

Simulación del crecimiento urbano con AMEBA: Modelo Basado en Agentes para la ocupación residencial

Urban Growth Simulation with AMEBA:
Agent-based Model to residential occupation

Carolina Cantergiani 

carolina.cantergiani@tecnalia.com

TECNALIA-Basque Research and Technology Alliance (BRTA) (España)

Montserrat Gómez Delgado 

montserrat.gomez@uah.es

*Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente
Universidad de Alcalá (España)*

Resumen

La utilización de Modelos Basados en Agentes (MBA) abre nuevas posibilidades para simular, entender y analizar los resultados del proceso de crecimiento y ocupación urbana teniendo en cuenta diferentes actores implicados en el mismo. El prototipo AMEBA (*Agent-based Model for the Evolution of urBan Areas*) pretende simular este fenómeno, donde interactúan planificadores, promotores inmobiliarios y la población, a partir del desarrollo de tres submodelos independientes. En el presente trabajo se describe la estructura y funcionamiento del submodelo de ocupación residencial por parte de la población y su integración final con los otros dos submodelos que representan la acción de los demás agentes. Los resultados muestran que es posible desarrollar una arquitectura integrada que permita simular de manera más completa este

Recepción: 10.02.2020

Aceptación: 15.06.2020

Publicación: 15.07.2020

tipo de sistemas complejos y con la suficiente flexibilidad para ser utilizado en distintas áreas de estudio y simular diferentes escenarios de dinámica urbana a futuro.

Palabras clave: simulación del crecimiento urbano; sistemas complejos; modelos basados en agentes; ocupación residencial.

Abstract

The implementation of Agent-Based Models (ABM) opens new possibilities to simulate, understand and analyse the processes derived from urban expansion. The AMEBA prototype (Agent-based Model for the Evolution of urBan Areas) aims to simulate this phenomenon by developing three independent sub-models, where planners, developers and the population interact. This article describes the structure and functioning of the population-driven residential occupation sub-model, as well as its integration with the others. Results show that an integrated architecture can be developed in order to better simulate these types of complex systems, and that it is flexible enough to be applied to alternative study areas and project different urban dynamics scenarios.

Key words: urban growth simulation; complex systems; agent-based models; residential occupation.

1 Introducción

Los cambios territoriales provocados por el proceso de urbanización en el mundo siguen siendo uno de los principales inductores del cambio global de nuestro planeta, especialmente por la vertiginosidad y rapidez de este fenómeno a nivel mundial desde mediados del siglo XX. Estudios recientes señalan que esta dinámica continuará, estimándose que para el año 2030 vivirán en áreas urbanas más de 5 mil millones de personas (UN_HABITAT, 2016; Fang & Yu, 2017), alcanzando tasas de urbanización superiores al 80%, especialmente en el mundo menos desarrollado (Hosseinali et al., 2013; Motieyan & Mesgari, 2018).

Ante esta situación, la preocupación por desarrollar herramientas para estudiar este fenómeno y que puedan servir de apoyo a la planificación de nuevos desarrollos urbanos se ha convertido en uno de los retos más importantes del siglo XXI (Mansury, 2015; Batty, 2016; de Kok et al., 2017). La comunidad científica ha abordado esta problemática considerando el crecimiento urbano como un sistema dinámico y complejo (Torrens & O'Sullivan, 2001), en el que el todo es más que la suma de sus partes y que presenta características como la emergencia, auto-

similaridad, auto-organización y un comportamiento no lineal (Barredo, 2003). En este contexto, y especialmente desde el desarrollo y auge de la computación, se ha desarrollado un nutrido grupo de modelos y técnicas utilizados para realizar simulaciones con el ánimo de analizar el ritmo actual de expansión urbana, pero también para generar imágenes de futuro que podrían servir para evaluar cuál sería el impacto de la toma de determinadas decisiones y que podrían aportar una información muy valiosa como soporte en las tareas de planificación. Entre los más utilizados estarían los modelos basados en autómatas celulares (más del 80 % de los estudios según Triantakou & Mountrakis, 2012), pero también encontramos muchas otras aplicaciones a partir de técnicas de evaluación multicriterio, regresión logística, redes neuronales, etc. (Tayyebi et al., 2011; Hosseinali et al., 2013; Berberoglu et al., 2016).

En los últimos años ha comenzado a proliferar en este campo la utilización de los Modelos Basados en Agentes (MBA), que ya son aplicados con éxito para simular comportamientos relacionados con sistemas complejos en diferentes campos como la sociología, la economía, la ecología, etc. (Grimm & Railsback, 2005; Acosta-Michlik et al., 2014; Filatova, 2015; Tesfatsion et al., 2017; Alves et al., 2019; Hackl & Dubernet, 2019).

Estos modelos presentan ciertas ventajas respecto a otros empleados en el contexto de los sistemas complejos urbanos, ya que permiten incluir agentes y asignarles un determinado perfil y comportamiento, con lo que se podría representar más explícitamente factores políticos y sociales como los niveles de renta, el precio de la vivienda, la segregación social, decisiones políticas, etc. que condicionan el crecimiento urbano (Cantergiani, 2011). Por otro lado, estudiar el sistema a niveles locales permite formalizar las interacciones entre cada uno de sus componentes, construyendo el comportamiento del sistema a un nivel global, característica de auto-organización propia también de estos sistemas complejos (Langlois, 2011). Finalmente existe una componente de incertidumbre inherente a la propia naturaleza de este tipo de sistemas y que define su comportamiento no lineal, incertidumbre que puede venir condicionada por situaciones no previstas producto, precisamente, del comportamiento humano (factores aleatorios o estocásticos) que también contempla este tipo de modelos.

Los MBA, por tanto, pueden incluir la acción de diferentes actores en un mismo modelo. Considerando concretamente el proceso de desarrollo de nuevo suelo urbano residencial y su ocupación, se debería considerar, al menos en el contexto europeo, como mínimo tres tipos de actores de manera conjunta y no tratados parcialmente (Cantergiani & Gómez Delgado, 2016): (I) el planificador o figura administrativa que establece la zonificación legal de ocupación para

distintos usos del suelo (el urbano entre ellos) en un territorio; (II) el promotor inmobiliario (o constructor privado) que será el encargado de ofertar determinados desarrollos residenciales en el territorio considerado como urbanizable y (III) finalmente la población que ocupará esas nuevas zonas residenciales. Por lo tanto, la reproducción más completa del fenómeno combinaría, desde el punto de vista espacial, un proceso de expansión (planificación de nuevas zonas urbanizables), desarrollo de zonas residenciales en ese nuevo suelo urbano (donde actuarían los promotores inmobiliarios o sector privado) y finalmente la ocupación de estas por parte de la población.

El prototipo AMEBA pretende ser una primera aportación en este sentido. Su objetivo es utilizar un modelo que contemple la acción secuencial de estos tres principales actores implicados en este tipo de procesos, que sea lo suficientemente flexible para que pueda ser utilizado en zonas de estudio diversas y que permita, como así lo recomiendan los expertos, hacer más fácilmente comprensible el fenómeno estudiado a partir de una ingeniería modular (Sun et al., 2016). Así, se han desarrollado inicialmente tres submodelos independientes (AMEBA-PLA, AMEBA-PRO y AMEBA-POB) que se integran finalmente en el prototipo AMEBA. Si bien encontramos otros ejemplos en la literatura en los que se combinan diferentes modelos para simular la parte del procedimiento *top-down* y *bottom-up* de este fenómeno (como veremos en el siguiente apartado), la aportación de este prototipo es que ambos procesos se encuentran integrados finalmente en un mismo modelo y plataforma.

Por tanto, el reto presentado en este trabajo se encuentra dentro del campo de la modelación y la simulación de un sistema complejo como el fenómeno de crecimiento y ocupación urbana. Específicamente en este trabajo se pretende, en primer lugar, mostrar y detallar el funcionamiento del tercer submodelo desarrollado para la simulación de la ocupación residencial por parte de la población AMEBA-POB, pues los dos primeros submodelos se encuentran descritos en una publicación previa (Cantergiani & Gómez Delgado, 2018). En segundo lugar, se comprobará la viabilidad de pasar de una arquitectura inicialmente modular (donde los tres submodelos pueden utilizarse de manera independiente) a una arquitectura integrada (AMEBA).

El siguiente apartado está dedicado a la presentación del estado del arte en esta materia, relacionándolo con los objetivos del trabajo. En la sección 3 se describe la metodología, donde además de introducir la estructura del prototipo y el área de estudio elegida para su desarrollo y testado, se describe el submodelo AMEBA-POP y el modelo integrado. En la sección 4 se

presentan los resultados de su implementación, a partir de la simulación de diferentes escenarios. Finalmente, la sección 5 está dedicada a la discusión y conclusiones del trabajo.

2 Estado del arte

Los MBA nacen en el campo de la inteligencia artificial y, como se ha mencionado, presentan ciertas ventajas sobre otros modelos que todavía no han sido suficientemente explotadas y valoradas. Es innegable que el proceso de desarrollo urbano es muy complejo, interviniendo múltiples factores y circunstancias a menudo muy poco “predecibles” y combinándose de manera simultánea procesos de arriba hacia abajo (*top-down*) y de abajo hacia arriba (*bottom-up*) (Hosseinali et al., 2013; Mansury, 2015). Por lo tanto, es necesario utilizar métodos que sean capaces de gestionar ambos tipos de procesos (Ligmann-Zielinska & Jankowski, 2010; Motieyan & Mesgari, 2018) y que permitan simular el resultado de la acción de distintos actores necesariamente involucrados en la evolución de este fenómeno.

Precisamente uno de los principales valores añadidos de los MBA es la posibilidad de utilizar agentes autónomos que son capaces de interactuar con otros, con instituciones y con el medio y reproducir finalmente comportamientos a partir de una serie de reglas básicas y variables externas que pueden influir en dicho comportamiento (Cantergiani, 2011) y que les permiten incluso realizar procesos de aprendizaje y adaptación (Parker et al., 2003). Estos agentes están orientados siempre a conseguir un objetivo, por ejemplo, satisfacer o maximizar una función de utilidad (Magliocca et al., 2011; Groeneveld, et al., 2017; Malik & Abdalla, 2017). Así, los MBA se convierten en interesantes laboratorios donde poder simular las consecuencias del comportamiento individual, así como las derivadas de la interacción de los actores que intervienen en este y otros procesos, y explorar y analizar cómo “emergen” determinados fenómenos del mundo real y explícitamente espaciales como el desarrollo urbano, en función de diferentes circunstancias e interacciones (Matthews et al., 2007; Guo et al., 2017).

