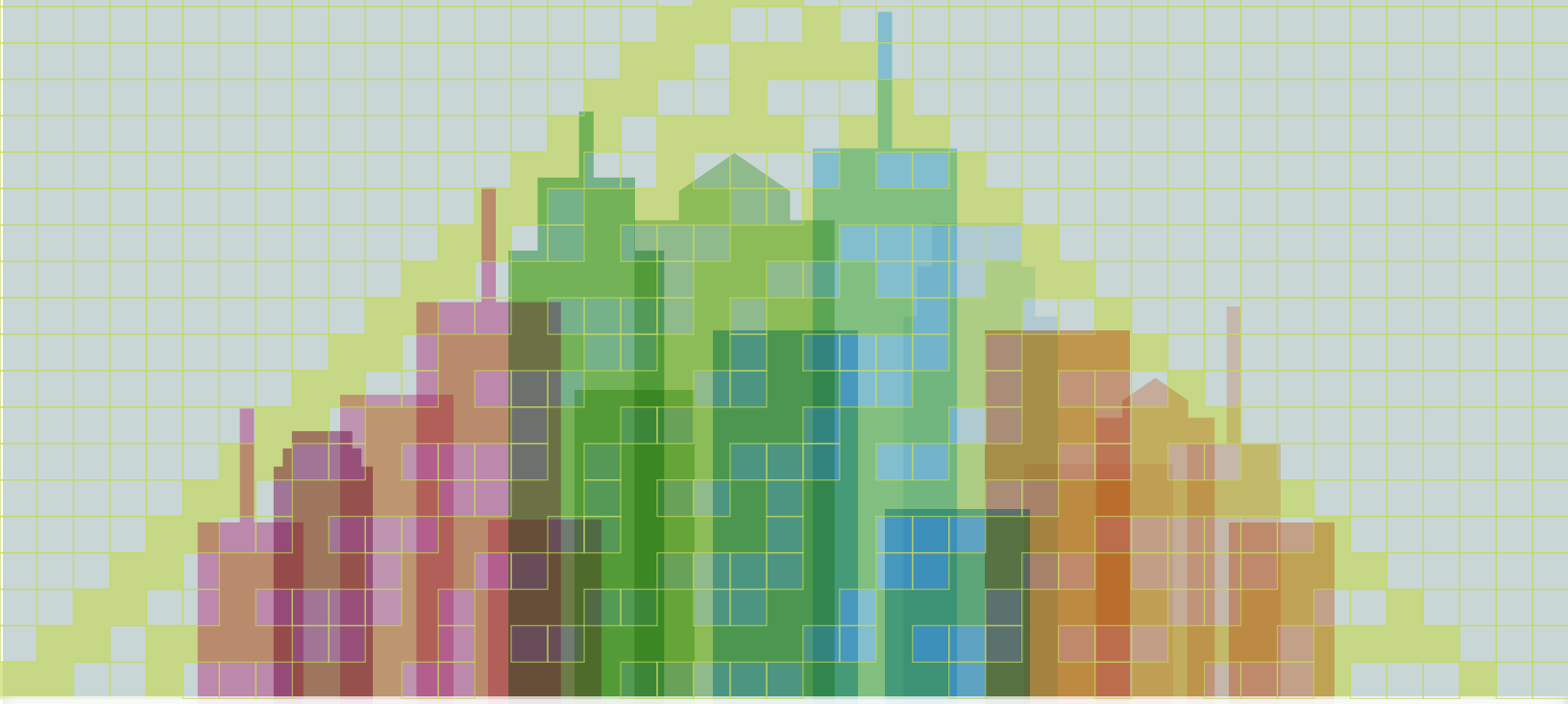
Recibido: 27.03.2023 • **Aceptado:** 06.12.2024

Palabras clave: Autómata Celular, Modelos Matemáticos, Ciudad.



