

# Expansión de la ciudad: un instrumento de simulación de escenarios para los sectores público y privado

Carlos Garrocho, Eduardo Jiménez y Tania Chávez-Soto<sup>1</sup>

## Resumen

Demostramos la utilidad de los modelos de expansión urbana basados en Autómatas Celulares, para apoyar la toma de decisiones públicas y privadas relacionadas con el crecimiento de la ciudad. Probamos nuestros argumentos con una zona urbana compleja: el Área Metropolitana de Toluca, la quinta más poblada de México. Con información oficial simulamos dos escenarios de cómo el crecimiento de la ciudad podría afectar su seguridad hídrica: uno tendencial en velocidad de expansión y de no protección a los recursos hídricos; otro que supone la misma velocidad de expansión de la ciudad, pero eficaz en la salvaguarda de los recursos hídricos. Nuestro modelo incluye un componente aleatorio que considera el crecimiento urbano irregular. Realizamos un análisis microespacial, para ilustrar el detalle que logra nuestro modelo. Confirmamos que contar con un modelo de expansión urbana, sitúa a los tomadores de decisiones públicas adelante del proceso de crecimiento de la ciudad: en la cabina de mando, en lugar de ir atrás tratando de corregir fallas complicadas y costosas de resolver. A los desarrolladores inmobiliarios les facilita identificar grandes oportunidades empresariales, en un marco de responsabilidad social. Nuestro modelo opera en CHRISTALLER®: Estación de Inteligencia Territorial. CHRISTALLER® no requiere entrenamiento en matemáticas avanzadas.

**Términos clave:** Modelos de expansión urbana, planeación urbana, autómatas celulares, seguridad hídrica.

## Introducción

Las ciudades deben ser motores del desarrollo sostenible: competitivas, justas, cuidadosas del medioambiente (Glaeser, 2011). Esto no ocurre en México. Sus áreas urbanas han crecido de manera insostenible, su escala aumentará notablemente durante las próximas décadas, los riesgos y desafíos serán considerables (Garrocho, 2013; Sobrino *et al.*, 2015).

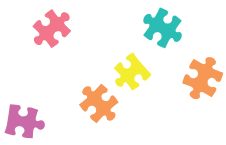
Un tema central de las ciudades de México en materia de medioambiente es la seguridad hídrica: factor definitorio de su futuro (Vilchis-Mata *et al.*, 2018). En este trabajo entendemos la seguridad hídrica urbana como el cumplimiento dentro de la ciudad de todos los servicios del sistema de agua, en un marco de bienestar, equidad social y cuidado medioambiental, con una salvaguarda razonable a riesgos e incertidumbres (Hoekstra *et al.*, 2018).<sup>2</sup>

La presión sobre los recursos hídricos aumenta como resultado de diversas actividades humanas: urbanización, crecimiento demográfico, incrementos en el consumo, competencia por el agua, contaminación, cambio climático (ONU, 2008; Stewart *et al.*, 2020). En las ciudades mexicanas los recursos hídricos están en riesgo, por la falta de previsión y planeación de la expansión urbana (Vilchis-Mata *et al.*, 2018).<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Profesores investigadores de El Colegio Mexiquense, A.C. Ex-Hacienda Santa Cruz de los Patos, Zinacantepec, Estado de México, México. (cgarrocho@gmail.com; ejimenez@cmq.edu.mx; tchavez@cmq.edu.mx)

<sup>2</sup> La seguridad hídrica es una prioridad estratégica de gobiernos y organismos internacionales. La paradoja: no existe una definición ampliamente aceptada de seguridad hídrica y menos en la escala urbana. En una reciente revisión se identificaron 25 definiciones de seguridad hídrica y solo tres referidas a la ciudad (Aboelnga *et al.*, 2019). Para nuestro trabajo basta con adaptar a la escala urbana la definición de Hoekstra *et al.*, 2018.

<sup>3</sup> Advertencia: fuentes estratégicas de agua pueden localizarse muy lejos de la ciudad, no solo en su hinterland o región circundante (Hoekstra *et al.*, 2018).



La expansión urbana sostenible requiere, entre otras cosas, instrumentos sistemáticos que anticipen escenarios y permitan evaluar la toma de decisiones sobre el crecimiento de la ciudad antes de que ocurran (*i. e.* evaluación *ex-ante*) (Clarke, 2018). Estos instrumentos (*e. g.* modelos de expansión urbana) no sustituyen el conocimiento y la intuición de planificadores, desarrolladores inmobiliarios, académicos, ciudadanos: lo complementan y facilitan procesos colectivos de consulta y codiseño de la ciudad (Wagner y De Vries, 2019; Unsworth *et al.*, 2014). A esta combinación de inteligencias humana y artificial, apoyada en tecnología (*e. g.* SIG, hardware, software, bases de datos) le llamamos Modelos Urbanos Centauro.<sup>4</sup>

El objetivo de este trabajo es ilustrar la utilidad de contar con modelos automatizados de expansión urbana, para apoyar la oportuna toma de decisiones sobre el crecimiento de la ciudad, tanto en el sector público como en el privado.<sup>5</sup> Usamos como zona de estudio el Área Metropolitana de Toluca (AMT) y como objetos de estudio su expansión física y sus recursos hídricos (además de otros componentes medioambientales asociados).<sup>6</sup> Nos concentramos en aguas superficiales y subterráneas (lechos y subsuelos de los ríos, lagos, lagunas, humedales, embalses superficiales, acuíferos), ríos entubados, zonas de recarga y bosques.

El modelo de expansión del AMT lo construimos en CHRISTALLER®: Estación de Inteligencia Territorial

(Chávez-Soto y Garrocho, 2018).<sup>7</sup> Las rutinas automatizadas de CHRISTALLER® facilitan de manera notable el trabajo de modelado y evaluación *ex-ante* de políticas urbanas públicas y privadas. Nuestro horizonte temporal es 2031.

La estrategia que seguimos contrasta dos escenarios. El primero supone que la expansión de la ciudad sigue la tendencia del pasado en velocidad y valores ecológicos. Asume una política urbana no comprometida con la protección de los recursos hídricos y otros componentes medioambientales (*i. e.* débil control de usos del suelo): perjudicial para la ciudad y para los empresarios inmobiliarios. El segundo escenario, considera la misma velocidad de expansión de la ciudad que en el pasado, pero en el marco de nuevos valores ecológicos, que se traducen en decisiones urbanas y empresariales de protección a los recursos hídricos. La construcción de escenarios es una herramienta avanzada para evaluar los posibles impactos de la expansión de la ciudad sobre ecosistemas y áreas protegidas (Lu *et al.*, 2015).

Para contrastar los dos escenarios, calibramos un modelo basado en Autómatas Celulares (AC) que replica el patrón de poblamiento del AMT para el periodo 2003-2017. Se trata de un modelo con áreas restringidas (*e. g.* calles, avenidas, parques, espacios públicos, instalaciones estratégicas, entre muchas otras) que es mucho más realista que uno sin restricciones. Incluimos un componente aleatorio para considerar el crecimiento irregular, tan común en las ciudades de México, y un filtro en cascada para evaluar la bondad de ajuste del modelo (ver detalles en Jiménez *et al.*, 2020).

Este modelo de Autómatas Celulares en Cascada (ACC) permitió simular los dos escenarios para 2031 y contrastarlos. Advertencia: el objetivo de los modelos es generar escenarios posibles, no ofrecer predicciones numéricas concretas o vaticinios infalibles.

Aparte de esta introducción, el trabajo se divide en cuatro secciones. En la primera se hace una explicación amigable de qué son los AC y cómo operan para simular la expansión de las ciudades (Jiménez *et al.*, 2020). Optamos por una explicación discursiva y evitamos las expresiones matemáticas, porque

<sup>4</sup> En 1997 la computadora *Deep Blue* venció al gran maestro de ajedrez Kasparov con una jugada magistral. Eso detonó un movimiento de ajedrecistas denominado Centauros: combinaban hardware, software y humanware: <https://medium.com/espanol/centauro-el-h%C3%ADbrido-entre-humano-y-m%C3%A1quina-af565846c920>.

<sup>5</sup> Redujimos al mínimo las expresiones matemáticas. Los interesados en sus formulaciones pueden revisar Olmedo *et al.*, 2018 y Jiménez *et al.*, 2020.

<sup>6</sup> Los recursos hídricos son “recursos disponibles o potencialmente disponibles, en cantidad y calidad suficientes, en un lugar y en un período de tiempo dados, apropiados para satisfacer una demanda identificable” (UNESCO, 2012, p. 378). En la literatura se analizan desde diversas perspectivas. Aquí se privilegian las visiones geográfica (disponibilidad espacial), ecológica (preservación de ecosistemas frágiles vinculados al agua) y de política pública (normando su uso para el bien común), en un marco de gestión integrada de los recursos hídricos, definida como: “desarrollo y explotación de recursos hidráulicos a escala regional que considera los aspectos técnicos e hidrológicos, así como los condicionantes socioeconómicos, políticos y medio ambientales” (op. cit. pp. 187-188).

<sup>7</sup> [www.christaller.org.mx](http://www.christaller.org.mx) tenía más de 162 mil visitas en septiembre de 2020.

este texto está dirigido, principalmente, a tomadores de decisiones de los sectores público y privado, no necesariamente entrenados en análisis numérico.<sup>8</sup> Los interesados en las formulaciones matemáticas pueden encontrarlas en diversas publicaciones: recomendamos Olmedo *et al.*, 2018. En la sección dos presentamos la zona de estudio y las fuentes de información, definimos operativamente los escenarios que queremos simular (uno tendencial, el otro respetuoso de los recursos hídricos) y hacemos referencia al *software* utilizado, que es de acceso libre y funciona en los Sistemas de Información Geográfica ARcGis y Qgis (CHRISTALLER®: Chávez-Soto y Garrocho, 2018). La sección tres se enfoca directamente al objetivo del trabajo. Se calibra el modelo ACC y se simulan los dos escenarios mencionados de expansión del AMT para 2031. Se realiza un análisis de contraste entre los dos escenarios y se destacan los principales impactos de cada uno. Una parte interesante en esta sección es el análisis microespacial, porque ilustra el grado de detalle que se puede lograr con nuestro modelo ACC. Finalmente, en la sección cuatro se presentan las conclusiones, se perfilan algunas recomendaciones de política urbana para avanzar en la salvaguarda de los recursos hídricos del AMT y su región, y se concluye con una breve agenda de investigación.

## Autómatas Celulares y expansión de las ciudades

En la actualidad se emplean diferentes herramientas matemáticas y aplicaciones de *software* para simular la expansión de las ciudades (Santé *et al.*, 2010; Aburas *et al.*, 2016; Clarke, 2018). Quizá las más utilizadas son los modelos fundamentados en AC (Triantakonstantis y Mountrakis, 2012): permiten generar escenarios de expansión de la ciudad y evaluar los impactos probables de cada uno, en un marco manejable de tiempo, información, esfuerzo y costos (Rocha-Campos *et al.*, 2018; Wahyudi y Liu, 2016).