Hoy día encontramos ya en la literatura diferentes aplicaciones con este tipo de modelos en el entorno urbano como el estudio de la movilidad y la dinámica residencial, el tráfico urbano, la propagación de epidemias, problemas de segregación y formación de hábitats informales, los efectos de los procesos de gentrificación, las causas y efectos de las burbujas inmobiliarias, situaciones de emergencia y evacuación por desastres naturales, etc. (Feitosa et al., 2011; Barros, 2012; Jordan et al., 2012; Torrens, 2012; Pumain & Sanders, 2013; Crooks et al., 2014; Ge, 2017; Malik & Abdalla, 2017; Hackl & Dubernet, 2019; Yang et al., 2019).

En el campo que nos ocupa, encontramos ejemplos en los que se ha abordado parcialmente el proceso mencionado, emulando a otros modelos explícitamente espaciales extensamente utilizados ya en este campo como los autómatas celulares. Y decimos parcialmente porque están centrados exclusivamente en la localización y desarrollo de nuevas zonas urbanas, teniendo en cuenta diversos aspectos e impactos, o explorando y analizando el comportamiento social racional en este tipo de procesos (Hosseinali et al., 2013; Long & Zhan, 2015; Tan et al., 2015; Ghavami et al., 2016; Zhuge et al., 2016).

Atendiendo al tipo de arquitectura utilizada para desarrollar estos modelos, esa combinación necesaria de procesos de *top-down* y *bottom-up* para reproducir sistemas complejos como los urbanos, ha propiciado desde el principio la aparición de estructuras en las que se combinaban modelos de distinto tipo y que funcionan habitualmente de forma independiente (Parker et al., 2003). Así, Ligmann-Zielinska & Jankowski (2010) utilizan un modelo basado en técnicas de Evaluación Multicriterio para establecer zonas que deberían quedar excluidas de la urbanización y otro basado en agentes que simula la acción de promotores inmobiliarios dispuestos a construir en las zonas sí permitidas para nuevos desarrollos urbanos.

Otros trabajos más elaborados como el de Mustafa y otros (2017), desarrollan un modelo híbrido, en el que el nuevo suelo urbano se determina a partir de una combinación de regresión logística y autómatas celulares, al que se añade un MBA con el que finalmente se concreta qué nuevas zonas urbanas se desarrollarán en la región valona de Bélgica, en función del comportamiento de los agricultores de la zona y el interés de los desarrolladores. En el trabajo de Tan y otros (2015) se presenta un modelo parecido (también híbrido), en el que interactúan (basándose en la teoría de juegos) propietarios de suelo, desarrolladores y el gobierno.

Por otro lado, encontramos en la literatura trabajos centrados en la preocupación e intento de comprender cómo emergen determinadas características de la ocupación urbana (por ejemplo, problemas de segregación) y la configuración espacial resultante de la misma (relación entre renta y *sprawl*, patrones de asentamiento de estudiantes universitarios), simulando exclusivamente el comportamiento de la ocupación de las viviendas por parte de la población (Feitosa et al., 2011; Jordan, et al., 2012; Guo et al., 2017; Malik & Abdalla, 2017), por lo que resultan también aproximaciones parciales al fenómeno que aquí pretendemos abarcar.

El trabajo de Alghais & Pullar (2018) resultaría más completo, incluyendo al gobierno de Kuwait como autoridad para crear nuevas áreas urbanas, el sector privado como constructor de casas y los ciudadanos que ocupan esas residencias. Sin embargo, a diferencia del prototipo que aquí

presentamos, se trata de un modelo compacto y cerrado, en el que no se puede simular distintos comportamientos de forma individualizada para cada agente, estando además supeditadas muchas decisiones a lo ocurrido en el pasado (incremento de nuevas áreas urbanas, capacidad media de ocupación por hectárea urbanizada o inclusive el número de viviendas), no pudiendo reproducir escenarios distintos a esa situación.

Con estos antecedentes, nos planteamos el reto de avanzar un paso más en determinados aspectos respecto a estos trabajos, por un lado diseñando un MBA para la ocupación residencial por parte de la población con propuestas más flexibles para diseñar el perfil de cada agente.

Por otro, se realiza una primera propuesta de arquitectura integrada que, si bien utiliza modelos diferentes como en otros estudios, agrupa los procesos *top-down* y *bottom-up* representados por planificadores, promotores inmobiliarios y población en un solo prototipo y modelo, lo que aportaría una mayor funcionalidad en tareas de planificación, al incluir a los actores principalmente implicados en estos procesos. Además, se ha contemplado en todo momento dotar de la máxima flexibilidad al prototipo, permitiendo que determinados parámetros puedan ser modificados por el usuario en cada ejecución, lo que podría permitir adaptarlo a diferentes contextos y espacios urbanos y simular distintos escenarios de futuro.

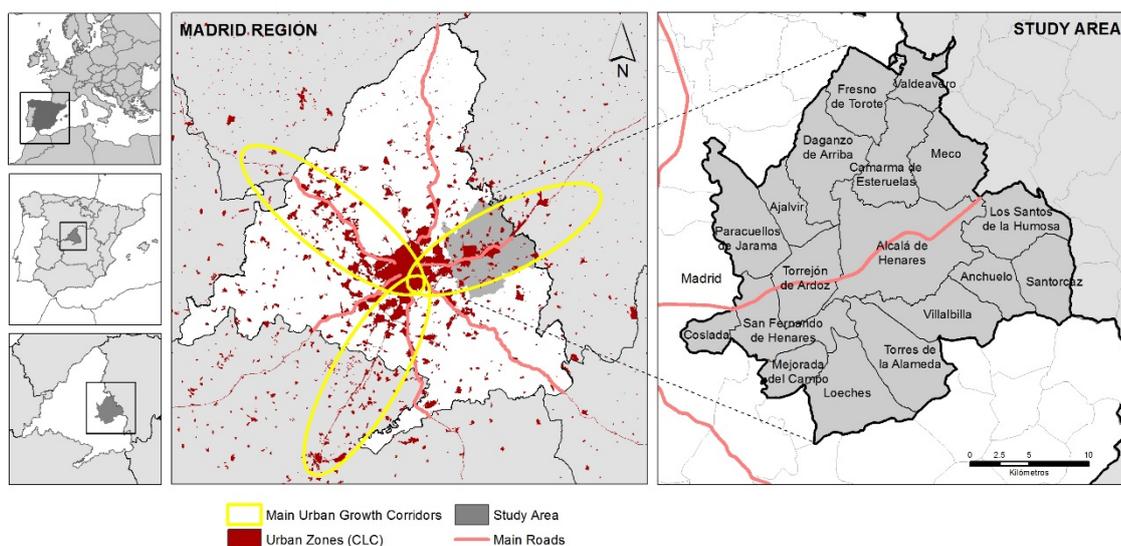
3 Metodología

3.1 Área de estudio y estructura del prototipo AMEBA

El área de estudio seleccionada para desarrollar y verificar el prototipo AMEBA es una sección del Corredor urbano-industrial del Henares, compuesta por 18 municipios que aglutinan algo más de 600 000 habitantes (INE, 2019) en una extensión de 624 km² (Figura 1). Esta sección forma parte de la Comunidad Autónoma de Madrid, aunque el corredor se extiende actualmente hasta la provincia de Guadalajara, ya en la Comunidad de Castilla-La Mancha. Se trata de una de las áreas más dinámicas de expansión urbana en España y Europa (Plata-Rocha et al., 2011; Gallardo & Martínez Vega, 2016), reproduciéndose el mismo caótico y rápido crecimiento experimentado en otras muchas zonas de España durante la burbuja inmobiliaria (1997–2007), a la que ha seguido un período de estabilidad y consolidación. Se trata de un área muy influenciada por su proximidad a la capital del Estado (Madrid), particularmente dinámica en términos demográficos y de expansión urbana, pero con diferencias internas sociodemográficas y de desarrollo lo suficientemente importantes para considerarla como un perfecto laboratorio de ensayo para la aplicación de este tipo de modelos.

Así, a día de hoy todavía existen municipios con un importante componente rural y escaso desarrollo urbano, presentando una diversidad socioeconómica importante y unas relaciones económicas, de movilidad, etc., muy intensas y arraigadas (Cantergiani & Gómez Delgado, 2016). Esta aplicación a escala supramunicipal resultaría por tanto idónea para simular los posibles impactos de la dinámica urbana, más aún en una región en la que existe un vacío en cuanto a planes de ordenación territorial a esta escala intermedia e inclusive a escala regional (tan solo se encuentran aprobadas unas bases que datan de 1996, Valenzuela Rubio, 2010).

Figura 1. Área de estudio (Corredor del Henares, Madrid)



Fuente: adaptado de Cantergiani & Gómez Delgado (2016)

La base conceptual de AMEBA es la reproducción de las tres fases en las que hemos considerado se divide habitualmente el proceso de desarrollo de suelo urbano residencial y su ocupación a escala supramunicipal. De manera resumida, por tanto, este proceso comenzaría con la identificación de nuevas y potenciales áreas urbanas por parte de los planificadores urbanos, siguiendo las políticas nacionales, regionales y locales (submodelo AMEBA-PLA). Una vez identificadas y asignadas espacialmente, los promotores inmobiliarios serían los encargados de desarrollar nuevas zonas residenciales de distinto tipo en función de sus intereses de empresa (AMEBA-PRO) y, finalmente, la población ocuparía esas nuevas viviendas en función de sus preferencias individuales y de acuerdo a su poder adquisitivo (AMEBA-POB).

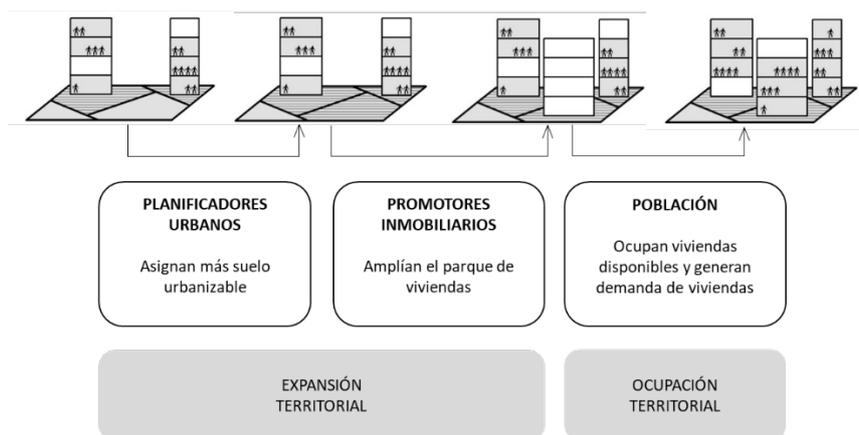
Como hemos mencionado, los dos primeros submodelos se encuentran descritos en un trabajo anterior (Cantergiani & Gómez Delgado, 2018). De manera resumida podemos decir que, en el caso del primer submodelo, la selección de nuevas áreas urbanas se realiza en función de una

serie de restricciones físicas, indicadores de productividad agrícola y elementos de atracción/repulsión, casi todos medidos en términos de distancia a elementos de interés (carreteras, áreas urbanas consolidadas, equipamientos educativos, instalaciones no deseables, etc.). La ejecución del modelo es muy flexible, pudiendo modificarse varios parámetros de partida en función del perfil elegido para el planificador.