Autómatas celulares: herramienta matemática aplicada al crecimiento de ciudades

EDUARDO JIMÉNEZ LÓPEZ
ejimenezl@uaemex.mx
CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE ESTUDIOS AVANZADOS DE LA POBLACIÓN (CIEAP) DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO (UAEMex)
ERIC CAMPOS CANTÓN
Eric.campos@ipicyt.edu.mx
INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNÓLOGICA, A.C.

El crecimiento urbano ha ganado relevancia en los últimos años debido al aumento de la población y la reducción de áreas verdes. Las ciudades experimentan crecimiento en sus periferias, donde escasean los servicios básicos, esto impulsa la investigación sobre su desarrollo sostenible mediante modelos matemáticos predictivos. Los autómatas celulares son una técnica útil en la toma de decisiones sobre el crecimiento urbano, fundamentales para el desarrollo económico y social de la población. Son sistemas que interactúan en el tiempo y el espacio, capaces de simular comportamientos complejos a partir de dinámicas simples. Su aplicación en la planificación urbana permite comprender el comportamiento territorial y las necesidades de nuevos asentamientos.

El crecimiento urbano ha cobrado relevancia en las últimas décadas debido al aumento poblacional y a la reducción de zonas verdes, que son los pulmones de las ciudades. Por otro lado, en estas, se generan anillos periféricos debido a la presencia de habitantes que carecen de servicios básicos y oportunidades de desarrollo. Esto motiva el interés por estudiar las ciudades en el campo del desarrollo sostenible, buscando desarrollar modelos predictivos que indiquen hacia dónde podría extenderse (Figura 1) (Jiménez López *et al*., 2018).

Quizás la ciudad sea el descubrimiento más significativo en la historia de la humanidad. El mundo del siglo XXI es un universo de urbes, clasificadas según su importancia jerárquica, donde se decide el porvenir de las naciones y sus áreas geográficas. Las ciudades son un recurso estratégico para las comunidades, ya que funcionan como impulsores esenciales del desarrollo económico y el progreso humano. Para desempeñar de manera efectiva su papel, deben planificarse meticulosamente, asegurando su sostenibilidad y respaldándolas con un campo de investigación sólido.

Figura 1.
Crecimiento de la Ciudad de San Luis Potosí.

Las ciudades son el resultado del acuerdo social; su planificación debe fundamentarse en procesos de consulta y diseño colectivos. No obstante, es improbable que los ciudadanos puedan contribuir de manera activa e informada al diseño de la metrópoli sin acceso a avances científicos y tecnologías digitales avanzadas. En México y en numerosos países, la planificación de las ciudades se encuentra rezagada en este aspecto. Es imprescindible desarrollar nuevas técnicas y mejores herramientas para respaldar la toma de decisiones en el crecimiento de las ciudades, particularmente a escala local. En un mundo que depende de sus ciudades, resulta cada vez más necesario contar con modelos urbanos interactivos y prácticos, respaldados por conocimientos especializados, herramientas modernas y tecnologías de frontera, que faciliten procesos colectivos de consulta y asesoramiento.

En el desarrollo sostenible, la planificación urbana requiere la combinación de diversas acciones, mediante un enfoque transdisciplinario de sistemas en múltiples niveles de escala, diagnósticos amplios e instrumentos de gestión gubernamental. El término "sostenible" no implica detener el crecimiento, sino planificar formas de lograrlo en armonía con el medio ambiente y con un compromiso social que fomente un desarrollo urbano basado en la justicia y la equidad, garantizando un desarrollo integral y genuino para sus habitantes.