Un modelo basado en AC es la representación de un sistema dinámico discreto que reproduce procesos en espacio-tiempo, en función de insumos,

estados y reglas de transición (Benenson y Torrens, 2004). Para entender esto en el marco de la expansión de la ciudad, aislemos las características claves de un AC: *i.* Considera espacios discretos, por lo que divide la ciudad en células, (e. g. celdas, pixeles) con localización específica; *ii.* Las células tienen un conjunto de estados posibles (e. g. cada celda puede estar construida, no-construida, restringida al crecimiento, no-restringida); *iii.* Registra los cambios de estado de las células en periodos discretos (usualmente años); *iv.* Los cambios de estado de las células (e. g. la transición del estado no-construida al estado construida) dependen de reglas de transición definidas por el analista y del estado de las células vecinas (el criterio de vecindad también lo define el analista); *v.* Las reglas de transición y el estado de las células vecinas tienen la capacidad de generar patrones complejos (e. g. áreas construidas, no-construidas) a diversas escalas espaciales (Wolfram, 1983; Barreira-González *et al.*, 2015).

El comportamiento de los AC es no-lineal, lo que genera patrones espaciotemporales no previstos (Torrens, 2000). Esta característica es típica de los sistemas complejos, como las ciudades. Por definición, un sistema complejo nunca se alcanza a conocer totalmente: ni sus variables, ni sus interdependencias, ni sus mecanismos (Maithani, 2010). Está integrado por múltiples elementos interrelacionados e interdependientes, se comporta en función del pasado, pero también de ciertas reglas y de su propia evolución (es evolutivo-adaptativo). Esto, más las interacciones de las células en espacio-tiempo, le permite al AC producir información propia, de tal manera que la información del sistema es mayor que la suma de la información de las células (Barreira-González *et al.*, 2015).

Se dice que los sistemas complejos (como las ciudades) son auto-organizados, porque las interacciones entre las células producen procesos que tienden a coordinarse espontánea y aleatoriamente: por las reglas de transición y por las condiciones del sistema al inicio y al final del periodo de análisis (e. g. estados de las células, patrón espacial de la mancha urbana) (Barredo *et al.*, 2003; Batty, 2007; Santé *et al.*, 2010; Triantakonstantis y Mountrakis, 2012).

En términos más operativos, un AC puede concebirse como un arreglo uniforme, cuadrículado, generalmente finito, formado por objetos similares llamados células (*i. e.* celdas, pixeles). Este arreglo puede

<sup>8</sup> El diseño de CHRISTALLER®: Estación de Inteligencia Territorial está pensado para usuarios no entrenados en altas matemáticas.



ser  $n$ -dimensional, pero para efectos de simulación de ciudades usualmente se implementa en dos dimensiones (Wolfram, 1983, 1994).

Un AC puede representarse por la función  $AC = (L, S, V, \delta)$ , donde  $L$  es la cuadrícula regular,  $S$  es el conjunto finito de todos los posibles estados que pueden tomar las células,  $V$  es el conjunto finito de células que definen las relaciones espaciales entre ellas (e. g. vecindad) y  $\delta$  es una función de transición aplicada a las células en cada lapso (i. e. regla de transición) (Jiménez et al., 2018).

Las reglas de transición pueden ser deterministas o probabilísticas, sencillas o altamente elaboradas. Las reglas deterministas parten de la manera de definir la vecindad entre las células. En un espacio unidimensional (i. e. lineal) cada célula solo puede tener dos celdas adyacentes (o vecinas) con las que comparte frontera y pueden formar ocho diferentes arreglos de vecindad (cada renglón de la figura 1 es un arreglo de vecindad). Usualmente, cero indica que la célula es un espacio vacante y uno que es espacio construido o restringido.

Si  $k$  es el número de estados posibles de las células (en este ejemplo tenemos dos estados: 0 y 1) y es el número de patrones de vecindad posibles (ocho: figura 1), el número de reglas de transición (o de instrucciones posibles) para la evolución de un AC de tres bits en un espacio lineal es:  $k^n = 2^8 = 256$ . Esto signi-

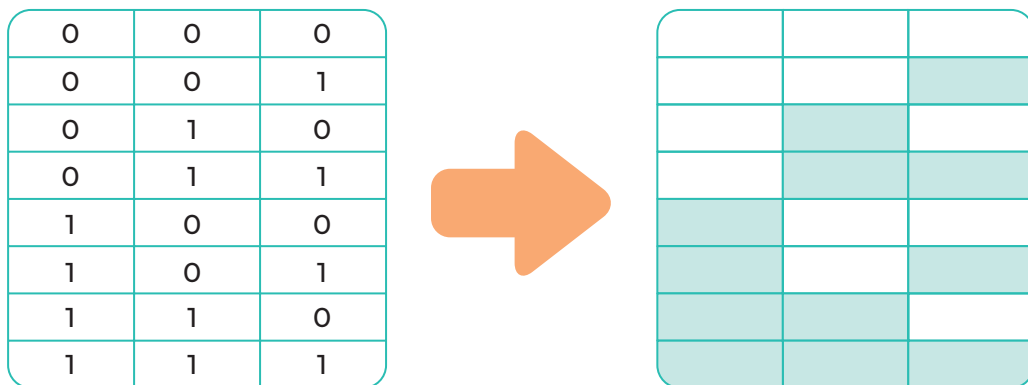
fica que se tienen 256 reglas de transición posibles para simular la evolución de un AC de tres bits en el espacio lineal (Padilla et al., 2015). El conjunto de espacios lineales genera un espacio bidimensional (e. g. la ciudad).

En los AC usualmente se adopta un proceso de análisis de arriba hacia abajo para simular patrones y procesos de expansión urbana (Jiménez et al., 2018). Por un proceso de "arriba-abajo" entendemos que el modelo aplica las reglas de transición de manera determinista comenzando por la esquina noroeste de la matriz de datos espaciales (e. g. la mancha urbana procesada), avanzando renglón por renglón, de izquierda a derecha y en orden descendente. En cambio, en el modelo de Autómata Celular en Cascada (ACC) que utilizamos en este trabajo, las reglas de transición no responden a un patrón "de arriba-abajo" sino que se selecciona el punto de aplicación de manera aleatoria, lo que reduce notablemente el determinismo del modelo (Jiménez et al., 2020; Aguilera, 2006; Martner, 2016).

En Jiménez et al., 2020, se presenta una detallada explicación matemática del modelo y sus indicadores de bondad de ajuste. El modelo ACC opera de manera automatizada en CHRISTALLER®: Estación de Inteligencia Territorial (Chávez-Soto y Garrocho, 2018). Esto facilita su manejo a los no entrenados en matemáticas avanzadas.

Figura 1.

Posibles arreglos de vecindad de un Autómata Celular unidimensional



## Filtro en Cascada: método de calibración

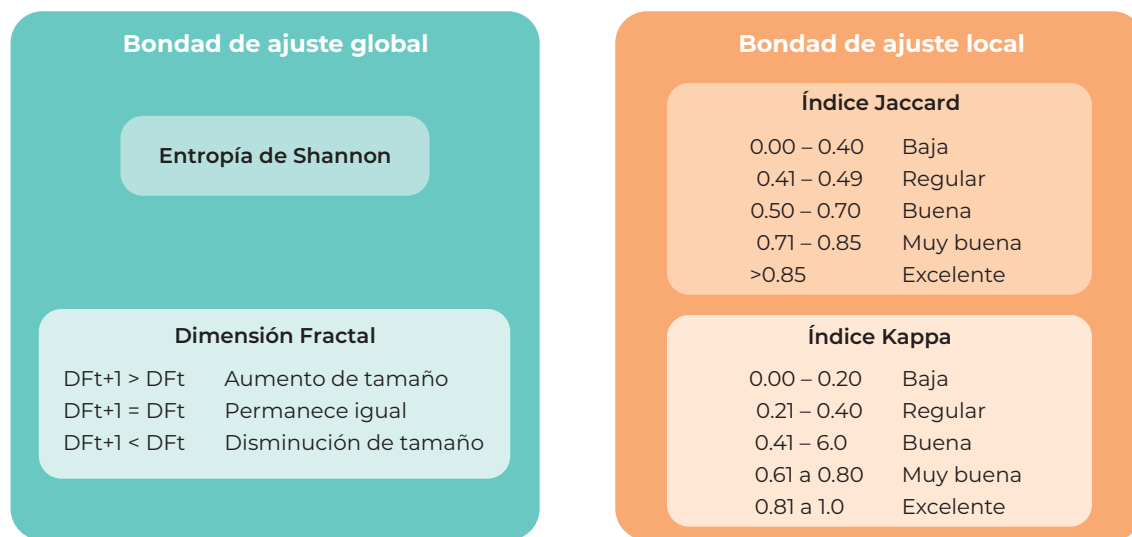
Antes de utilizar el modelo Acc para simular escenarios de expansión urbana, se requiere calibrarlo, es decir: identificar la regla de transición que ofrece el mejor ajuste entre la mancha urbana observada (*i. e.* real) en  $t+1$  (e. g. 2017) y la que produce el modelo (también para  $t+1$ ), usando como insumo la mancha urbana observada en  $t$  (e. g. 2003).

En este trabajo utilizamos el método de calibración Filtro en Cascada (propuesto por Jiménez *et al.*, 2020).<sup>9</sup> Este Filtro considera cuatro indicadores de bondad de ajuste para develar la Regla de Transición que mejor replica la expansión observada de la ciudad. Dos indicadores a escala de ciudad, que miden el parecido entre la mancha urbana observada y la calculada por el modelo (los llamamos indicadores

globales): Entropía de Shannon y Dimensión Fractal; y dos que miden la coincidencia de pixeles entre ambas manchas urbanas (los referimos como indicadores locales): Índice de Kappa de Cohen e Índice de Jaccard (véase figura 2).

Cada indicador del Filtro mide temas claves del proceso de expansión urbana (Clarke, 2018): *i.* Entropía de Shannon, estima lo compacto o disperso de la mancha urbana (Cabral *et al.*, 2013); *ii.* Dimensión Fractal, sintetiza el crecimiento y la forma de la mancha urbana (Chen, 2018); *iii.* Índice de Kappa de Cohen, mide la similitud entre dos mapas descontando la coincidencia esperada por el azar (Viera y Garrett, 2005); y, *iv.* Índice de Jaccard, mide la similitud de la localización de las celdas considerando su información: es el indicador de bondad ajuste más reportado en la literatura sobre similitud de imágenes (Guan y Rowe, 2016).<sup>10</sup>

**Figura 2.**  
Bondad de ajuste aplicando el Filtrado en Cascada



Fuente: Elaboración propia con base en Lin *et al.*, 2018; Warrens, 2015; Rosebrock, 2017; Mohan y Khan, 2018; y Jiménez *et al.*, 2020.