En el caso del segundo submodelo, se parte de la disponibilidad de suelo establecida por los planificadores y, en función del perfil de promotor seleccionado, podrán utilizarse diferentes factores de interés/atracción como distancia a transporte público o principales carreteras, proximidad a determinadas promociones ya existentes en función del segmento de demanda elegido para el desarrollo de las nuevas zonas residenciales (alto, medio o bajo estándar), etc.

Por lo tanto, desde el punto de vista de la simulación/modelación, se identifican tres procesos de diferente rango conceptual. Por un lado, el primero estaría representando un proceso determinístico del tipo *top-down*, mientras que el segundo podría considerarse una transición entre un procedimiento típicamente determinístico y otro puramente estocástico. Finalmente, el proceso de ocupación por parte de la población que se describe en el siguiente apartado sería considerado el proceso más cercano al tipo *bottom-up*, para cuya reproducción los MBA son considerados más adecuados, representando de manera estocástica y explícita interacciones complejas entre los distintos agentes (Figura 2).

Figura 2. Modelo integrado de simulación de crecimiento urbano



Fuente: adaptado de Cantergiani & Gómez Delgado (2018)

La integración final de los tres submodelos pretende permitir un mínimo de interacción entre los distintos actores que, al tener en origen una configuración tan flexible y abierta y ser posible la retroalimentación entre los mismos, facilitará la simulación de diferentes escenarios por el

usuario, de tal forma que se podría plantear, por ejemplo, que los promotores inmobiliarios vean reducidas sus expectativas por un planteamiento restrictivo de disponibilidad de suelo por parte de la Administración (planificadores urbanos), o que la demanda de vivienda por parte de la población de más renta promueva la liberación de suelo por parte de los planificadores, entre otras posibilidades.

3.2 AMEBA-POP: Submodelo (3) de ocupación por parte de la población de las nuevas zonas residenciales

Sabemos que la toma de decisiones humanas ejerce un papel fundamental en cualquier proceso de dinámica urbana, y a la vez es extremadamente complejo (Bonabeau, 2002). El comportamiento es difícil de replicar, pues la conducta humana no suele ser objetiva, y está determinada por la cultura, actitudes, emociones, valores (entre otros factores no lineales), ni fácilmente predecibles en un determinado contexto social (Souza, 2005). Los estudios sobre cómo la comunidad afecta al comportamiento de un agente, se encuentran en un término medio entre la psicología y la sociología (Psicología Social). En este trabajo se ha pretendido vincular el comportamiento de la población con los estudios derivados de la psicología social, ya que los futuros residentes actúan en relación con su entorno y en función de estímulos externos (Valera & Pol, 1994; Taberner et al., 2015).

AMEBA-POB es el que podemos considerar genuinamente un MBA. El actor *población* es un agente comúnmente utilizado en MBA aplicado a cuestiones urbanas, por contar siempre con un comportamiento humano asociado y relacionado con un fenómeno emergente, en este caso la ocupación de viviendas. A diferencia de los otros dos submodelos, en este los agentes interactúan entre ellos y con el entorno cambiando su comportamiento acorde a nuevas situaciones, características clave de un agente. Como apunta J. Barros (2012), los MBA se basan en el entendimiento de que la toma de decisiones humanas ejerce un papel fundamental en los procesos y cambios urbanos.

La forma en la que es tratado y agrupado este agente en los distintos estudios es diversa en función del contexto y objetivo del modelo. Así podemos encontrar modelos en los que representan hogares (Fontaine & Rounsevell, 2009; Barros, 2012; Dahal & Chow, 2014), individuos (Zhuge et al., 2016; Alghais & Pullar, 2018; Malik & Abdalla, 2017), grupos de ciudadanos, grupos étnicos, vecindarios, consumidores (Magliocca et al., 2011; Alghais & Pullar, 2018; Motieyan & Mesgari, 2018), etc. A su vez, pueden diferenciarse distintos tipos de comportamiento en función de la estructura familiar (casado, con hijos, soltero). En el caso de

esta investigación, se entiende por población aquella unidad que representa un conjunto de personas que comparten vivienda, que conceptualmente se asemejaría a lo que se identifica formalmente como hogar. Con este tipo de agrupación más reducida, los agentes pueden tener un comportamiento más activo, desenvolviéndose más libremente por el entorno y permitiendo interacciones más complicadas y heterogéneas (Alghais & Pullar, 2018).

La ocupación de viviendas es un proceso natural y continuo que puede ocurrir con menor o mayor intensidad dependiendo de varios condicionantes, tales como el momento económico, las costumbres culturales de la población, la oferta de viviendas, entre otros. En el submodelo que se presenta, este proceso está motivado por una serie de fuerzas motrices definidas en el arranque del proceso. Recordamos que se trata de un MBA explícitamente espacial, por lo que esta búsqueda de nueva vivienda se basa siempre en unos criterios distribuidos espacialmente. En este modelo se ha establecido una base económica para reproducir la diferencia de comportamiento entre unos agentes y otros. Así, las preferencias o fuerzas motrices varían según el nivel de renta de la población, estableciéndose tres tipos de agentes que actúan según su poder adquisitivo sea alto, medio o bajo, criterio utilizado habitualmente en otros trabajos (Hosseinali et al., 2013).

Los diferentes tipos de agentes interactúan entre ellos y con el entorno, cambiando su comportamiento acorde a las nuevas situaciones que van emergiendo. A continuación, describiremos los atributos asociados a estos agentes y al entorno (sección 2.2.1) que condicionarán el comportamiento del agente población y que permitirán crear diferentes perfiles y plantear distintos escenarios. En la sección 2.2.2 se describen las reglas de decisión con las que materializar dicho comportamiento y que conducirá a la ocupación final (o no) por parte de la población de una nueva vivienda. Ambos atributos y reglas de decisión representan la arquitectura del modelo y han sido ideados y diseñados íntegramente por las autoras del trabajo.

a) Atributos asociados a los agentes y al entorno. Datos de partida

Los agentes están caracterizados por cinco atributos que se combinan para producir el cambio de residencia: poder adquisitivo, situación, nivel de satisfacción, estado y capacidad de insistencia.

1. *Poder adquisitivo* (alto, medio, bajo): se define automáticamente en el inicio de la simulación, en función de la tipología de la edificación donde estén asentados (alto, medio y bajo estándar). Este atributo experimenta una variación inicial aleatoria (en función de un porcentaje definido por el usuario en la interfaz) con el objetivo de acercarlo a una

representación más acorde a la realidad, intentando reproducir posibles cambios de estatus de la población por mejoría en calidad de vida, situaciones de inestabilidad económica familiar, cambio de estilo de vida, etc. Este cambio se permite de renta media a renta alta o baja y de renta baja a media, pero nunca de baja a alta o de alta a baja, por tratarse de cambios muy excepcionales.

2. *Situación* (asentado o no asentado): indica si el agente está actualmente ubicado (asentado) en alguna vivienda o no. Esta última opción intenta reproducir procesos de crecimiento de población por migración o cambio de ciclo de vida, y representa el estado transitorio previo a la búsqueda de viviendas.
3. *Nivel de satisfacción* (satisfecho o insatisfecho): estando todas las edificaciones tipificadas en alto, medio y bajo estándar, se considera que un agente está satisfecho si la misma coincide con su poder adquisitivo. Si no es así y se trata de un agente activo (siguiente atributo), procederá a buscar una vivienda más acorde con su estatus económico.
4. *Estado* (activo o pasivo): los agentes activos se encuentran en estado de búsqueda de vivienda, mientras que los pasivos se mantienen estables y sin reacción. Estos últimos pueden ser “expulsados” de sus viviendas habituales por un agente activo y de poder adquisitivo mayor, intentando simular cierta movilidad por interés económico (venderían su vivienda a otro agente). En un primer momento se define una distribución homogénea y aleatoria de ambos tipos, para luego cambiar según sea expulsado (se convertiría en activo) o se asiente en una vivienda (se convertiría en pasivo). El objetivo de este atributo es diferenciar aquellos que están insatisfechos con su vivienda actual por causas diversas (no adecuadas a su clase socioeconómica), pero que aun así se quedan dónde están (por comodidad, falta de recursos u otros), de aquellos que buscan mejores condiciones residenciales (en función de los elementos de atracción que se definirán más adelante). De esta forma el modelo permite simular, no sólo procesos de expansión urbana ocupando las nuevas zonas residenciales creadas por planificadores y promotores, sino también otros de renovación urbana, posibles procesos de gentrificación, etc.
5. *Capacidad de insistencia*: hace alusión al número de ejecuciones con intento de cambio de residencia fallido permitido para cada agente en su búsqueda de nueva residencia. Pasado este umbral, el agente se adapta a su entorno. Este atributo es definido inicialmente por el usuario en la interfaz, pudiendo elegir entre un mínimo de 1 y un máximo de 10 intentos.

Excepto el último, todos los atributos cambian y evolucionan en cada ejecución del modelo, variando en función de lo que la población vaya seleccionando. A continuación, presentamos las diferentes combinaciones que puede asumir el agente a lo largo de la simulación en su relación con otros agentes o con el medio (tabla 1). Las referencias a cada uno se indicarán más adelante, con la introducción del diagrama de flujo correspondiente a sus acciones (figura 3).