Definiendo el término "autómatas celulares"

Los autómatas celulares (AC) son una herramienta útil para el estudio y modelado matemático del crecimiento urbano. Los AC son sistemas dinámicos discretos, cuyos elementos interactúan constantemente entre sí, tanto en el espacio como en el tiempo. Además, poseen la capacidad de representar comportamientos complejos a partir de dinámicas sencillas; por ello, es posible utilizar los AC para simular el comportamiento global de las ciudades con base en fenómenos locales. Los comportamientos motivados por fenómenos locales pueden describirse mediante mapas de bits o mapas ráster que representan cada píxel o unidad de estudio. De este modo, es posible modelar diversos fenómenos físicos y sociales que ocurren a nivel local. El comportamiento local debe ajustarse al comportamiento global, representado por las tasas de crecimiento identificadas en pasos de tiempo determinados (Garrocho *et al*., 2021). Un AC evoluciona en una cuadrícula donde cada cuadro es una celda del sistema. Para su evolución, considera tanto a sus vecinos de la izquierda y derecha como a los de arriba y abajo (ver Figura 2).

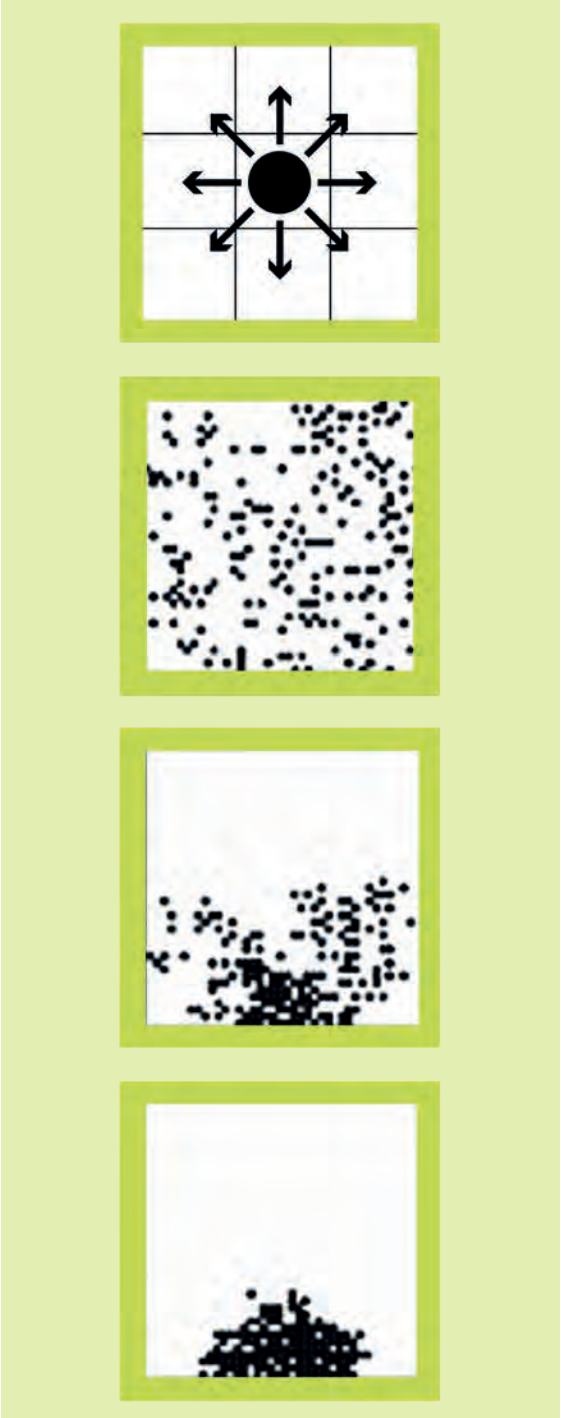


Figura 2.
Evolución de un AC en una cuadricula.

La aplicación de modelos de AC para la proyección de futuros escenarios en el crecimiento de ciudades se destaca como una magnífica herramienta de apoyo en la toma de decisiones espaciales dentro del contexto de la planificación urbana. La metodología de los AC es particularmente relevante en la fase de diagnóstico territorial, ya que permite extraer nuevos conocimientos que facilitan el avance en la formulación de propuestas destinadas a promover la planificación urbana a nivel local.