<sup>9</sup> En Jiménez *et al.*, 2018 y 2020 y Jiménez, 2019, se explica su operación en el ambiente de CHRISTALLER®.

<sup>10</sup> Estos indicadores tienen diversas aplicaciones. En inteligencia artificial se utilizan en los sistemas de conducción de automóviles autónomos (sin conductor), para entender el entorno: distinguir objetos, personas, navegar con seguridad. En Jiménez, 2019, y Jiménez *et al.*, 2018 y 2020, se presenta una detallada explicación de estos indicadores.

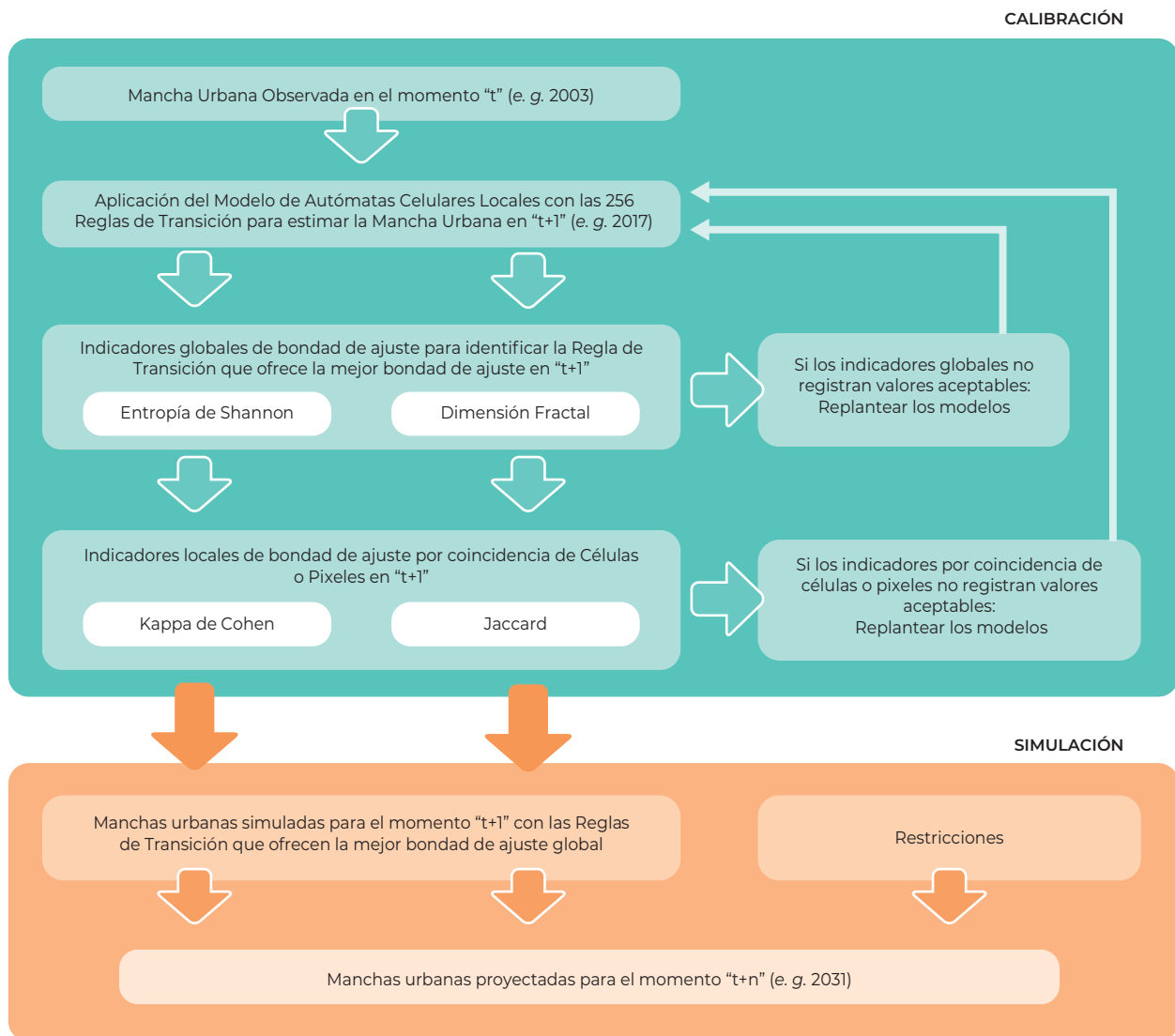


El Filtro en Cascada devela el o los modelos que mejor replica(n) la mancha urbana observada en  $t+1$ , aplicando cada una de las 256 Reglas de Transición. En otras palabras: a través de CHRISTALLER® se generan 256 modelos y se calcula la bondad de ajuste de cada uno de ellos. El Filtro también reduce el tiempo de cómputo para identificar el o los modelos que mejor replican la mancha urbana en  $t+1$  (véase figura 3).

Se dice que el Filtro opera en cascada porque consiste en dos fases. Primero evalúa la bondad de ajuste global (a escala de ciudad) que ofrece cada Regla de Transición. Para esto se comparan los valores de la Entropía de Shannon y la Dimensión Fractal de la mancha urbana observada en  $t+1$  (e. g. 2017), con los valores derivados de las manchas urbanas estimadas por los modelos, cuyo insumo fue la mancha urbana

Figura 3.

Filtro en Cascada con Entropía de Shannon, Dimensión Fractal, Índices de Kappa de Cohen y Jaccard



observada en  $t$  (v. g. 2003). La comparación es directa porque la Entropía de Shannon relativizada varía entre “0” y “1” (Bhatta *et al.*, 2010) y la Dimensión Fractal entre “1” y “2” (Shen, 2002).<sup>11</sup>

El o los modelos que produzcan la menor diferencia es/son los que mejor simulan la expansión urbana en el periodo de análisis. Si los indicadores de Shannon y Fractal señalan como óptima la misma Regla de Transición se tendrá un solo modelo. No obstante, lo usual es que cada indicador señale diferentes Reglas de Transición como las mejores, ya que se enfocan en diferentes aspectos de la mancha urbana. Al final de esta etapa se tendrán, normalmente, varios modelos certeros por cada indicador global (cada uno con su propia Regla de Transición).

En la segunda fase de filtrado se evalúa la bondad de ajuste local (coincidencia de píxeles) de los modelos que registraron el mejor ajuste global en la primera etapa. Se estiman el índice de Kappa de Cohen y el de Jaccard. Ambos varían en un rango de 0.0 a 1.0. Cuando el Kappa de Cohen es 1.0 indica coincidencia perfecta entre los píxeles de las dos manchas urbanas (la generada por el modelo y la observada) por localización y estado. Cuando es 0.0 la coincidencia es la que se esperaría por azar. Por su parte, el Índice de Jaccard también mide la similitud entre las dos manchas urbanas, pero en términos de localización, estado y de otra información (e. g. variables hidrológicas). Si su valor es 1.0 significa total igualdad y 0.0 indica total desigualdad. Como los indicadores Kappa de Cohen y Jaccard son similares, la literatura sobre segmentación de imágenes recomienda utilizar los dos para verificar que ambos apunten en el mismo sentido (Rutter *et al.*, 2019).

Si los valores de los índices de Kappa y Jaccard son aceptables se procede a simular la expansión de la mancha urbana observada a un cierto horizonte temporal (aquí es 2031), con el propósito de generar escenarios exploratorios y/o experimentales. Si los índices de Kappa o Jaccard no registran valores tolerables se deben rediseñar los modelos (véase figura 3). Con este segundo tamiz concluye la calibración con el

Filtro en Cascada. Para simular escenarios, lo usual es asumir diversas condiciones de expansión de la ciudad: tendencial, más rápido/lento, con diversas zonas restringidas o no.

Los dos escenarios que se analizan aquí se simularon con el modelo Acc calibrado con el Filtro en Cascada. En la simulación a 2031, el insumo del modelo es la mancha urbana en  $t+1$  (2017) y el resultado es la expansión urbana probable en 2031. El horizonte temporal responde a que el modelo se calibró con información cartográfica de un periodo de 14 años.

## Zona de estudio, fuentes de información, escenarios y software

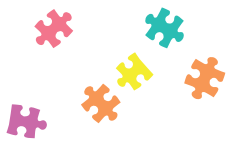
### Zona de estudio

El AMT se localiza a 60 km de la Ciudad de México: media hora por autopista de altas especificaciones. Es la quinta ciudad más poblada de México (más de 2.2 de millones de habitantes en 2020) y ha registrado una expansión muy acelerada en los pasados años (Jiménez *et al.*, 2020). En 2003 cubría una superficie de 16 571 hectáreas, que alcanzó 29 987 hectáreas en 2017 (un aumento de 81.0%). Este crecimiento, disperso, fragmentado, desordenado, ha generado patrones de poblamiento poco sostenibles, que generan una enorme presión sobre la disponibilidad de agua (Vilchis-Mata *et al.*, 2018).

Toluca se localiza dentro del sistema hidrológico Lerma-Chapala-Santiago, uno de los más importantes de México, en el que convergen tres cuencas: las de los ríos Cutzamala, Grande Amacuzac y Lerma-Toluca. La cuenca con mayor presencia en el AMT es la del Río Lerma al sur de la ciudad, que abarca una superficie de 5 395 km<sup>2</sup>: 24 por ciento del total del territorio estatal (SIRT, 2016).

La ciudad cuenta con dos fuentes fundamentales de abastecimiento de agua. La primera son los pozos profundos del acuífero de Toluca, que se encuentran en veda para nuevos aprovechamientos desde 1965, debido a su sobreexplotación. La segunda es el Sistema Cutzamala que ha estado en funcionamiento durante 80 años y atiende a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. El AMT tenía una tercera fuente de abastecimiento: el Curso Alto

<sup>11</sup> Si lo que interesa es modelar la dispersión-concentración de las áreas construidas la bondad de ajuste global se estima con la Entropía de Shannon. Si el propósito es modelar el crecimiento-forma de la mancha urbana es mejor apoyarse en la Dimensión Fractal. CHRISTALLER® estima los dos indicadores.



del Río Lerma, pero se agotó hace décadas (Bernardino, 2014; Esteller et al., 2015).

El proceso de urbanización afectó los sistemas naturales de recarga de agua de la ciudad: parte de sus ríos y cauces naturales se integraron al drenaje del AMT, disminuyó el nivel freático, se desecaron las lagunas del Río Lerma y el sistema lacustre se deterioró. El AMT enfrenta presión alta en sus recursos hídricos (Vilchis-Mata et al., 2018).