Tabla 1. Combinaciones de atributos que puede experimentar un agente a lo largo de la simulación, generando diferentes estados

	CAMBIOS REFERENTES A LA CONFIGURACIÓN INICIAL			ALTERACIONES A LO LARGO DE LA SIMULACIÓN		
	Estado A	Estado B	Estado C	Estado D	Estado E	Estado F
Fase del modelo en el que se puede producir cada estado	Inicio	Tras cambio de % de tipología (renta alta, media o baja)	Tras asignación del crecimiento de población	Al ocupar nueva vivienda	Al ser expulsado de su vivienda	Al quedarse en su vivienda tras buscar varias veces y no encontrar (adaptación al entorno)
Momento en el que se establece	En la configuración inicial	En la interfaz	En la interfaz	Durante la ejecución del modelo	Durante la ejecución del modelo	Durante la ejecución del modelo
Tipología de la población (renta alta, media o baja)	Correspondiente a la tipología de vivienda donde está ubicada	Cambio siguiendo la siguiente regla: alto hacia medio; medio hacia alto o bajo aleatorio; bajo hacia medio	aleatoria	Se mantiene la misma	Se mantiene la misma	Correspondiente a la tipología de vivienda donde se encuentra ubicado
Situación (asentado)	sí	sí	no	sí	no	sí
Satisfecho con su situación	sí	no	no	sí	no	sí
Estado	aleatorio (50%)	Se mantiene la misma situación	activo	activo	activo	pasivo
Insistencia	En la interfaz	Se mantiene el mismo nivel	Se mantiene el mismo nivel	Se mantiene el mismo nivel	Se mantiene el mismo nivel	Se mantiene el mismo nivel
Resistencia	0	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia

En cuanto a los atributos asociados al entorno sobre el que se mueven y desarrollan los agentes y que, por tanto, influyen de una u otra manera en el comportamiento de los mismos, se ha establecido un total de cinco:

1. *Volumen de población*: que puede ser incrementado por el usuario en la interfaz
2. *Número de viviendas disponibles*

3. *Nivel de ocupación* en términos de población asentada por edificación
4. *Capacidad máxima de población* (por píxel). Este último es la media de población por unidad edificada extraída para cada sección censal y tomando como referencia los datos del catastro. Cada unidad edificada se corresponde espacialmente con un píxel
5. *Criterios de preferencia espacial* para la selección por parte de la población de las nuevas viviendas. Estas preferencias están calculadas en función de la distancia a elementos territoriales de interés para cada uno de los grupos de renta como vías de comunicación, paradas de transporte público, equipamientos sanitarios y educativos o proximidad a los distintos estándares de viviendas

Los cuatro primeros atributos son fijados inicialmente, cambiando su configuración a lo largo de la ejecución de la simulación. Los criterios de preferencia espacial se mantienen estáticos a lo largo de todo el proceso. Los datos de partida para generar todos estos atributos han sido tratados en un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS) y se encuentran distribuidos espacialmente a nivel de píxel (50x50m). La descripción y fuente de los mismos aparece detallada en la siguiente tabla (Tabla 2).

Tabla 2. Descripción y fuente de los distintos atributos incluidos en el AMEBA-POB

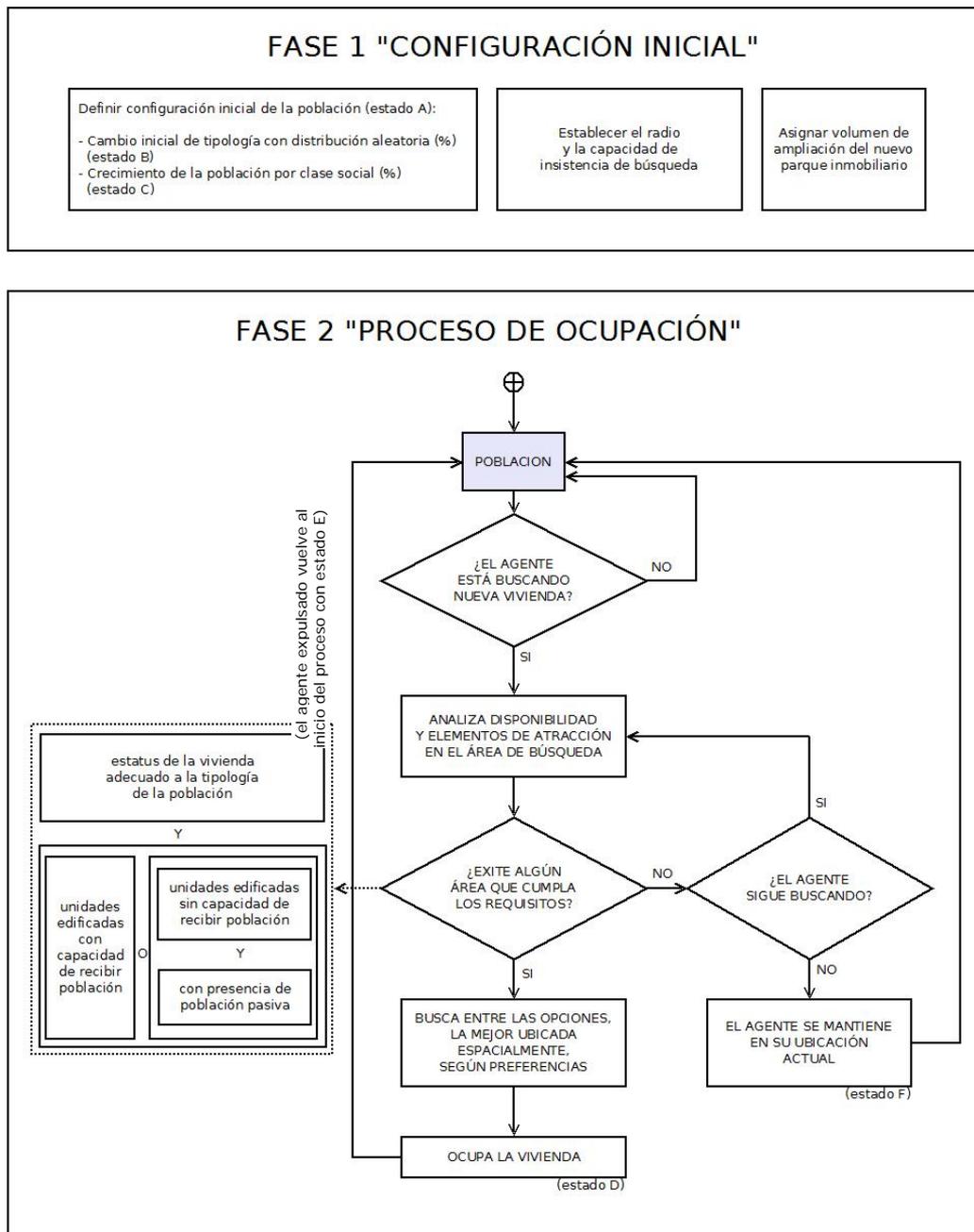
DATOS/VARIABLES	ESCALA	FUENTE	ATRIBUTO DE AGENTE O DEL MEDIO DERIVADO
Censo de población y estadísticas asociadas	1:1000	INE (2001)	Distancia a zonas urbanas consolidadas, distribución de la población
Equipamientos urbanos (salud y educación, transporte público, instalaciones no deseables)	1:25 000	NomeCalles (Instituto Estadístico de la Comunidad Autónoma de Madrid, 2005)	Distancia a cada tipo de equipamiento/instalación
Datos del catastro con información a nivel de parcela (código, municipio, uso, año de construcción, etc.)	1:1000	Dirección General del Catastro (Ministerio de Hacienda, 2006)	Datos agregados por píxel representando la distribución inicial de viviendas y tipología
Red Nacional y Regional de carreteras	1:25 000	BCN 25/CNIG, IGN (2008)	Distancia a carreteras y principales nodos de comunicación

Fuente: elaboración propia

b) Estructura del modelo, reglas de decisión y ejecución

Mediante el siguiente diagrama de flujo (Figura 3) se presentan, de forma sintética y secuencial, las reglas de decisión que materializarían las distintas acciones llevadas a cabo por la población, incluyendo los requisitos necesarios para determinar la primera fase o configuración inicial del modelo. Esta figura se complementa con la Tabla 1, en la que se describe las características de cada estado (a, b, c, d, e, f) que aquí aparecen ubicadas en su correspondiente fase.

Figura 3. Diagrama de flujo que describe la secuencia de acciones por parte de la población, en función de sus atributos y las características del entorno



Fuente: elaboración propia

Para comenzar la ejecución del modelo, el usuario establece la configuración inicial de atributos asociados, tanto a los agentes, como al entorno (Fase 1 en Figura 3), cuyos límites de variación (mínimos y máximos) están prefijados, y entre los cuales el usuario podrá realizar su selección a partir de unas barras deslizantes. Al igual que en los otros dos submodelos, se dota de esta forma de una gran flexibilidad y adaptabilidad al prototipo que se pretenda desarrollar, pudiendo simular evoluciones del fenómeno de crecimiento y ocupación urbana con muy diferentes situaciones de partida y fácilmente adaptable a otras zonas de estudio. Así, el usuario tendrá que tomar una serie de decisiones que afectan a los siguientes parámetros:

- El volumen de crecimiento de la población que se contemplará en la simulación. Actualmente se puede fijar un porcentaje de crecimiento que oscila entre el 0 y el 10 %, tomando como referencia los máximos niveles de incremento que se han producido en la zona de estudio. Sin embargo, estos parámetros son fácilmente modificables en el prototipo para adaptarlos a otras circunstancias.
- El porcentaje máximo (sobre el total fijado en el punto anterior) que se incrementará por tipología de población (renta baja, media o alta).
- La proporción de población que cambiará aleatoriamente de estatus económico, con el objetivo de reproducir una situación más realista en la que una parte de la población se encuentra insatisfecha con su vivienda actual porque no se corresponde con su estatus. Esta variación sólo se puede aplicar hasta un máximo del 15 % de la población. Recordamos que estos cambios son limitados, no permitiéndose aquellos que en la realidad serían muy excepcionales (por ejemplo, pasar de renta baja a alta o viceversa).
- Al tratarse de un modelo explícitamente espacial, se establece un radio de búsqueda máximo que cada agente puede explorar para buscar una nueva vivienda. Este parámetro es también muy fácilmente modificable en el prototipo para adaptarlo a otras zonas de estudio.
- La capacidad de insistencia o el número máximo de veces que un agente va a emprender la búsqueda de nueva vivienda después de un intento fallido se puede establecer entre 1 y 10.
- Como la construcción de AMEBA ha sido configurada a partir de tres submodelos independientes, existe la posibilidad de cargar el resultado del submodelo de construcción de nueva vivienda por parte de los promotores inmobiliarios, o que el usuario establezca directamente un volumen de incremento entre el 0 y el 50 % respecto a la situación inicial, si es que se pretende ejecutar sólo este submodelo.

