLEUTH urban growth model*. (Master's thesis). Department of Geography, University of California, Santa Barbara, CA. 129 p.
- Clarke, K.C. (2014). Cellular Automata and Agent-Based Models. En M. Fischer y P. Nijkamp (Eds.) *Handbooks of Regional Science* (pp. 1217-1233). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Clarke, K.C. (2018). A Short Presentation of SLEUTH. En M.T.C. Olmedo, M. Paegelow, J-P Mas, J-P y F. Escobar (Eds.) *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer, pp. 521-525.
- Clarke, K.C.; Gaydos, L.J. y Hoppen, S. (1997). A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B*, 24, 247-261.
- Clarke, K.C. y Gaydos, L.J. (1998). Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(7), 699-714.
- Dietzel, C. y Clarke, K.C. (2007). Toward Optimal Calibration of the SLEUTH Land Use Change Model. *Transactions in GIS*, 11(1), 29-45.
- Li, X. y Gong, P. (2016). Urban growth models: progress and perspective. *Science Bulletin, Science China Press*, 61(21), 1637-1650.
- Linares, S. (2016). Evolución histórica sobre la modelización del espacio urbano en Geografía. *Sociedade e Território*, 28(2), 23-41.
- Martine, G. (Dir.) (2007). *Estado de la población mundial 2007. Liberar el potencial del crecimiento*

- urbano*. Fondo de Población de las Naciones Unidas. ONU.
- Plan de Desarrollo Territorial del Municipio de Tandil <https://www.mininterior.gov.ar/planificacion/pdf/planes-loc/BUENOSAIRE/Plan-Desarrollo-Territorial-Tandil.pdf>
- Wegener, M. (1994). Operational urban models state of the art. *Journal of the American Planning Association*, 60, 17-29.
- Wingo, L. (1961). *Transportation and urban land*. Baltimore, MD: John Hopkins University Press.