### Fuentes de información

La representación del AMT se apoyó en imágenes satelitales pancromáticas de los satélites Landsat 7 y 8. Se combinaron las bandas 4, 6 y 7, que muestran la superficie de la zona de estudio con características urbanas en escala de imágenes RGB denominadas Falso Color (Romano, 2018). El resultado de este tratamiento de las imágenes es el insumo para los procesos del modelo ACC que opera en CHRISTALLER®. Las imágenes son binarizadas para cada uno de los píxeles: 1 para espacios ocupados por la ciudad (no-urbanizables) y 0 para espacios libres (urbanizables). Se manejó una resolución de celdas de 15x15 metros. Cada una tiene una extensión de 225 mts<sup>2</sup>.

### Escenarios: aspectos operativos

Hay que recordar que el objetivo del trabajo es evaluar *ex-ante* las diferencias entre dos posiciones de política pública, una laxa y otra estricta, en términos de la protección de los recursos hídricos derivados de la expansión del AMT. La visión respetuosa de los recursos hídricos supone restringir la expansión de la ciudad en diversas partes del *hinterland* (i. e. la región circundante) del AMT, además de considerar las restricciones lógicas al interior de la ciudad (e. g. plazas, espacios simbólicos, vialidades, aeropuerto).

Los insumos base para la construcción de las restricciones fueron la Cartografía Geoestadística Urbana y Rural Amanzanada (INEGI, 2016), la Red Nacional de Caminos (INEGI, 2018), las Áreas Naturales Protegidas Federales de México (CONABIO, 2017), las Áreas Naturales Protegidas Estatales y del Distrito Federal de México (CONABIO, 2009).

Se delimitaron manualmente zonas industriales, gubernamentales, escolares, de infraestructura estratégica, entre otras. Para esto se analizó información urbanística (e. g. planes de desarrollo urbano), física (e. g. áreas vulnerables, pendientes topográficas), ambiental (e. g. áreas protegidas, zonas de recarga hídrica). Estas capas de información se conjuntaron para simular y comparar los efectos de las dos visiones de política pública en sus afectaciones hídricas por la expansión urbana.

### Herramientas de software

Todo el proceso de construcción, simulación, valoración y despliegue de resultados de los modelos ACC con restricciones, se realizó de forma automatizada en CHRISTALLER® (Chávez-Soto y Garrocho, 2018).

El ACC es una de las herramientas disponibles en CHRISTALLER®. Permite calibrar el modelo (encontrar la mejor regla de transición) y simular escenarios. Genera estadísticas clave (e. g. bondad de ajuste de la calibración) y las imágenes asociadas a los distintos escenarios. Tiene una interfaz amigable y totalmente acoplada a los Sistemas de Información Geográfica ARcGis y Qgis.

Ejemplos de resultados del modelo ACC en CHRISTALLER se muestran en el video 1.



### Resultados: calibración y simulación de escenarios

#### Calibración

Mientras el AMT cubría en 2017 un área de 29 987 hectáreas, el *hinterland* abarca en este estudio 82 860 hectáreas: espacio suficiente para simular la expansión de la ciudad al 2031 (véase cuadro 1).



| Cuadro 1.<br>AMT. Área de estudio (hectáreas) |                 |              |                 |              |                |
|---|-----------------|--------------|-----------------|--------------|----------------|
| Área de estudio                               | 2003            | %            | 2017            | %            | Dif. 2017-2003 |
| Espacio libre                                 | 66 289.0        | 80.0         | 52 873.2        | 63.8         | -13 415.9      |
| Área ocupada                                  | 16 571.5        | 20.0         | 29 987.4        | 36.2         | 13 415.9       |
| <b>Total</b>                                  | <b>82 860.6</b> | <b>100.0</b> | <b>82 860.6</b> | <b>100.0</b> |                |

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2016 y 2018) y CONABIO (2009 y 2017).

Las figuras 4a y 4b muestran el AMT observada para 2003 y 2017. Este periodo se utilizó para calibrar el modelo. El mapa de 2003 es el llamado mapa base  $t$  y el otro corresponde al mapa  $t+7$ : 2017. Estas imágenes satelitales son insumos básicos del modelo. El AMT en 2003 se representa en color azul claro: cubre 20 por ciento del *hinterland*. La mancha urbana en 2017 se representa en color azul oscuro y ocupa 36.2 por ciento.

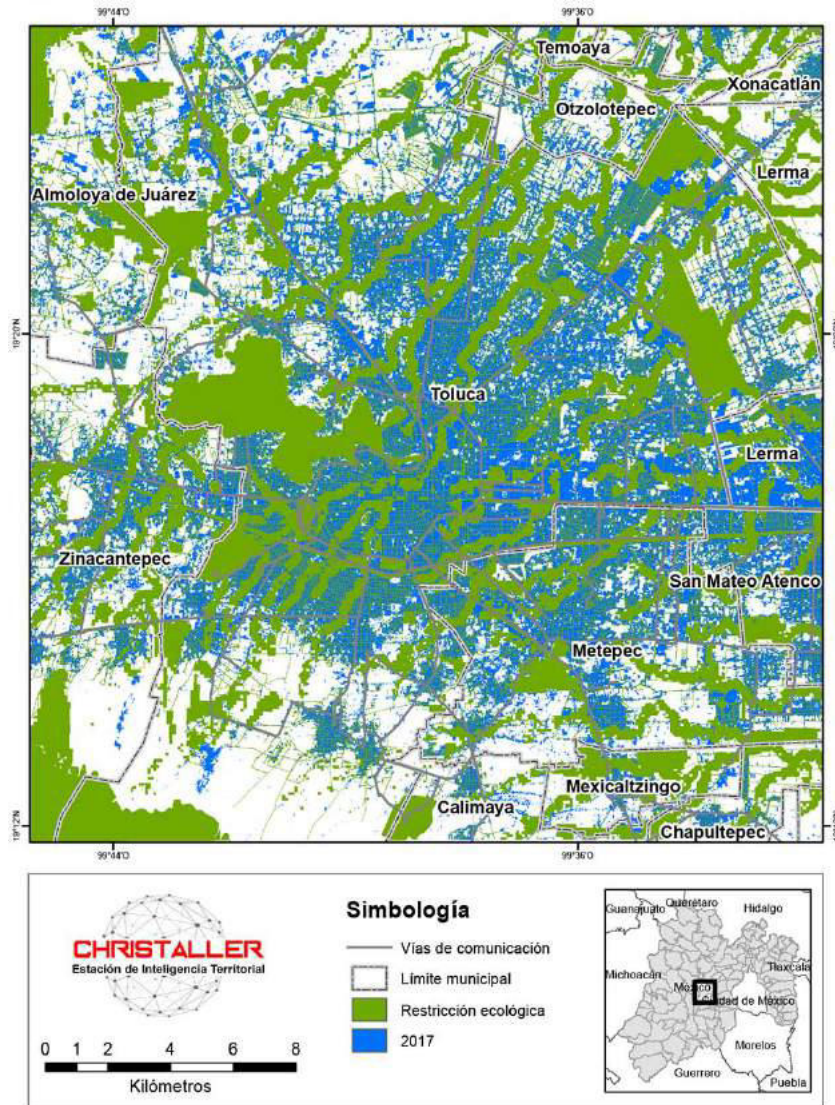
Luego de estimar 256 modelos en el ACC, CHRISTALLER® identificó las Reglas de Transición que ofrecen la mejor bondad de ajuste. La figura 4c muestra la expansión del AMT que genera el modelo ACC para 2017, con la Regla más precisa que detectó el filtro de Entropía de Shannon: la 211. Con un valor de Kappa de 0.62 y Jaccard de 0.72. Lo compacto/disperso del AMT según la Entropía de Shannon es muy similar en la imagen observada y en la estimada (para el periodo de 14 años), con un valor de 0.94: el valor máximo de este indicador es 1.0.

La figura 4d muestra la simulación de la expansión del AMT operando el Filtro de la Dimensión Fractal, que identificó la Regla 223 como la que genera la simulación más precisa en términos de forma/crecimiento. El resultado también es muy estimulante: el valor de este indicador es 1.84 (su valor máximo es 2.0). Kappa 0.60 y Jaccard 0.62. Los indicadores de la bondad de ajuste local para el AMT fueron buenos y muy buenos (véase cuadro 2), los valores más altos se obtuvieron con el modelo que se apoya en la Entropía de Shannon. Utilizaremos este modelo ACC para las simulaciones de los escenarios.

Como la bondad de ajuste del modelo ACC es satisfactoria, es posible simular/explorar escenarios de la expansión del AMT. Se contrastarán dos escenarios: uno donde no se restringen al crecimiento urbano las zonas hídricas estratégicas del AMT, y otro en el que estas zonas son estrictamente restringidas.

**Figura 6.**

**AMT.** Restricciones ecológicas (hídricas) para el crecimiento de la mancha urbana



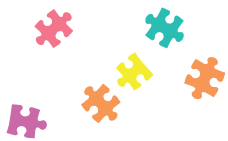
Fuente: Elaboración propia con base en CHRISTALLER®.

**Cuadro 3.**

**AMT.** Espacios con y sin restricción en los dos escenarios de estudio, 2017

| Escenario        | Disponible |      | Con restricción |      |            |      | Área de estudio (Ha) |            |
|------------------|------------|------|-----------------|------|------------|------|----------------------|------------|
|                  | Total (Ha) | %    | Ocupado (Ha)    | %    | Libre (Ha) | %    |                      | Total (Ha) |
| <b>Base</b>      | 62 044.1   | 74.9 | 9 797.9         | 11.8 | 11 018.6   | 13.3 | 20 816.5             | 82 860.6   |
| <b>Ecológico</b> | 46 550.1   | 56.2 | 13 799.5        | 16.7 | 22 511.1   | 27.2 | 36 310.5             | 82 860.6   |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados.



## Simulación de la mancha urbana de Toluca para 2031

¿Cómo sería la expansión de Toluca al 2031 si se respetan o no las zonas estratégicas de seguridad hídrica? La pregunta es compleja y casi imposible de explorar sin contar con un modelo relativamente confiable y práctico de expansión urbana. El análisis que presentamos es obligadamente sucinto por las limitaciones de espacio, pero suficiente para ilustrar la utilidad de los modelos ACC. Para abreviar nos referiremos al escenario en el que no se respetan las zonas hídricas estratégicas como E1 y al escenario donde sí se respetan las restricciones hídricas como E2.

El resultado de la simulación con el modelo ACC es una mancha urbana probable del AMT para 2031. Reiteramos: el modelo es, simplemente, un instrumento de planeación que permite generar escenarios razonables de expansión de la ciudad, con el fin de apoyar la toma de decisiones urbanas, de manera oportuna (*ex-ante*: antes de que el escenario se concrete en la realidad), así como explorar algunos de los probables impactos.

### a) Escenario 1: escenario sin protección hídrica

En 2017 el AMT cubría 29 987 hectáreas. En la simulación realizada para 2031 (E1) cubre 54 262 hectáreas. Un aumento de 24 275 hectáreas, lo que significa que en 14 años se plantea que la ciudad crezca casi 81 por ciento con respecto a 2017. El crecimiento de los 14 años previos (de 2003 a 2017) tuvo una velocidad

similar. Hay que recordar que modelamos un crecimiento tendencial, por lo que la pregunta de cuánto crecerá no es tan importante, como sí lo es la cuestión de dónde crecerá la mancha urbana.