Por otro lado, el usuario también puede establecer un cierto nivel de complejidad de la ejecución, simulando si se permite o no la "expulsión" de residentes. También se pueden prefijar las condiciones en las que se producirá la finalización de la ejecución del modelo, en

función de: que ya no haya viviendas libres, que no haya población por recolocar, o que haya un volumen importante de personas que hayan tenido que irse del área de estudio por no encontrar viviendas adaptadas a sus necesidades/posibilidades.

Una vez establecida la configuración inicial, comenzaría la Fase 2 o proceso de ocupación residencial propiamente dicho. Así, la población no satisfecha y en estado activo (Figura 3 a), elegirá un punto aleatorio en el área de estudio (Figura 3b) y verificará que dentro de su área de influencia (definida por el usuario en la Fase 1) haya alguna residencia que cumpla con los criterios relacionados con su grupo de poder adquisitivo y con disponibilidad para ser ocupada, es decir, vacía o habitada por población en estado pasivo (Figura 3c). El proceso se repite hasta que se encuentre vivienda disponible o se alcance el máximo número de repeticiones permitidas (Figura 3d). Si se encuentra vivienda disponible, se procederá a comprobar que ésta cumple los requisitos establecidos para cada grupo de población (figura 3 e). Esta decisión estará vinculada a una función de utilidad como en otros estudios similares (Zhuge et al., 2016; Sun et al., 2016; Alghais & Pullar, 2018; Motieyan & Mesgari, 2018), calculada a partir de la siguiente fórmula, donde la preferencia (P) de una tipología de población (t) es la suma de los valores de las variables (V) consideradas. A todas ellas se les puede otorgar un peso (p) que exprese la importancia de cada una en el proceso de selección final:

$$P_t = ((p_{1t} * V_1) + (p_{2t} * V_2) + (p_{3t} * V_3) + \dots + (p_{nt} * V_n))$$

La fórmula se alimenta de valores definidos según los criterios de preferencia de los distintos agentes, considerando su interés por ubicarse a mayor o menor distancia de algunos de los elementos espaciales definidos, dinámica que podemos ver utilizada también en estudios similares (Alghais & Pullar, 2018; Mustafa et al., 2017). Como ejemplo, se estableció la siguiente ponderación en función de las características de cada grupo de población (Tabla 3):

El proceso culmina con la ocupación de viviendas por parte de la población obedeciendo a las preferencias y criterios indicados, pero nótese que la ocupación puede producirse sobre viviendas vacías o en viviendas que están ocupadas por población en estado pasivo y que, una vez es expulsada, vuelve al sistema en busca de una nueva residencia; por lo tanto, el siguiente paso consistirá en una actualización del estado de ocupación y características de las zonas residenciales (Figura 3f).

Tabla 3. Ponderación de los distintos criterios de preferencia espacial de localización residencial para cada grupo poblacional

CRITERIO ESPACIAL	RENTA ALTA	RENTA MEDIA	RENTA BAJA
Proximidad a vías de comunicación	6	0	0
Proximidad a estaciones de transporte público	0	3,5	3,5
Proximidad a hospitales	0	2	3
Proximidad a centros universitarios	1	2	0
Proximidad a viviendas de estándar alto	2,5	0,5	0
Proximidad a viviendas de estándar medio	0,5	1,5	0,5
Proximidad a viviendas de estándar bajo	0	0,5	3
Suma	10	10	10

Fuente: elaboración propia

3.3 Integración de los distintos submodelos del prototipo AMEBA

La primera cuestión a resolver para realizar esta integración partiendo de tres submodelos independientes es la dinámica temporal. La materialización en el tiempo de los tres procesos que venimos comentando se produce en lapsos temporales muy diferentes, variando mucho los tiempos de acción y reacción entre un actor y otro, por lo que resultaría inapropiado definir un intervalo de tiempo común para todos. Así, si bien podría esperarse que el modelo final integrara los tres submodelos de forma que se ejecutasen simultáneamente, la realidad es que la población puede decidir cambiarse de vivienda en un intervalo temporal más corto del que transcurre para ampliar el parque residencial, y más todavía si consideramos el período en el que habitualmente se realiza la revisión de los Planes Generales de Ordenación Urbana (PGOU).

Con el objetivo de considerar estas diferencias temporales, se estableció que cada ejecución del submodelo de población equivaldría a un lapso temporal (tiempo-base) de cuatro meses. Sin embargo, para los promotores inmobiliarios no sería realista considerar la actualización de construcción de nuevas viviendas en un intervalo tan corto. Por lo tanto, partimos del supuesto de que nuevas zonas residenciales se incorporan al modelo a cada tres unidades de tiempo-base, es decir, cada año. Por último, aunque según la normativa española se debería realizar la revisión formal de un PGOU aproximadamente cada diez años, es muy habitual elaborar modificaciones parciales puntuales alargando la vida del mismo, por lo que se ha considerado un intervalo de tiempo de ejecución para los planificadores cinco veces más extenso que la construcción de nuevas viviendas y quince veces mayor que el de la población, es decir, de cinco años.

Según el esquema presentado se entiende que, a cada determinado intervalo, los modelos pueden coincidir en actualización. En este sentido, se hizo necesario definir en qué momento el modelo debería considerar la intervención de uno u otro actor. El funcionamiento del AMEBA parte de una situación base de referencia, con un determinado plan de ordenación vigente y distribución de áreas urbanizables; una determinada distribución de viviendas ocupadas y libres; y una determinada distribución inicial de la población (a en la Figura 4).

Figura 4. Representación esquemática del flujo y ejecución continuada de los tres submodelos en AMEBA y por ciclos. SM1 sería el submodelo AMEBA-PLA; SM2 el submodelo AMEBA-PRO y SM3 AMEBA-POB

(a) Situación de partida



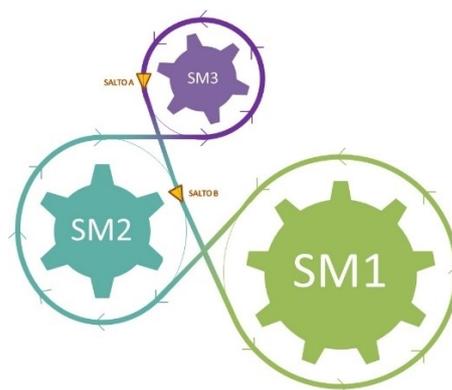
(b) Ciclo 1



(c) Ciclo 2



(d) Ciclo 3



Fuente: elaboración propia

Sobre esta base inicial puede actuar cualquier actor, cuya orden depende de la configuración actual y de las necesidades planteadas por el usuario mediante el establecimiento de las condiciones iniciales. Al modelo se han incorporado algunos condicionantes identificados aquí como "Saltos", que cuando se activan inducen a un inminente cambio. Por ejemplo, la

ejecución continuada del submodelo de población sólo se interrumpe (produciéndose el “Salto A” en Figura 4b) en el caso de que se cumpla:

- Que haya menos de un porcentaje “x” de viviendas disponibles
- Que la población en búsqueda activa supere un porcentaje “x” del total
- Que se ejecute el SM3 un total de “x” veces consecutivas

Activado el “Salto A”, arranca automáticamente AMEBA-PRO, permitiendo a los promotores inmobiliarios crear nuevas edificaciones residenciales (c en la Figura 4). Naturalmente, como resultado se incorporan nuevas viviendas libres al modelo, por lo que volvería a actuar la población (ciclo 1), esta vez considerando la distribución de nuevas viviendas. AMEBA-POB se ejecuta repetidamente hasta que se cumplan de nuevo las condiciones que activan el “Salto A” y vuelva a ejecutarse AMEBA-PRO, y así sucesivamente.

Cada vez que se activa AMEBA-PRO en el ciclo mencionado, el modelo realiza una consulta para confirmar si se cumple algún criterio que activaría el “Salto B”, lo que llevaría a la ejecución del AMEBA-PLA, esto es, a una revisión del PGOU (d en la Figura 8). En este caso, el “Salto B” se daría según las siguientes condiciones en este ensayo realizado para la integración, pero recordamos que se podrían modificar y adaptar fácilmente a otras situaciones y áreas de estudio:

- Que el área urbanizable sin edificar sea inferior a un “x%” del total de áreas urbanizables
- Que se ejecute el SM2 un total de “x” veces consecutivas

4 Resultados

4.1 Submodelo AMEBA-POB

Para comprobar el correcto desarrollo y funcionamiento de este submodelo, que la arquitectura diseñada cumple con el objetivo propuesto y que es computacionalmente asequible, se ha procedido a realizar un proceso de verificación a partir de la configuración y simulación de distintos escenarios futuros de expansión y ocupación urbana.

En el caso de los dos primeros submodelos, al ser de tipo determinístico, fueron validados siguiendo las prácticas habituales en otros estudios (Alghais & Pullar, 2018; Mustafa et al., 2017), ya que sus resultados espaciales pueden ser comparados con la realidad, al haber utilizado datos de un pasado relativamente cercano (ver Tabla 2). Sin embargo, el resultado de este tercer submodelo, como ocurre habitualmente en los MBA, es mucho más complicado de

validar; en primer lugar, porque estamos simulando comportamientos que van emergiendo en función de las condiciones de partida configuradas en el momento de la ejecución, implicando cuestiones abstractas como el aprendizaje o las reacciones a ciertos estímulos que son difíciles de medir (Parker et al., 2003). En segundo lugar, no es posible contrastar los resultados de ocupación de viviendas con datos reales a este nivel de detalle, que nos informen sobre la distribución concreta de la población y en función del nivel económico de la misma.

Entre las numerosas posibilidades que ofrece la flexibilidad del modelo, se simularon tres escenarios o situaciones extremas e intermedias que permitieran comprobar, a partir de la diferencia entre los resultados, el correcto funcionamiento del mismo:

1. Uno de los escenarios extremos se correspondería con una situación de *boom demográfico* y de especulación en el mercado de la vivienda por lo que se registraría una demanda elevada de la misma. En este caso, consideramos que las condiciones impuestas para la búsqueda de nueva residencia son más flexibles, estableciendo un radio de búsqueda más amplio.
2. El segundo escenario sería el opuesto al primero y correspondería con una situación de crisis, o de *estancamiento demográfico*, indicando que hay poco crecimiento y la búsqueda de vivienda es más restringida en un momento de crisis que obliga a la población a marcharse, mientras que la que se queda permanece bastante estable. Como la búsqueda de nuevas residencias se restringe, la oferta de vivienda libre se incrementará. En este caso, el radio de búsqueda es más limitado.
3. Por último, se simuló un escenario intermedio más sostenible, o de *equilibrio demográfico*, en el que el crecimiento de la población es estable y hay una demanda y oferta de viviendas más o menos equilibradas, por lo que la búsqueda es más ajustada a las necesidades y preferencias de cada grupo de población. Siendo así, los valores de radio de búsqueda tampoco serán extremos.