Disponer de esta información es especialmente relevante para que los responsables de tomar decisiones puedan examinar el espacio donde se ubicará el crecimiento, obteniendo una estimación de las necesidades de estos nuevos asentamientos poblacionales. De este modo, es posible promover modificaciones destinadas a impulsar la expansión urbana en zonas con características propicias para el desarrollo de dicho uso del suelo, con la finalidad de mejorar la calidad de vida de los habitantes.

La integración de los AC con los Sistemas de Información geográfica (SIG) permite realizar análisis espaciales complejos. Mediante la automatización del modelo, se determinan modificaciones en los usos del suelo, donde se analizan y vinculan factores que impulsan o restringen el cambio.

El desarrollo científico y tecnológico a partir de los autómatas celulares

En 1940, John von Neumann desarrolló la primera etapa de los autómatas celulares, basándose en las ideas de Stanislaw Ulam. Ambos investigadores exploraron la posibilidad de construir máquinas capaces de producir copias exactas de sí mismas. Posterior a la primera etapa de los AC, en 1970 John Conway creó un juego conocido como "El juego de la vida" (*Life*), utilizando AC que evolucionan en una cuadrícula (*lattice bidimensional*). El juego fue presentado por Martin Gardner en su columna *Mathematical Games* de la revista *Scientific American*. *Life* no es, estrictamente hablando, un juego, pues en él nadie decide nada ni tampoco interviene el azar. *Life* es un mundo artificial que evoluciona de acuerdo con reglas preestablecidas, considerando las ocho celdas vecinas de cada celda. Estas incluyen las cuatro celdas consideradas por Neumann y las cuatro diagonales. El proceso inicia determinando algunas casillas iniciales que contienen células con o sin "vida", para observar la evolución del lattice bidimensional.

La construcción original de von Neumann de un arreglo celular autorreproductivo requería que cada célula de un espacio celular, representado por una cuadrícula bidimensional, soportara un conjunto de 29 estados. El arreglo en sí mismo requería aproximadamente 200,000 células. Además, el estado de cada célula del arreglo, localizada en una posición (i,j), donde i es la columna y j es el renglón, en un tiempo t, está determinado por los valores de los estados de las células ubicadas en las posiciones iniciales y por el estado de la célula central en esa posición (Aguilera, 2006). Cada célula del arreglo, en algún momento, será la célula central, que, junto con las células ubicadas arriba, abajo, a la derecha y a la izquierda conforman una vecindad de von Neumann. Las interacciones locales de las vecindades, a lo largo del tiempo, determinan el estado global del arreglo, que se actualiza de manera sincrónica en cada instante (ver Figura 3).

En 1979, Waldo R. Tobler fue el primero en proponer los autómatas celulares para el modelado de procesos geográficos. Poco tiempo después, Helen Couclelis utilizó las ideas desarrolladas para explorar la naturaleza dinámica del espacio urbano y su influencia en la formación de patrones espaciales en las ciudades (Couclelis, 1997). Esto sentó las bases teóricas para la implementación de los autómatas celulares urbanos. En la década de los 80, Stephen Wolfram demostró que los autómatas celulares son capaces de reproducir dinámicas complejas a escala global o a partir de interacciones locales. Estos hallazgos se integraron para desarrollar una idea general sobre la utilidad de los autómatas celulares en los sistemas de información geográfica (SIG's) (Ver Figura 4).

Figura 3.
Juego de la vida.

EDUARDO JIMÉNEZ LÓPEZ

Doctor en Ciencias Aplicadas en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Es profesor-investigador en el Centro de Investigación y Estudios Avanzados de la Población (CIEAP) de la UAEMex y es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), nivel I.