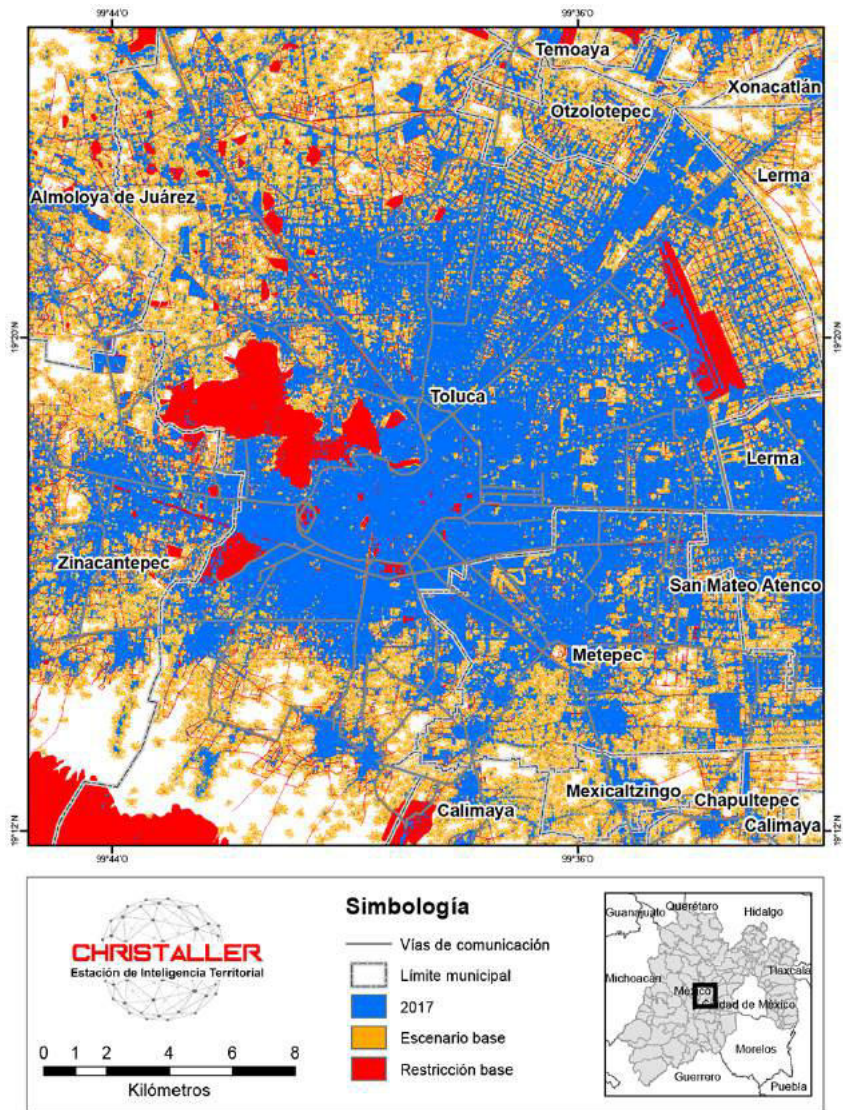
La inspección visual de la simulación del modelo parece implicar una expansión más acelerada del AMT en número de hectáreas, lo que va a contracorriente de lo que reporta la literatura mexicana para las grandes ciudades de México (Garrocho, 2013). Sin embargo, la explicación es otra: Toluca está rodeada de asentamientos que actualmente están separados de la mancha urbana y la expansión de la ciudad los incorporará al área urbana continua, lo que incrementará notablemente su extensión. Este sería un primer hallazgo.

En la figura 7 se muestra el crecimiento probable de la ciudad para 2031 en el E1, en el que se aplican solamente las restricciones base. Un análisis a escala de pixel (cada pixel cubre un área cuadrada de 15x15 metros) permite identificar áreas de la ciudad que estaban desocupadas en 2017 y que fueron ocupadas por la expansión tendencial de la ciudad (véase cuadro 4).

Los espacios ocupados en la ciudad para el año 2017, sumaban un total de 29 987 hectáreas, este espacio incluye zonas marcadas como restringidas (8 791 hectáreas), y libres o sin restricción (21 196 hectáreas). La simulación del E1 para 2031 ocupa 54 262 hectáreas, incluyendo zonas de gran importancia hídrica para el AMT. Recordar: el E1 muestra una expansión urbana tendencial, en el que no se aplican políticas restrictivas eficaces en materia hídrica.

**Figura 7.**

**AMT.** Escenario de crecimiento de la mancha urbana a 2031, sin restricciones ecológicas (hídricas)



Fuente: Elaboración propia con base en CHRISTALLER®.



**Cuadro 4.**  
**AMT. Ocupación de la mancha urbana de Toluca en 2031: Escenario sin protección hídrica (E1)**

| Estado       | Protección      | 2017          |            | 2031          |            |
|--------------|-----------------|---------------|------------|---------------|------------|
|              |                 | Área (Ha)     | %          | Área (Ha)     | %          |
| Ocupado      | Restringido     | 8 791         | 10.6       | 8 791         | 10.6       |
|              | Sin restricción | 21 196        | 25.6       | 45 471        | 54.9       |
| Desocupado   | Restringido     | 42 990        | 51.9       | 18 715        | 22.6       |
|              | Sin restricción | 42 990        | 51.9       | 18 715        | 22.6       |
| <b>Total</b> |                 | <b>82 861</b> | <b>100</b> | <b>82 861</b> | <b>100</b> |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados.

## b) Escenario 2: escenario con protección hídrica

El segundo escenario (E2) considera que se instrumentan políticas de protección a las zonas hídricas claves para el AMT. Es decir: a las restricciones base del E1 se le suman las restricciones que salvaguardan recursos hídricos estratégicos para el futuro de la ciudad (véase figura 8). En estas zonas no se debe permitir la expansión urbana porque se pone en riesgo la seguridad hídrica del AMT.

En el E2 los espacios ocupados en la ciudad para el año 2017, etiquetados como zonas restringidas suman 13 862 hectáreas y los ocupados sin restricción llegan a 16 125 hectáreas. La simulación del E2 a 2031 respeta los espacios restringidos y ocupa solo las zonas urbanizables sin restricciones (véase cuadro 5).

### Impactos

Resulta inquietante que muchas de las zonas estratégicas de seguridad hídrica del AMT son altamente susceptibles a la urbanización, por su valor comercial. La lógica del mercado sugiere que podrían ocuparse rápidamente en un escenario sin políticas de protección a los recursos hídricos (E1). Esto es inaceptable para el futuro de la ciudad. Las zonas estratégicas en materia de seguridad hídrica son vitales para el AMT y un capital natural muy valioso por los servicios ambientales que generan.

En la figura 9 destacan las áreas de la ciudad que, aunque forman parte de las zonas hídricas restringidas, ya han sido ocupadas por la ciudad. Suman 13 862 hectáreas (véase cuadro 5) y ya no

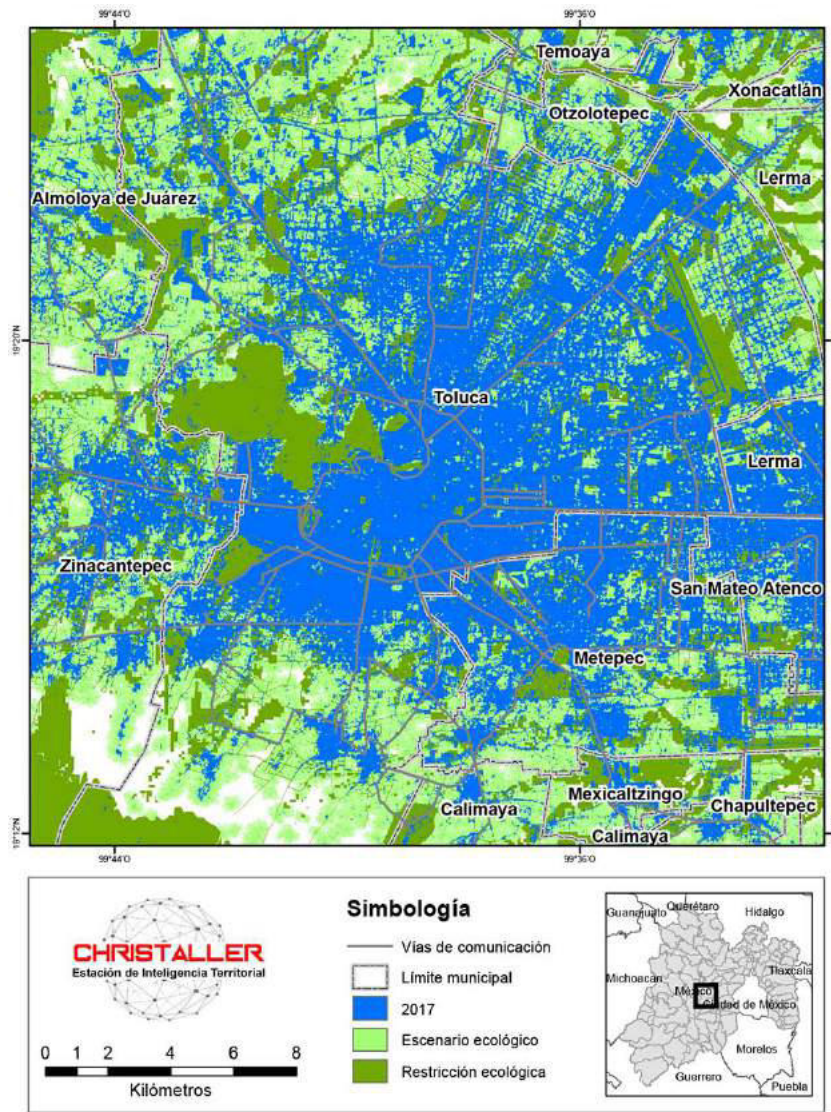
hay mucho que proteger: el daño ya está hecho. Lo factible es garantizar que los espacios marcados como restringidos por su importancia hídrica no sean ocupados en el futuro. El reto es serio para los gobiernos: deben preservar un territorio de 21 320 hectáreas (color verde en la figura 9). El valor inmobiliario de estas zonas es enorme. Solo por dar un orden de magnitud: son 213 millones de metros cuadrados. Si asignamos un valor promedio conservador de mil pesos el metro cuadrado, el resultado sería 213 mil millones de pesos: aproximadamente nueve mil millones de dólares en 2020. La oportunidad de negocio es muy tentadora.