En la Tabla 4 aparecen los parámetros iniciales establecidos para cada escenario. La configuración idéntica de algunos de ellos como la capacidad de insistencia o el crecimiento máximo establecido para la población de cada nivel de renta, fue intencionada con el objetivo de discernir mejor las diferencias esperables en los resultados de cada escenario.

Tabla 4. Configuración de los parámetros iniciales para los tres escenarios simulados

PARÁMETROS	REFERENCIA	ESCENARIOS		
		BOOM	ESTANCAMIENTO	EQUILIBRIO
% de crecimiento de población	0 a 20	5	1	3
% Cambio de tipología de residencia	1 a 15	10	10	10
% población renta alta	0 a 100	25	25	25
% población renta media	0 a 100	50	50	50
% población renta baja	0 a 100	25	25	25
Radio búsqueda nueva residencia	0 a 30	25	5	15
Insistencia en la búsqueda (intentos)	1 a 10	7	7	7
Incremento número de viviendas	0 a 100	80	20	50

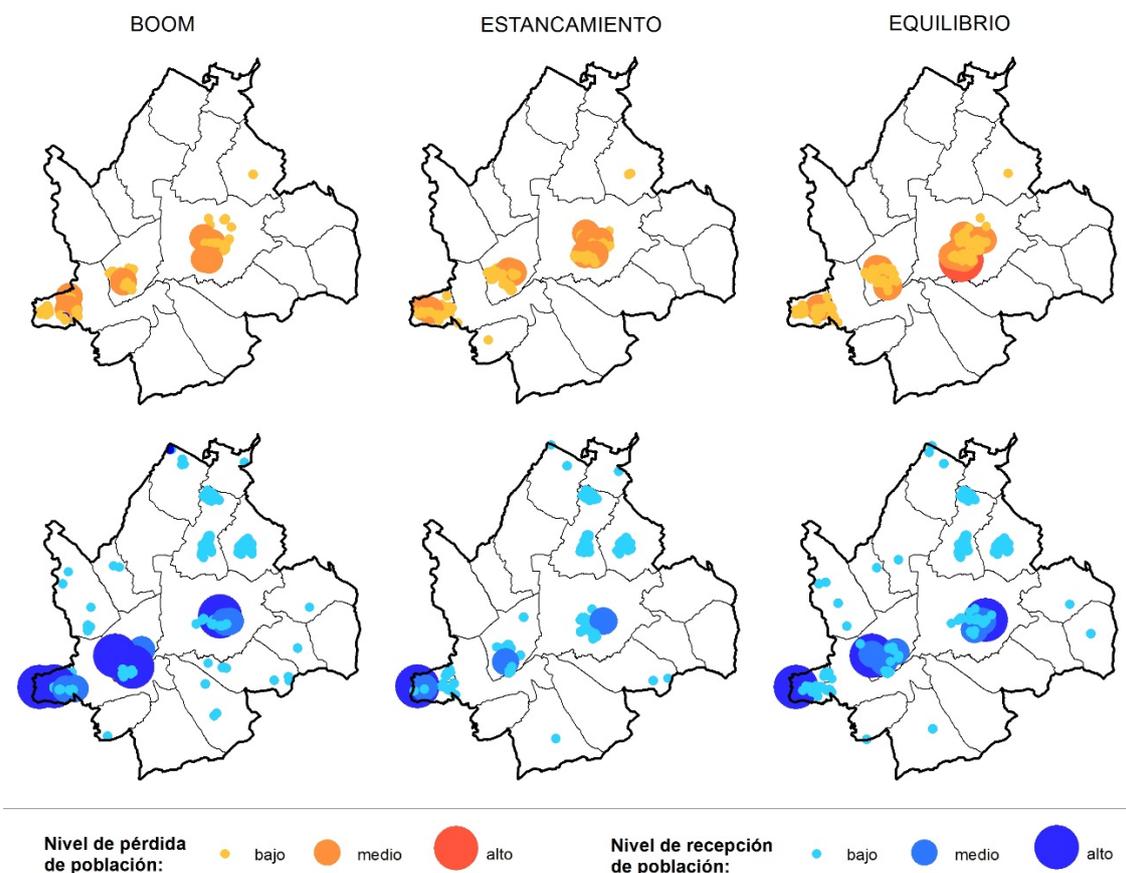
Fuente: elaboración propia

Para la correcta visualización y análisis de los datos, se procedió a su incorporación a un SIG. En la Figura 5, los datos aparecen agregados en función del total de población que ha abandonado o ha pasado a ocupar cada unidad edificada (píxel), representados a través de gráficos con tres tamaños proporcionales.

Dadas las condiciones establecidas para el primer escenario, se prevé un flujo importante de personas moviéndose simultáneamente. Los resultados reflejan cierta dificultad en encontrar viviendas disponibles, con lo que muchos agentes acabarán por agotar su capacidad de insistencia y se adaptarán al entorno. Esto podría ser debido a que la “oferta” establecida no es suficiente para un escenario de estas características. Si analizamos el flujo demográfico espacial, esto es, origen y destino de las reubicaciones de población, los resultados de este escenario muestran que la mayor parte de la población insatisfecha que finalmente cambia de residencia lo hace principalmente desde viviendas del eje central hacia otras en este mismo eje. Este movimiento se produce en menor medida en los municipios de los ejes norte y sur, no sólo debido a la mayor disponibilidad de viviendas, sino también por la demanda de la población en un escenario de continuo crecimiento.

La distribución espacial resultante del segundo escenario (estancamiento) muestra un flujo demográfico muy equilibrado, saliendo y estableciéndose en el mismo eje central, con algunas reubicaciones destacables en la región nordeste del Corredor (que también se producen en el anterior escenario). Es destacable el bajo interés en reubicarse en los municipios del eje sur. Esto también es debido a que el radio de búsqueda permitido es el más bajo de los tres escenarios, reflejándose, por tanto, una menor movilidad de la población y, por tanto, menor diferencia entre el nivel de pérdida y recepción en los distintos municipios.

Figura 5. Resultados de ocupación residencial por cada grupo de población y en cada uno de los escenarios planteados



Fuente: elaboración propia

Por último, podemos comprobar como también los resultados del escenario de equilibrio demográfico se ajustan a la situación intermedia planteada respecto a los dos anteriores. Así, los destinos aparecen muy bien distribuidos espacialmente, aunque el origen de los desplazamientos se encuentre predominantemente en el eje central, donde está ubicada la mayor parte de la población insatisfecha que busca cambiar de vivienda.

En la tabla 5 aparecen algunos datos numéricos resultantes para cada escenario simulado. Como en los tres casos se optó por ejecutar el submodelo hasta que se agotara el volumen de población insatisfecha, en un momento dado toda la población insatisfecha se encuentra no asentada y buscando vivienda, y llegados a este punto, la única opción es adaptarse a su entorno o marcharse del área de estudio.

Tabla 5. Comparación de los resultados de las simulaciones realizadas

VALORES DE POBLACIÓN	ESCENARIOS					
	<i>Boom</i>		<i>Estancamiento</i>		<i>Equilibrio</i>	
	<i>Inicial</i>	<i>Final</i>	<i>Inicial</i>	<i>Final</i>	<i>Inicial</i>	<i>Final</i>
Clase Alta	6093	6179	5955	6086	6024	6129
Clase Media	3468	2612	3206	2554	3274	2586
Clase Baja	3097	3132	3015	3040	3119	3077
Insatisfecha	1813	0	1331	0	1568	0
Eliminada	0	735	0	496	0	625
Adaptada al entorno	0	154	0	152	0	129

Fuente: elaboración propia

Estos resultados también son coherentes con los escenarios planteados, al presentar cierta proporción entre el incremento de población (considerando el mismo cambio de tipología inicial y capacidad de insistencia) y el número de agentes expulsados y eliminados. Respecto a la adaptación al medio, el tercer escenario presentó el menor volumen de población adaptada, entendiendo que, en una situación de equilibrio, lo ideal es que haya residencia disponible para cualquier nivel socioeconómico.

A la luz de estos resultados y de las diferencias identificadas en los resultados espaciales obtenidos a partir de cada escenario planteado, podemos respaldar la fiabilidad del correcto funcionamiento del submodelo y recomendar su aplicación.

4.2 Hacia el Modelo integrado AMEBA

Como hemos mencionado, el desarrollo del prototipo AMEBA se ha realizado a partir de una estructura de tres submodelos independientes, que finalmente podrían ser integrados en un solo modelo donde ya sí interactúen a la vez la población, los promotores inmobiliarios y los planificadores urbanos.

El desafío se plantea, por un lado, al integrarlos de forma que no pierdan sus objetivos individuales, y por otro, combinarlos para que la resolución temporal sea coherente, visto que el comportamiento de los tres actores, aunque actúen conjuntamente, presentan intervalos de tiempo de acción muy diferentes entre sí.

Para rescatar y mantener una mínima flexibilidad existente actualmente en los submodelos, y a la vez permitir que el usuario siga pudiendo definir los escenarios que estime oportuno, la estructura del Modelo Integrado (AMEBA) obedece a una estructura similar a los demás presentados para la definición de los parámetros iniciales. Los escenarios concretos que

pretende simular AMEBA son no sólo, aunque también, producto del resultado de cada submodelo conectado al siguiente (presentados independientemente), sino también un reflejo de la reacción de cada actor en el proceso de planificación en función del comportamiento de los otros dos. En resumen, con este ensayo realizado de integración se pretende simular, y de esta forma intentar comprender mejor, el fenómeno de crecimiento y ocupación urbana visto como un sistema donde los tres actores actúan de forma coordinada.

Al igual que con todos los submodelos, al simular el crecimiento urbano con AMEBA, se ha intentado recrear tres escenarios con el objetivo de verificar su correcto funcionamiento, cuyas narrativas pasamos a describir sucintamente:

- *Tendencial*: el comportamiento de los tres agentes es muy dinámico y cambia rápidamente, y de forma sincronizada. La población se encuentra muy activa en la búsqueda de nuevas viviendas debido a unas buenas condiciones financieras y un mercado inmobiliario muy dinámico que se traduce en la construcción de un volumen importante y rápido de nuevas viviendas. En estas circunstancias hay una necesidad de ampliación de zonas urbanizables, por lo que los planes son frecuentemente revisados por los planificadores urbanos.
- *Sostenible*: muy dinámico en cuanto a los comportamientos de la población y promotores inmobiliarios, pero que, al contar con baja disponibilidad de áreas urbanizables, puede inducir a una ocupación no bien regulada. Se podría caracterizar como un contexto sostenible siempre que no llegue a una situación extrema de falta de áreas urbanizables, ya que así se mantendría una cierta compacidad de crecimiento urbano, procesos de renovación y ocupación de vacíos urbanos y utilización del terreno de forma ambientalmente correcta.
- *Crisis*: presenta un cierto equilibrio entre la baja demanda de nuevas residencias por parte de la población y la baja oferta de viviendas, no obstante, cuenta con una amplia superficie clasificada como urbanizable, lo que genera una situación no deseada por la innecesaria posibilidad de artificialización del suelo.