Los autómatas celulares y su relación con la ciudad

Las fortalezas y debilidades de los modelos de autómatas celulares urbanos se encuentran entre el realismo y la conservación de las propiedades del sistema. Estos modelos poseen una gran flexibilidad para adaptarse a nuevas configuraciones, lo que facilita la formulación de reglas de transición con un poder explicativo mayor y ajustado a la realidad. La principal debilidad radica en la disponibilidad de imágenes, ya que la gran mayoría de los datos de análisis provienen de imágenes satelitales del área urbana en estudio. Además, la oferta de software adecuado para realizar la simulación de este modelo es limitada, aunque los resultados obtenidos suelen ser precisos. Por lo tanto, una oportunidad de mejora consiste en desarrollar métodos más eficaces de calibración y validación para producir modelos más fiables y accesibles para el usuario final. En conclusión, la literatura ofrece diversas sugerencias, algunas de ellas muy sofisticadas, sobre cómo construir modelos de autómatas celulares. Las aportaciones son muy valiosas porque plantean nuevas preguntas de investigación; Sin embargo, con frecuencia generan efectos colaterales, como la complejidad y el encarecimiento de la aplicabilidad de los modelos en el mundo real. Es fundamental garantizar que los modelos de simulación sean verdaderamente útiles en la investigación, la docencia y, en general, en el mundo real, evitando estructuras metodológicas enmarañadas, pesadas y costosas que terminan siendo poco efectivas para mejorar nuestras ciudades.

El uso de modelos matemáticos y su implementación informática resulta especialmente beneficioso para anticipar el desarrollo de la ciudad. La modelación permite generar escenarios virtuales que facilitan la comprobación de hipótesis sobre la dinámica de sistemas de interés social. En ciertas situaciones, también pueden poseer validez numérica, lo que posibilita su uso como instrumentos de predicción. El software necesario para su implementación es cada vez más accesible, lo que lo convierte en un lenguaje común para expertos de diferentes campos interesados en un problema compartido. UP

Referencias bibliográficas:

Aguilera, F. (2006). Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares. Madrid, España: *Geofocus*.

Couclelis, H. (1997), From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation. New York. Environment and planning B: *Planning and design*.

Garrocho, C. Jiménez López, E. Chávez Soto, T. (2021). Autómata Celular Metro-NASZ: laboratorio experimental de expansión urbana, CDMX: *La situación demográfica de México*.

Jiménez López, E. Garrocho, C. Chávez Soto, T. (2018). Modelando la expansión urbana con Autómatas Celulares: Aplicación de la Estación de Inteligencia Territorial (CHRISTALLER). *Lujan, Argentina: Geografía y Sistemas de Información Geográfica*.

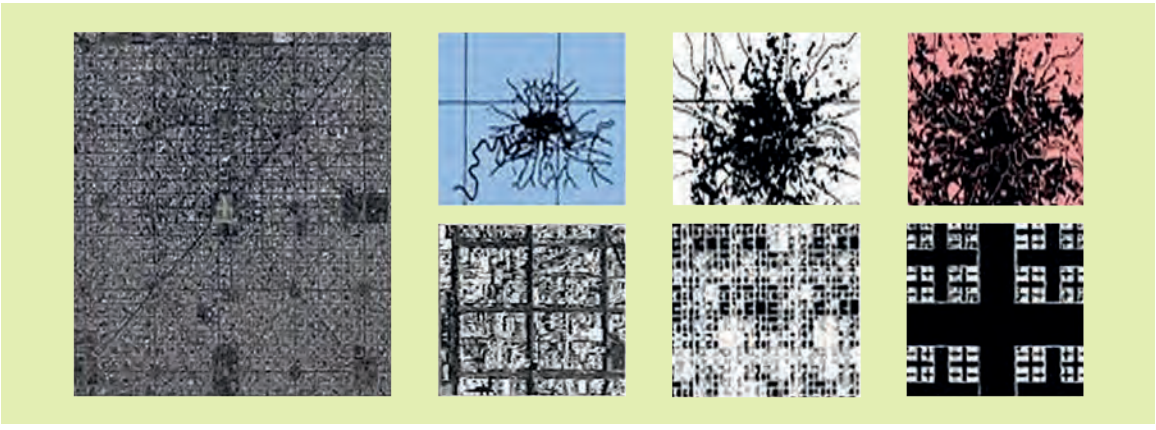


Figura 4.
Autómatas celulares urbanos.