El E2 (que plantea una aplicación estricta de políticas ecológicas) indica que se tendría una ciudad más extendida. Esto generaría traslados más largos, pero no se invaden las reservas ecológicas (véase figura 10), pero el E1 indica que, si continúa el crecimiento tendencial, la ciudad enfrentaría graves problemas hídricos (véase figura 10). Con frecuencia la política urbana implica elegir la opción que cause menos daño: la que implica el menor costo medioambiental, económico y social.

Este dato sobre los impactos de la expansión urbana permitiría a los tomadores de decisiones anticiparse al crecimiento de la ciudad para el 2031. Particularmente, en el tema de vías de transporte que inciden notablemente en la localización y cantidad de suelo atractivo para edificar. Con un modelo Acc, por primera vez los gobiernos del AMT irían adelante de la expansión urbana: guiándola, en lugar de ir atrás, tratando de corregirla (infructuosamente), como actualmente ocurre.

**Figura 8.**

**AMT. Escenario de crecimiento de la mancha urbana a 2031, con restricciones ecológicas (hídricas)**



Fuente: Elaboración propia con base en CHRISTALLER®.

**Cuadro 5.**  
**AMT. Ocupación de Toluca en 2031 para el Escenario Ecológico (E2)**

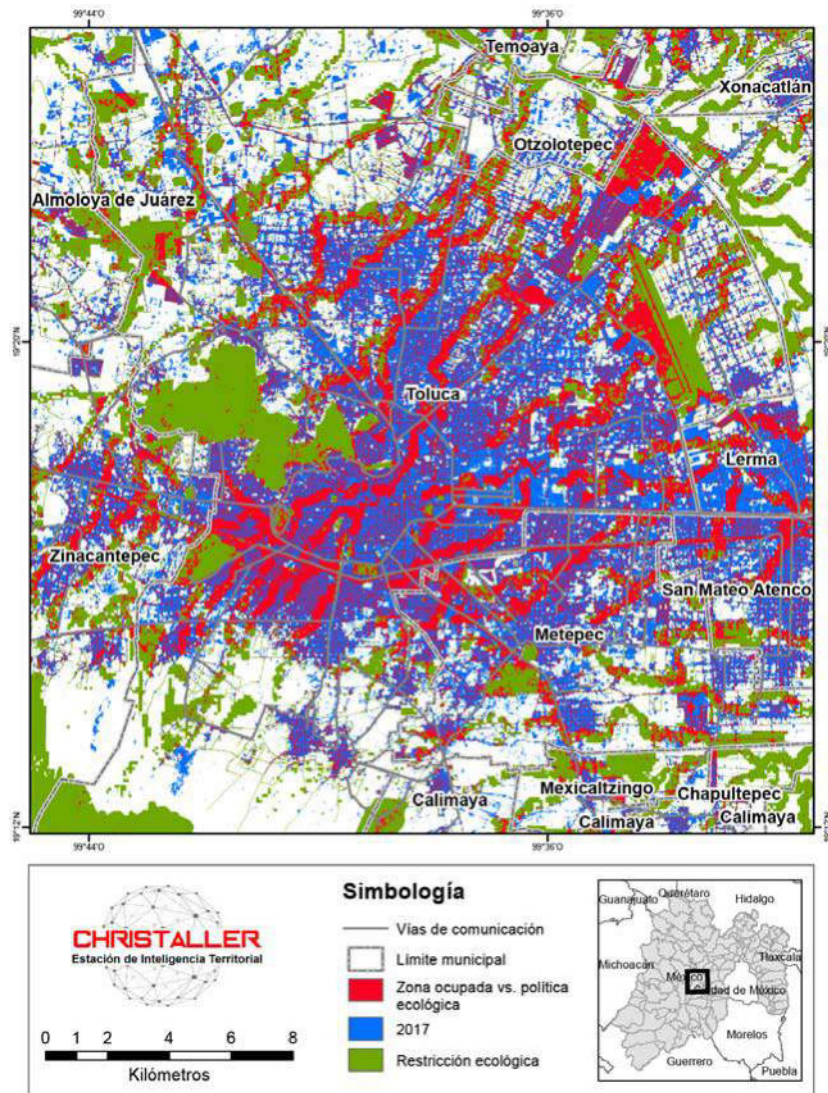
| Estado       | Protección      | 2017          |            | 2031          |            |
|--------------|-----------------|---------------|------------|---------------|------------|
|              |                 | Área (Ha)     | %          | Área (Ha)     | %          |
| Ocupado      | Restringido     | 13 862        | 16.7       | 20 326        | 24.5       |
|              | Sin restricción | 16 125        | 19.5       | 33 936        | 41         |
| Desocupado   | Restringido     | 21 320        | 25.7       | 14 855        | 17.9       |
|              | Sin restricción | 31 553        | 38.1       | 13 743        | 16.6       |
| <b>Total</b> |                 | <b>82 861</b> | <b>100</b> | <b>82 861</b> | <b>100</b> |

Fuente: Elaboración propia con base en resultados.



**Figura 9.**

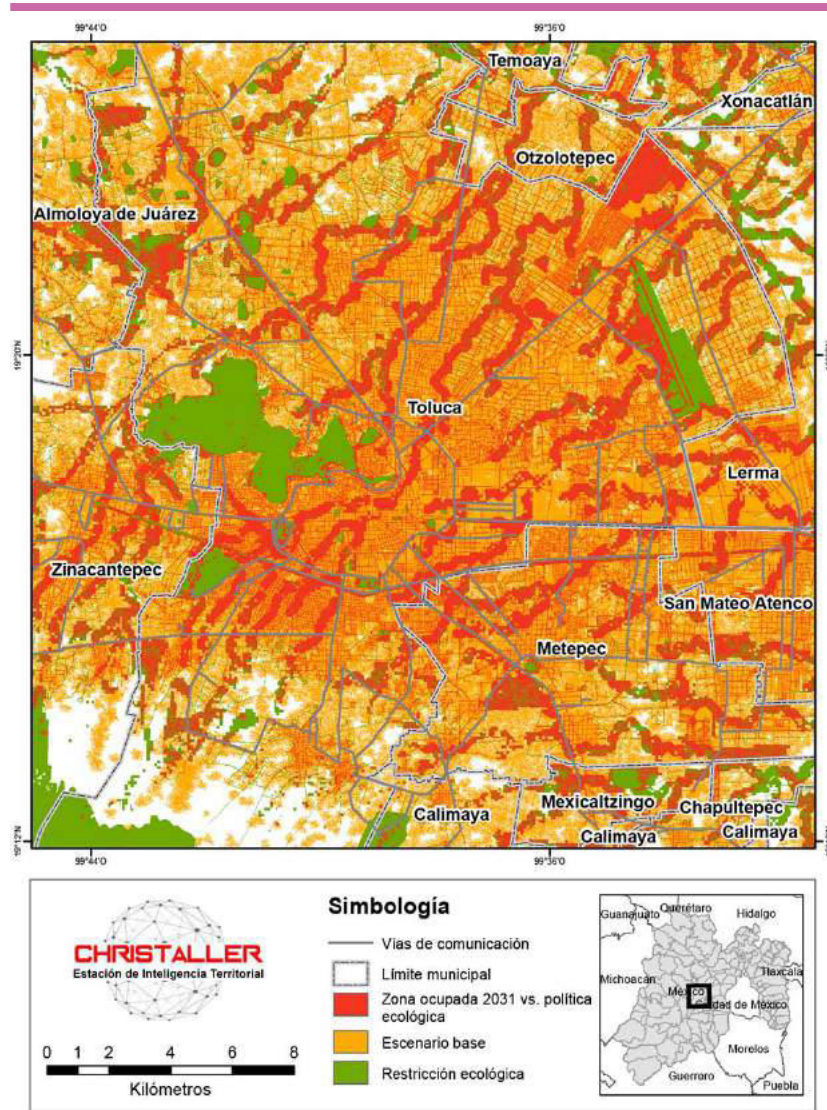
**AMT.** Zonas restringidas ocupadas 2017 y zonas restringidas susceptibles de ser protegidas para el crecimiento futuro



Fuente: Elaboración propia con base en CHRISTALLER®.

Figura 10.

AMT. Crecimiento tendencial 2031, contrastado con las restricciones ecológicas del escenario 2 (E2)



Fuente: Elaboración propia con base en CHRISTALLER®.

### Un análisis micro de espacios en riesgo

En esta sección hacemos un zoom al territorio, con el fin de ilustrar el grado de detalle que puede lograr el modelo ACC en CHRISITALLER®. En el E1 se destacan cinco zonas periurbanas que registran expansión (véase figura 11): dos concentradas en la periferia del noroeste de la ciudad (en Almoloya de Juárez: espacio rico en tierras agrícolas), otra que forma una franja en el oeste (en Zinacantepec: municipio consolidado), una

más que se aglutina en el extremo este (en Lerma) y finalmente una en el sureste de la mancha urbana (al sur de Metepec, Mexicaltzingo y Calimaya: áreas ricas en tierras agrícolas).

El E1 indica que no solo se perderían zonas agrícolas claves para el AMT, sino que se afectan áreas hídricas de importancia estratégica, especialmente en Almoloya de Juárez y Zinacantepec; en el eje que corre del centro de la ciudad al noreste donde se pierden tres zonas importantes en Lerma y San Mateo Atenco;





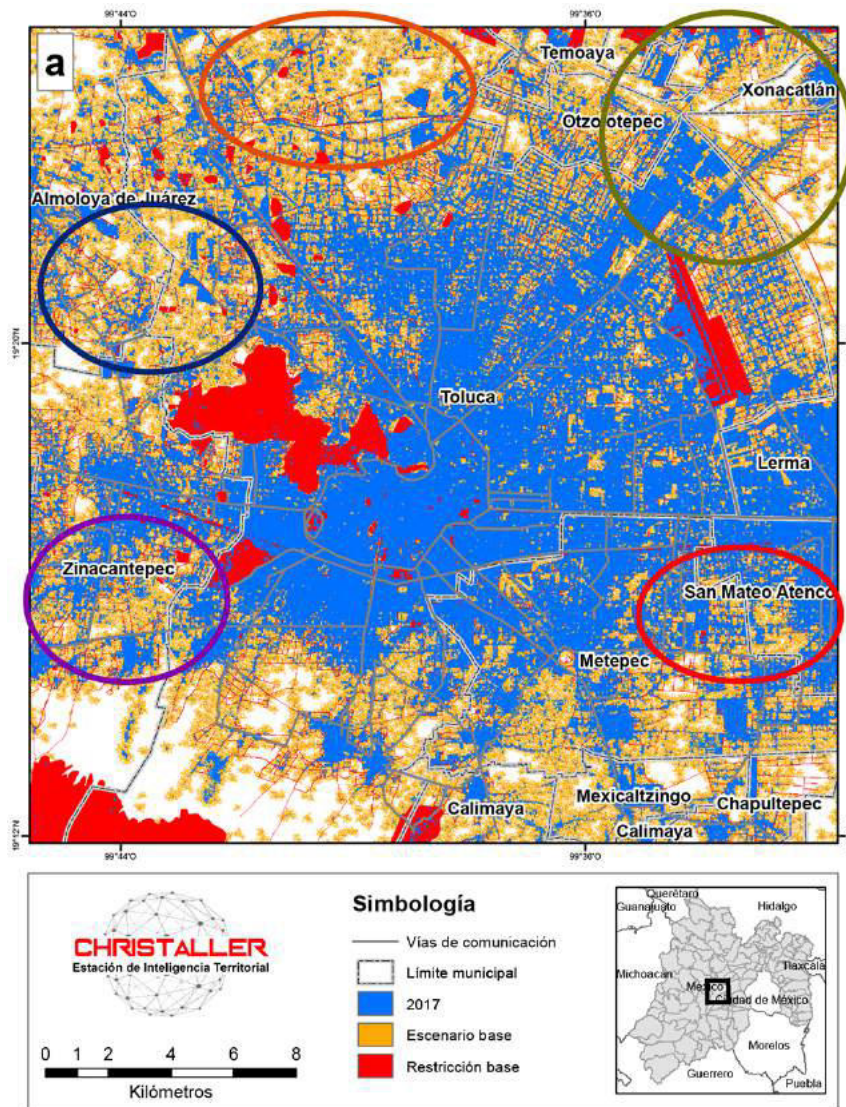
y algunas otras en Metepec y Mexicaltzingo (véase figura 11). El contraste es muy interesante si comparamos estas zonas de la figura 11a con lo que ocurre en la figura 11b, que representa el E2.