Para realizar este ensayo se plasmaron estos escenarios a través de los siguientes parámetros (Tabla 6):

Tabla 6. Parámetros seleccionados para la ejecución de los tres escenarios en el modelo integrado

		ESCENARIOS		
	Parámetros (por unidad de tiempo correspondiente)	Tendencial	Sostenible	Crisis
SM1	Terreno a reclasificar como urbanizable	12000 píxeles (30km ²)	4000 píxeles (10km ²)	2000 píxeles (5km ²)
	Restricción*	base	máxima (con IV)	base
SM2	Edificación a construir (n° de viviendas)	3000	2000	1000
SM3	Crecimiento demográfico	5%	3%	1%
	Complejidad	sin expulsión	con expulsión	con expulsión
SALTOS	SM2 a SM1**	cuando el 10% de las áreas urbanizables estén edificadas con residencia	cuando el 15% de las áreas urbanizables estén edificadas con residencia	cuando el 20% de las áreas urbanizables estén edificadas con residencia
	SM3 a SM2	Cuando un 85% de residencias se encuentren ocupadas	Cuando un 90% de residencias se encuentren ocupadas	Cuando un 95% de residencias se encuentren ocupadas

* La restricción base incluye todos los Espacios Naturales Protegidos presentes en el área de estudio, las áreas de interés ambiental (riberas de ríos, etc.), así como zonas con limitaciones desde el punto de vista de la topografía (pendientes superiores al 10 %). Por otro lado, la situación de restricción máxima incluye, además de la base, las zonas pertenecientes a la Red Natura 2000 y una propuesta de Infraestructura Verde en la zona del Corredor del Henares (Rodríguez et al., 2018). Para más información ver referencia)

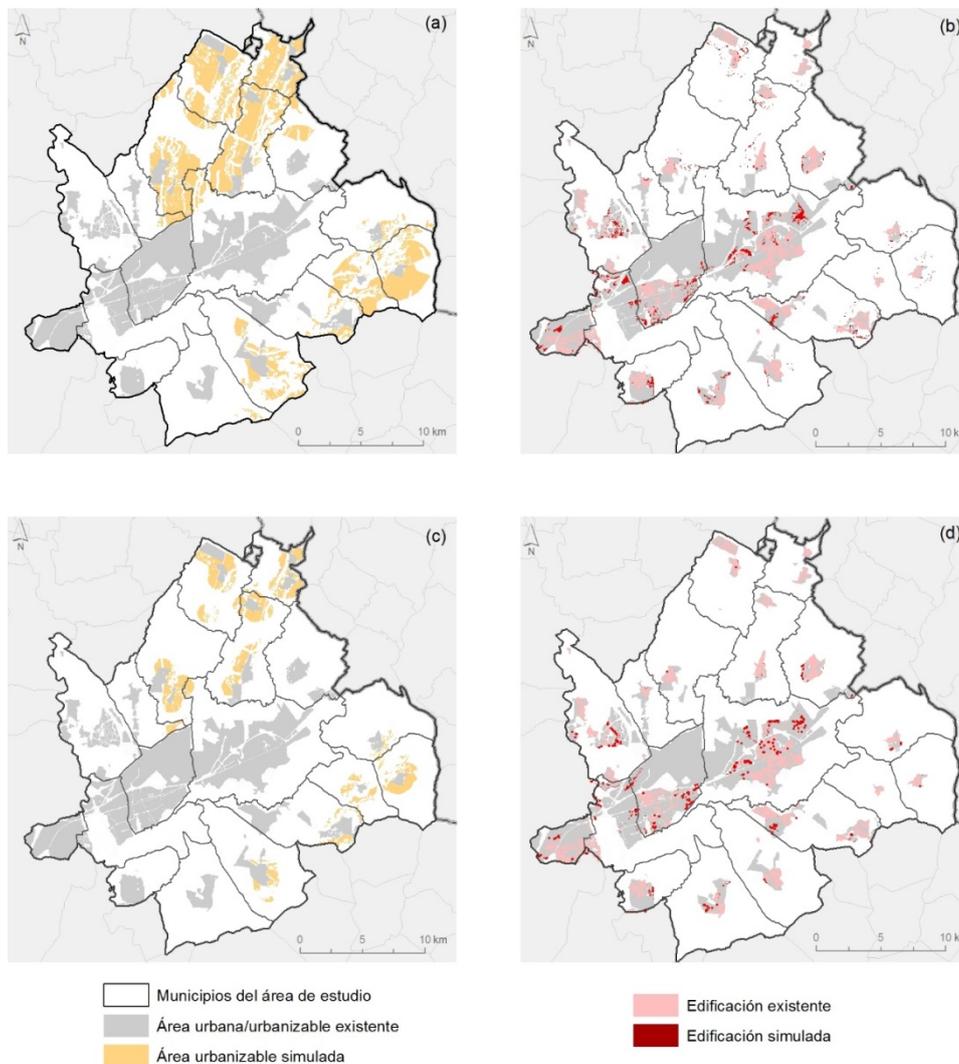
** El modelo arranca con la distribución real inicial de un 8,15 % de áreas urbanizables ocupadas por edificación residencial

Fuente: elaboración propia

Como era de esperar, los resultados de la ejecución del modelo integrado para los tres escenarios difieren considerablemente. Así, observando la nueva distribución espacial del crecimiento urbano resultante de la aplicación (Figura 6), y representado por la ampliación de áreas urbanizables (a, c) y edificaciones residenciales (b, d), podemos comprobar que en el escenario *tendencial* (a, b) las primeras se amplían significativamente, ocupando casi la totalidad del territorio disponible para ello, teniendo en cuenta la exclusión de aquellas áreas con restricción por protección obligatoria. Por otra parte, las nuevas edificaciones residenciales

todavía priorizan los municipios del eje central, siguiendo la misma evolución presentada en períodos anteriores. En el *escenario sostenible* (c, d), la expansión territorial final que se puede observar es significativamente más compacta, representando una situación de menor impacto ambiental. La creación de edificación residencial sigue la misma dinámica, estando más bien vinculada a las preferencias de los promotores y las necesidades de la población. Así, esta edificación no necesariamente se produce en nuevo suelo urbano, sino en las zonas urbanizables ya existentes, especialmente en el eje central, y en mucha menor medida en los márgenes norte y sur.

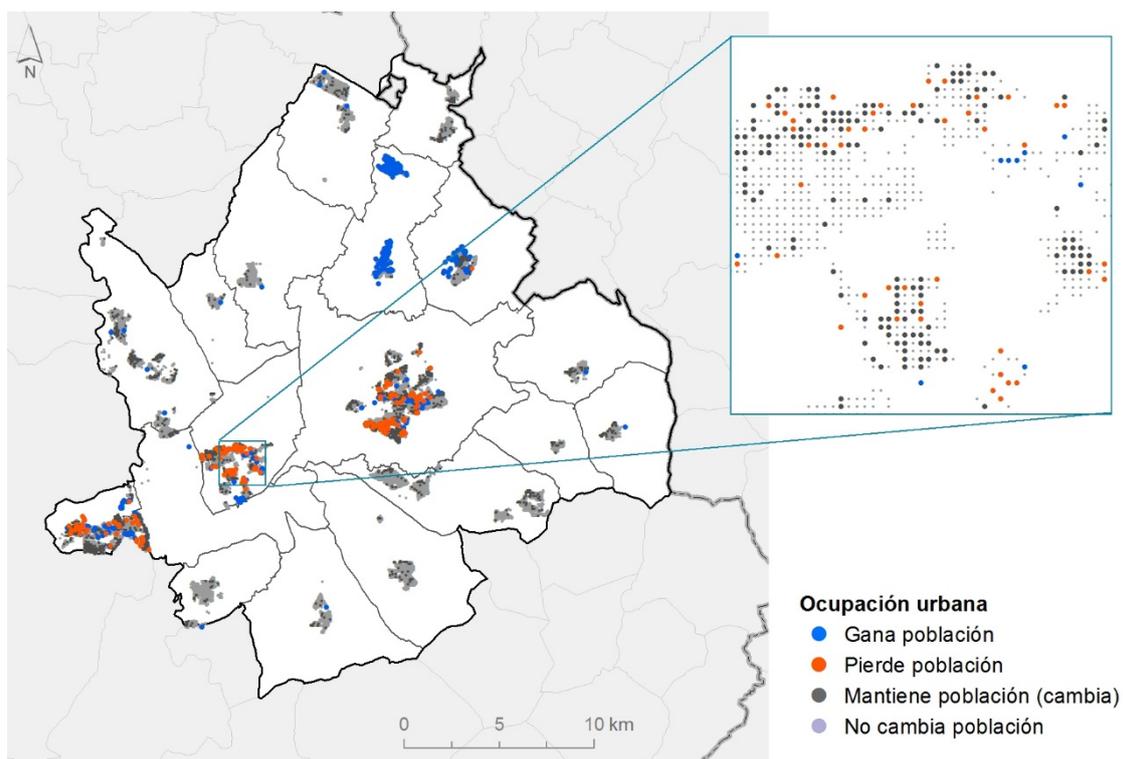
Figura 6. Resultados espaciales de los escenarios tendencial (a, b) y sostenible (c, d) de AMEBA indicando la expansión de nuevas zonas urbanizables (a, c) y el crecimiento del parque de viviendas (b, d)



Fuente: elaboración propia

En cuanto a los resultados del *escenario de crisis*, el único submodelo activado durante todo el proceso ha sido el de la población. Esto ha sucedido debido al elevado porcentaje definido en el arranque del modelo, tanto de edificación de áreas residenciales (20 %), como ocupación de viviendas (95 %), para que se produzca los saltos hacia el modelo de población y de promotores. Esto unido a que se considera la posibilidad de expulsar la población de su vivienda actual, hace que los valores máximos establecidos sean difícilmente alcanzados. Recordemos que se trata de un escenario que prioriza la dinámica de ocupación de la población, minimizando la expansión territorial. Como resultado, la distribución territorial inicial y final en cuanto a la ampliación de áreas urbanizables y construcción de nuevas viviendas no experimenta ningún cambio, pero sí lo hace la distribución de la población, como se puede apreciar en la Figura 7.