Puede llamar la atención que se detectan zonas restringidas que registran cierta expansión urbana. La razón, como hemos mencionado, es que ya registraban ocupación en 2017 y la simulación considera su inercia de crecimiento (que está ocurriendo en este momento, mientras elaboramos este trabajo).

Los microespacios entre Almoloya de Juárez y Toluca tiene pendientes pronunciadas al suroeste del municipio de Almoloya: la parte limítrofe de la localidad de San Francisco Tlalcalcalpan está marcada como zona de riesgo de inundación en el Atlas Municipal de Riesgos de Almoloya de Juárez. Si no se restringe sería ocupada por la mancha urbana. También se detectan espacios agrícolas que serían ocupados por la ciudad.

Figura 11a.

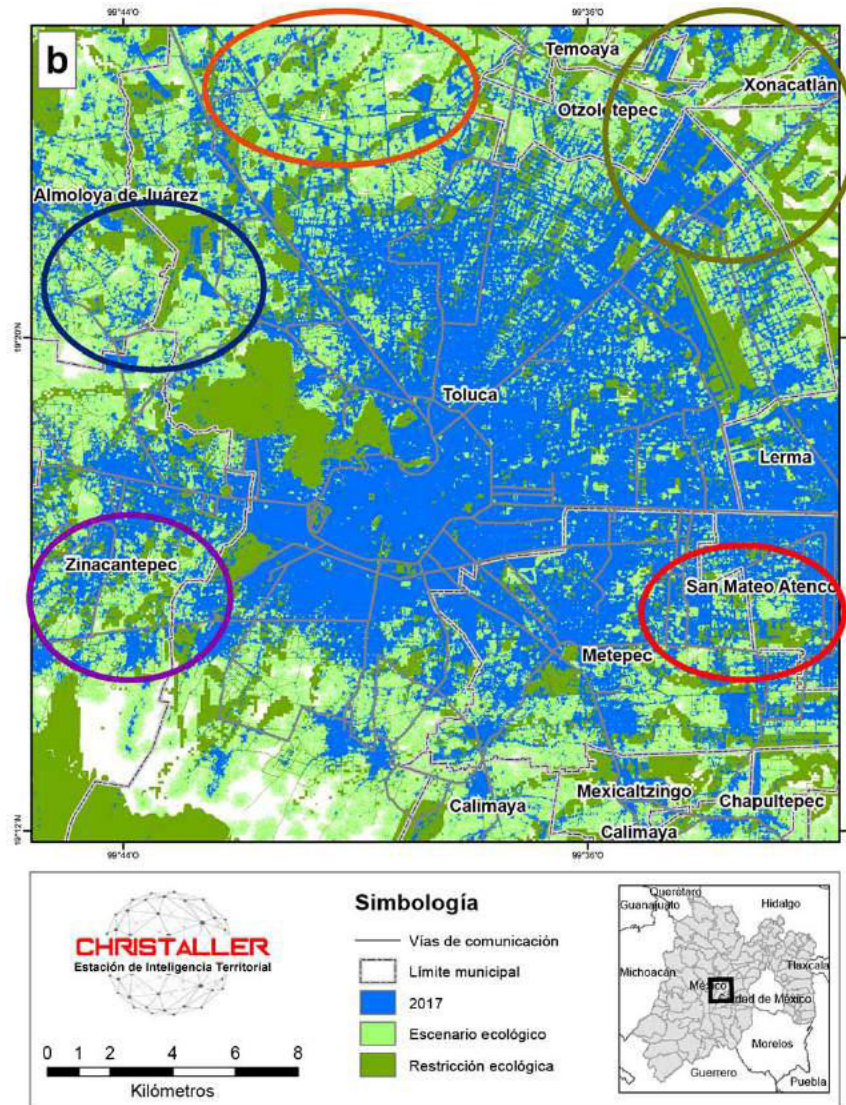
AMT. Micro-zonas de riesgo de ocupación en zonas de recursos hídricos estratégicos al 2031



Continúa...

Figura 11b.

AMT. Micro-zonas de riesgo de ocupación en zonas de recursos hídricos estratégicos al 2031

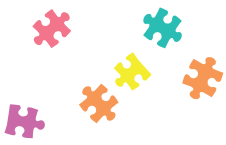


Fuente: Elaboración propia con base en CHRISTALLER®.

En el microespacio ubicado al suroeste de la zona de estudio (en el municipio de Zinacantepec) se localizan afluentes de dos ríos muy importantes en la cuenca del AMT: el Verdiguél y el Tejalpa. En tiempos recientes parte de estos afluentes han sido entubados y convertidos en parques o calles. Estas zonas son altamente inundables ya que se encuentran en una depresión acentuada y confluyen ríos intermitentes reconvertidos en calles, parques y viviendas.

## Conclusiones

Se ilustró la utilidad de los modelos automatizados de expansión urbana, para apoyar la toma de decisiones sobre el crecimiento de la ciudad. Con oportunidad y sobre bases informadas. Utilizamos una ciudad real de gran escala: el AMT, la quinta más poblada de México. Simulamos escenarios de cómo la expansión de la ciudad podría afectar su seguridad hídrica.



El modelo de expansión del AMT se construyó en CHRISTALLER®: Estación de Inteligencia Territorial. CHRISTALLER® facilita el trabajo de modelado y evaluación *ex-ante* de políticas urbanas públicas y privadas. No requiere entrenamiento en matemáticas avanzadas.

Contrastamos dos escenarios con un modelo ACC con áreas restringidas (e. g. calles, avenidas, parques, espacios públicos, instalaciones estratégicas, zonas hídricas claves, entre muchas otras). Uno tendencial en velocidad de expansión y de no protección a los recursos hídricos; otro que supone la misma velocidad de expansión de la ciudad, pero eficaz en la salvaguarda de los recursos hídricos. Incorporamos al modelo un componente aleatorio para considerar el crecimiento urbano irregular.

Se contrastaron los dos escenarios mencionados y se identificaron los principales impactos de cada uno en los recursos hídricos de la ciudad. Se realizó un análisis microespacial, para mostrar el detalle que se puede lograr con nuestro modelo ACC.

Se demostró que contar con un instrumento como el modelo ACC sitúa a los tomadores de decisiones públicas adelante del proceso de expansión urbana: en la cabina de mando, en lugar de ir atrás del crecimiento de la ciudad tratando de corregir fallas muy complicadas y costosas de resolver.

El reto principal no es técnico, es de decisión política y empresarial. La expansión de la ciudad representa un negocio de miles de millones de dólares tan solo en los próximos 14 años. Beneficia a todos conciliar los intereses inmobiliarios con la salvaguarda de los recursos hídricos del AMT. Una ciudad con futuro abre enormes oportunidades de desarrollo social y de negocios. Una ciudad con el futuro comprometido cancela todo.

Nuestro modelo de expansión urbana no sustituye el conocimiento y la intuición de planificadores, desarrolladores inmobiliarios, académicos, ciudadanos: los potencian y empoderan. Facilitan la sinergia que se detona en procesos colectivos de consulta y codiseño de la ciudad.

No obstante, la utilidad actual del modelo para tomar decisiones urbanas públicas y empresariales, requiere mejoras importantes para ser un verdadero Modelo Urbano Centauro: acoplar mejor las inteligencias humana y artificial, la tecnología, bases de datos,

velocidad de cómputo, dar más realismo a las condiciones de la ciudad, potenciar su capacidad de simulación, exploratoria y experimental. Se deben incorporar variables claves de la expansión urbana (e. g. accesibilidad) que permitan estimar una probabilidad de expansión por pixel. El camino es largo. Estamos trabajando.

## Bibliografía

- Aboelnga, H., Ribbe, L., Frechen-Bernd, F. y Saghir, J. (2019). Urban Water Security: Definition and Assessment Framework. *Resources*, 4 (8), pp. 178. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/2079-9276/8/4/178>
- Aburas, M., Ho, Y., Ramli, M. y Ash'aari, Z. (2016). The simulation and prediction of spatio-temporal urban growth trends using cellular automata models: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, pp. 380-389. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.07.007>
- Aguilera, F. (2006). Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 6, pp. 81-112. Recuperado de: <http://geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/90>
- Barredo, J., Kasanko, M., McCormick, N. y Lavalley, C. (2003). Modelling dynamic spatial processes: Simulation or urban future scenarios through cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 3 (64), pp. 145-160. Recuperado de: [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00218-9](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00218-9)
- Barreira-González, P., Gómez-Delgado, M. y Aguilera-Benavente, F. (2015). From raster to vector cellular automata models: A new approach to simulate urban growth with the help of graph theory. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, pp. 119-131. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.07.004>
- Batty, M. (2007). *Cities and complexity: Understanding cities with cellular automata, agent-based models and fractals*. USA: The MIT press.
- Bhatta, B., Saraswati, S. y Bandyopadhyay, D. (2010). Urban sprawl measurement from remote

- sensing data. *Applied Geography*, 4 (30), pp. 731-740. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.02.002>
- Benenson, I. y Torrens, P. (2004). *Geosimulation: Automata-based modelling of urban phenomena*. Hoboken, NJ (USA): John Wiley & Sons.
- Bernardino, L. (2014). *Sistema Lerma: una visión política en la gestión pública del agua*. Toluca, México: Instituto de Administración Pública del Estado de México, A. C. Recuperado de: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-02055419/document>
- Clarke, K. (2018). Land use change modeling with sleuth: Improving calibration with a genetic algorithm. *Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios*, pp. 139-161. Springer Nature Switzerland AG. Recuperado de: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-60801-3\\_8](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-60801-3_8)
- Cabral, P., Augusto, G., Tewolde, M. y Araya, Y. (2013). Entropy in urban systems. *Entropy*, 12 (15), pp. 5223-5236. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/1099-4300/15/12/5223>
- Chávez-Soto, T. y Garrocho, C. (2018). Estación de Inteligencia Territorial: CHRISTALLER®. *GeoSig*, 10(2), pp. 29-50. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/profile/Carlos\\_Garrocho3/publication/324258309\\_CHRISTALLER\\_R\\_ESTACION\\_DE\\_INTELIGENCIA\\_TERRITORIAL/links/5ac77844a6fdcc8bfc7fa187/CHRISTALLER-R-ESTACION-DE-INTELIGENCIA-TERRITORIAL.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Carlos_Garrocho3/publication/324258309_CHRISTALLER_R_ESTACION_DE_INTELIGENCIA_TERRITORIAL/links/5ac77844a6fdcc8bfc7fa187/CHRISTALLER-R-ESTACION-DE-INTELIGENCIA-TERRITORIAL.pdf)
- Chen, Y. (2018). How to Understand Fractals and Fractal Dimension of Urban Morphology. *Physics and Society*, 1, Cornell University, pp. 1-25. Recuperado de: <https://arxiv.org/abs/1809.05810>
- CONABIO. (2009). Áreas Naturales Protegidas Federales de México. Recuperado de: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- \_\_\_\_\_. (2017). Áreas Naturales Protegidas Federales de México. Recuperado de: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Esteller, M., Expósito, J., Díaz-Delgado, C., Paredes, J. y Fonseca, C. (2015). Explotación intensiva del acuífero del Valle de Toluca: análisis de algunos efectos económicos-ambientales. En *Avances en Ciencias del Agua*. México: Universidad Autónoma del Estado de México, pp. 15-31. Recuperado de: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/59122>
- Garrocho, C. (2013). *Dinámica de las ciudades de México en el siglo XXI: cinco vectores clave para el desarrollo sostenible*. México: United Nations Population Fund-CONAPO-El Colegio Mexiquense. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/323399655>
- Glaeser, E. (2011). *Triumph of the city: How urban spaces make us human*. NY: Pan Macmillan.
- Guan, C. y Rowe, P. (2016). Should big cities grow? Scenario-based cellular automata urban growth modeling and policy applications. *Journal of Urban Management*, 2 (5), pp. 65-78. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2226585616300267>
- Hoekstra, A., Buurman, J. y van Ginkel, K. (2018). Urban water security: A review. *Environmental Research Letters*, 5 (13), 053002. Recuperado de: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaba52>
- INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía]. (2016). Cartografía Geoestadística Urbana y Rural Amanzanada. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825218744>
- \_\_\_\_\_. (2018). Red Nacional de Caminos. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463674641>
- Jiménez, E. (2019). Cadenas de Markov Espaciales para simular el crecimiento del Área Metropolitana de Toluca, 2017-2031. *Economía, Sociedad y Territorio*, 60 (XIX), pp. 109-140. Recuperado de: <https://est.cmq.edu.mx/index.php/est/article/view/1324>
- \_\_\_\_\_, Garrocho, C. y Chávez-Soto, T. (2018). Modelando la expansión urbana con Autómatas Celulares: Aplicación de la Estación de Inteligencia Territorial (CHRISTALLER®). *GeoSIG*, 11, pp. 1-26. Recuperado de: [https://docs.wixstatic.com/ugd/79758e\\_5db4574cbd884d7b89e96df748dca7cc.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/79758e_5db4574cbd884d7b89e96df748dca7cc.pdf)
- \_\_\_\_\_. (2020). Autómatas Celulares en Cascada para modelar la expansión urbana con áreas restringidas. *Estudios Demográficos y Urbanos*, COLMEX. En prensa.



- Lin, C., Chen, S., Chen, S., Chen, C. y Tai, C. (2018). Detecting newly grown tree leaves from unmanned-aerial-vehicle images using hyperspectral target detection techniques. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 142, pp. 174-189. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.05.022>
- Lu, K., Allen, J., Luis, G. y Wang, X. (2015). Assessing impacts of urban expansion on coastal ecosystems based in different growth scenarios. *Papers in Applied Geography*, 2 (1), pp. 143-151. Recuperado de: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/23754931.2015.1012431>
- Maithani, S. (2010). Cellular automata based model of urban spatial growth. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 4 (38), pp. 604-610. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12524-010-0053-3>
- Martner, C. (2016). Expansión dispersa, ciudad difusa y transporte: El caso de Querétaro, México. *EURE* (Santiago), 125 (42), pp. 31-60. Recuperado de: [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0250-71612016000100002&script=sci\\_arttext](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0250-71612016000100002&script=sci_arttext)
- Mohan, A. y Khan, N. (2018). Dataset Expansion and Accelerated Computation for Image Classification: A Practical Approach. En International Conference on Advances in Computing and Data Sciences. ICACDS 2018. *Communications in Computer and Information Science*, 906, pp. 43-54, Springer, Singapur. Recuperado de: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-1813-9\\_5](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-1813-9_5)
- Olmedo, M., Paegelow, M., Mas, J. y Escobar, F. (eds.). (2018). *Geomatic approaches for modeling land change scenarios*. Springer-Verlag, Berlin. Recuperado de: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-319-60801-3>
- ONU [Organización de las Naciones Unidas]. (2008). *Green Facts. Facts on Health and the environment*. Recuperado de: <https://www.greenfacts.org/es/recursos-hidricos/>
- Padilla, O., Pérez, P., Cruz, M., Huilcamaigua, S. y Astudillo, S. (2015). Utilización de autómatas celulares como técnica de modelamiento espacial para determinación el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal. *Ciencias Espaciales*, 1 (8), pp. 310-326. Recuperado de: <https://www.lamjol.info/index.php/CE/article/view/2055>
- Rocha-Campos, P., De Almeida, C. y Pereira, A. (2018). Educational infrastructure and its impact on urban land use change in a peri-urban area: a cellular-automata based approach. *Land Use Policy*, 79, pp. 774-788. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026483771830557X>
- Romano, Y. (2018). Mosaico del territorio mexicano del año 2000 y 2018 a partir de imágenes Landsat. En SEDATU-EUROSOCIAL+. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/412978/P2\\_201\\_LAND-SAT\\_2000\\_2018\\_web.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/412978/P2_201_LAND-SAT_2000_2018_web.pdf)
- Rosebrock, A. (2017). ImageNet: VGGNet, ResNet, Inception and Xception with Keras. Recuperado de: <https://www.pyimagesearch.com/2016/11/07/intersection-over-union-iou-for-object-detection/>
- Rutter, E., Lagergren, J. y Flores, K. (2019). Automated Object Tracing for Biomedical Image Segmentation Using a Deep Convolutional Neural Network. International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, Springer-Verlag, Berlín, pp. 686-694. Recuperado de: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-00937-3\\_78](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-00937-3_78)
- Santé, I., Garcia, A., Miranda, D. y Crecente, R. (2010). Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis. *Landscape and Urban Planning*, 96, pp. 108-122. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169204610000472>
- Shen, G. (2002). Fractal dimension and fractal growth of urbanized areas. *International Journal of Geographical Information Science*, 5 (16), pp. 419-437. Recuperado de: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13658810210137013>
- SIRT [Sistema Integral de Riesgos del Municipio de Toluca]. (2016). Cartografía de Toluca. Toluca, México: H. Ayuntamiento de Toluca.
- Sobrino, J., Garrocho, C., Brambila, C., Graizbord, B. y Aguilar, G. (2015). *Sustainable cities: a conceptual and operational proposal*. Panamá: United Nations Population Fund.

- Stewart, I., Kennedy, C. y Facchini, A. (2020). *Measuring progress toward sustainable megacities*. In *Handbook of Megacities and Megacity-Regions*. USA: Edward Elgar Publishing. Recuperado de: <https://www.elgaronline.com/view/edco/9781788972697/9781788972697.00028.xml>
- Torrens, P. (2000). How cellular models of urban systems work. *CASA working series papers*. Centre for Advanced Spatial Analysis (University College London). Recuperado de: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1371/1/paper28.pdf>
- Triantakonstantis, D. y Mountrakis, G. (2012), Urban growth prediction: A review of computational models and human perceptions. *Journal of Geographic Information System*, 4, pp. 555–587. Recuperado de: [https://www.scirp.org/html/8-8401188\\_26323.htm](https://www.scirp.org/html/8-8401188_26323.htm)
- UNESCO [Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura]. (2012). *Glosario Hidrológico Internacional*. Suiza. Recuperado de: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000221862?posInSet=9&queryId=d6982a0-acfb-4356-bdbd-def089c5d7d2>
- Unsworth, K., Forte, A. y Dilworth, R. (2014). Urban informatics: The role of citizen participation in policy making. *Journal of Urban Technology*, 4 (21), pp. 1-5. Recuperado de: <https://doi.org/10.1080/10630732.2014.971527>
- Viera, A. y Garrett, J. (2005). Understanding interobserver agreement: the kappa statistic. *Family Medicine*, 5 (37), pp. 360-363. Recuperado de: [http://www1.cs.columbia.edu/~julia/courses/CS6998/Interrater\\_agreement.Kappa\\_statistic.pdf](http://www1.cs.columbia.edu/~julia/courses/CS6998/Interrater_agreement.Kappa_statistic.pdf)
- Vilchis-Mata, I., Garrocho, C. y Díaz-Delgado, C. (2018). Modelo dinámico adaptativo para la toma de decisiones sostenibles en el ciclo hidrosocial urbano en México. *Revista de Geografía Norte Grande*, 71, pp. 59-90. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022018000300059>
- Wahyudi, A. y Liu, Y. (2016). Cellular automata for urban growth modelling. *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*, 2 (4), 2, pp. 60-75. Recuperado de: [https://doi.org/10.14246/irspsd.4.2\\_60](https://doi.org/10.14246/irspsd.4.2_60)
- Wagner, M. y De Vries, W. (2019). Comparative Review of Methods Supporting Decision-Making in Urban Development and Land Management. *Land*, 8 (8), pp. 123. Recuperado de: <https://doi.org/10.3390/land8080123>
- Warrens, M. (2015). Five ways to look at Cohen's kappa. *Journal of Psychology & Psychotherapy*, 4 (5), pp. 1-4. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.4172/2161-0487.1000197>
- Wolfram, S. (1983). Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of modern physics*, 3 (55), pp. 601- 644. Recuperado de: <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.55.601>
- Wolfram, S. (1994). *Mathematica®: ein System für Mathematik auf dem Computer*. USA: Addison-Wesley.