Figura 7. Resultado espacial del escenario de crisis indicando la dinámica de ocupación urbana según distribución de la población



Fuente: elaboración propia

5 Discusión y conclusiones

La reproducción y simulación de un fenómeno tan importante a escala global actualmente como el crecimiento urbano pensamos que es un desafío muy importante en el contexto de la planificación. Para ello es imprescindible, no sólo desarrollar modelos que puedan informarnos

sobre el impacto y consecuencias a futuro de nuestro modo de crear nuevas áreas urbanas, sino que puedan ser utilizables de manera efectiva en el contexto de la toma de decisiones e influir en futuras direcciones estratégicas en cuanto a la gestión de recursos y política territorial.

El prototipo aquí presentado, pensamos puede ser una aportación en este sentido. La configuración del mismo, los agentes desarrollados y la estructura modular independiente permiten incluir a todos los actores implicados actualmente en este proceso y controlar mejor cada fase del mismo.

Su aplicación en un área de expansión urbana como el Corredor del Henares para su verificación ha sido de gran utilidad, pudiendo mostrar el alcance y distribución, tanto de la expansión, como de la ocupación residencial y las posibles interacciones entre las zonas más consolidadas (eje central del Corredor), frente a las menos consolidadas (especialmente en el margen Sur) en varios escenarios deseables o probables.

El otro gran objetivo cumplido, y siguiendo las recomendaciones de los expertos, ha sido el desarrollo de un modelo que sea lo suficientemente flexible y fácil de adaptar a otros contextos y situaciones para así incentivar su utilización. En este sentido ha resultado esencial que el conjunto y especialización de los datos requeridos para su aplicación sean los necesarios para reproducir todas las partes del proceso analizado, pero sin ser demasiado complicados de obtener o que su manejo requiera una excesiva carga computacional. Además, se ha pretendido en todo momento que su estructura fuera transparente (describiendo pormenorizadamente todos los componentes y secuencia de acciones), operativo y fácilmente entendible, que permita una interpretación asequible de los resultados, siguiendo el famoso principio KIDS, *Keep It Descriptive Stupid* (Sun et al., 2016).

Con el trabajo aquí presentado, y con el incremento que está experimentado el desarrollo de estos modelos en los últimos años, queda probada la potencialidad que ofrece utilizar los MBA en este contexto de ocupación residencial y de creación de la ciudad, más allá de la mera expansión urbana (localización de nuevo suelo urbano residencial) que ha sido ya suficientemente tratada y simulada con otros tipos de modelos.

Por otro lado, se ha mostrado la capacidad y potencialidad que puede proporcionar la arquitectura integrada propuesta con el prototipo AMEBA, por un lado, contemplando la interacción de tres de los principales actores implicados en la dinámica urbana, y por otro lado permitiendo una flexibilidad importante para recrear distintos escenarios a futuro.

En este sentido, la posibilidad de integrar todos los submodelos en una misma plataforma facilita la comprensión de los efectos derivados de la acción secuencial e integrada de los distintos actores que puede ser configurada de varias formas, cambiando la secuencia temporal de los actores implicados o, inclusive, cambiando el orden de intervención en el proceso de los mismos.

Así, sería viable reproducir otras situaciones distintas a los escenarios básicos utilizados en este trabajo para comprobar la viabilidad del modelo, y reproducir, por ejemplo, situaciones de *lobby* por parte de un tipo de promotores inmobiliarios que presionase a los planificadores para liberar más suelo, la presencia de una proporción elevada de habitantes de un determinado estatus económico para comprobar los efectos en el territorio de un determinado nivel de renta e, inclusive, la simulación de escenarios disruptivos que hoy consideramos como claramente improbables, pero que se podrían producir debido a la irrupción de un acontecimiento inesperado (Soria et al., 2020). Por ejemplo, la actual situación generada por la pandemia de coronavirus podría modificar las preferencias residenciales de la población y, en nuestro caso concreto, podría haber provocado la “huida” hacia los municipios más pequeños en los márgenes del Corredor, en lugar de la ocupación de la zona central del mismo.

Hemos de señalar que las posibilidades de adaptación a otros contextos también serían viables a través de la modificación del propio código fuente, pues resulta muy sencillo realizar cambios en la programación de determinados procesos. Este código estaría disponible para cualquier usuario, previa petición a las autoras.

Esta posibilidad, por tanto, de reproducir distintas simulaciones permitirían a los planificadores o gestores estudiar el problema desde diferentes niveles de abstracción y de esta forma determinar la adecuación y eficiencia de un plan de ordenación antes de ser implementado, reduciendo de alguna manera la incertidumbre innata a este tipo fenómenos (Fernández Güell, 2011).

En cuanto a las limitaciones del trabajo y líneas de investigación futuras (algunas ya apuntadas), hemos de advertir que se trata de una primera versión de un prototipo que de momento tiene ciertas limitaciones respecto a la complejidad de las interacciones entre los distintos actores, debido a la necesidad de programar las reglas para todas y cada una de las acciones necesarias para establecer dichas interacciones, lo que supone una carga computacional todavía elevada, razón por la cual las posibilidades de estos modelos todavía no han sido completamente explotadas. Sería muy interesante, en este sentido, configurar como verdaderos

agentes a los planificadores y promotores inmobiliarios, que por el momento no llegan al nivel de complejidad de la población.

Hemos de recordar también que, en esta primera propuesta, se han considerado sólo variables espacio-territoriales, que en cierto modo pueden estar representando determinados condicionantes socioeconómicos (seguramente también incompletos), aunque resulta evidente que la decisión de los distintos agentes podría estar afectada por otro tipo de factores culturales políticos o ambientales.

Otra de las cuestiones de interés sobre las que sin duda es esencial seguir explorando, es cómo reproducir a partir de ecuaciones computacionales el proceso de aprendizaje de los agentes en función de sus experiencias pasadas y poder integrarlas de manera eficiente y realista en un modelo de estas características. Para ello es importante avanzar en el conocimiento del comportamiento individual de los agentes, que hasta ahora es parcial e incompleto (basado algunas veces en encuestas, estadísticas, estudios ya publicados, etc.), pero también para ello es necesario poder disponer de datos socioeconómicos y con distribución espacial a nivel individual lo que todavía es muy complicado conseguir, en gran medida por problemas de secreto estadístico.

Agradecimientos: La presente investigación se ha desarrollado en el marco del proyecto «Instrumentos de Geosimulación y planificación ambiental en la ordenación territorial de ámbitos metropolitanos. Aplicación a escalas intermedias (SIMURBAN2)», financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España (Ref.: CSO2012-38158-C02-01).

Declaración responsable: Las autoras declaran que no existe ningún conflicto de interés con relación a la publicación de este artículo. La primera autora ha diseñado y desarrollado el modelo bajo la dirección de la segunda autora. Ambas han realizado la redacción del artículo y contribuido a la discusión y conclusiones, así como a la revisión del documento.

Bibliografía

- Acosta-Michlik, L., Rounsevell, M.D.A., Bakker, M., Van Doorn, A., Gómez Delgado, M., & Delgado, M. (2014). An agent-based assessment of land use and ecosystem changes in traditional agricultural landscape of Portugal. *Intelligent Information Management*, 6, 55-80. <https://doi.org/10.4236/iim.2014.62008>
- Alghais, N., & Pullar, D. (2018). Modelling future impacts of urban development in Kuwait with the use of ABM and GIS. *Transactions in GIS*, 22(1), 20-42. <https://doi.org/10.1111/tgis.12293>
- Alves, R., Da Silva Lima, R.; de Sena, D.C., de Pinho, A.F., & Holguín-Veras, J. (2019). Agent-based simulation model for evaluation urban freight policy to E-Commerce. *Sustainability*, 11, 4020. <https://doi.org/10.3390/su11154020>
- Batty, M. (2016). 20 years of quantitative geographical thinking. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 43(4), 605-609. <https://doi.org/10.1177/0265813516655408>
- Barredo, J.I., Kasanko, M., McCormick, N., & Lavallo, C., (2003). Modelling dynamic spatial processes: simulation or urban future scenarios through cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 64(3), 145-160. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00218-9](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00218-9)
- Barros, J. (2012). Exploring urban dynamics in latin american cities using an agent-based simulation approach. In A. Heppenstall, A.T. Crooks, L.M. See & M. Batty (Eds.), *Agent-Based Models of Geographical Systems* (pp. 571–589). Dordrecht: Springer.
- Berberoglu, A., Akim, A., & Clarke, K.C. (2016). Cellular automata modeling approaches to forecast urban growth for adana, Turkey: A comparative approach. *Landscape and urban planning*, 153, 11-27. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.04.017>
- Bonabeau, E. (2002). Predicting the Unpredictable. *Harvard Business Review*, March Issue, 109-116.
- Cantergiani, C.C. (2011). Modelos basados en agentes aplicados a estudios urbanos: una aproximación teórica. *Serie Geográfica*, 17, 29-43.
- Cantergiani, C.C., & Gómez Delgado, M. (2016). Diseño de un modelo basado en agentes para simular el crecimiento urbano en el Corredor del Henares (Comunidad de Madrid). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 70, 259-283. <https://doi.org/10.21138/bage.2171>

- Cantergiani, C.C., & Gómez-Delgado, M. (2018). Urban land allocation model of territorial expansion by urban planners and housing development. *Environments*, 5(5). <https://doi.org/10.3390/environments5010005>
- Crooks, A.T., Patel, A., & Wise, S. (2014). Multi-agent systems for urban planning. In N.N. Pinto, J.A.Tenedório, A.P. Antunes & J. Roca (Eds.), *Technologies for Urban and Spatial Planning: Virtual Cities and Territories*; (pp. 29-56). Hershey, PA, USA: IGI Global.
- Dahal, K.R., & Chow, T.E. (2014). An agent-integrated irregular automata model of urban land-use dynamics. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(11), 2281-2303. <https://doi.org/10.1080/13658816.2014.917646>
- De Kok, J.L., Overloope, S., & Engelen, G. (2017). Screening models for integrated environmental planning – A feasibility study for Flanders. *Futures*, 88, 55-68. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2017.03.007>
- Fang C., & Yu, D. (2017). Urban agglomeration: An evolving concept of an emerging phenomenon. *Landscape and urban planning*, 162, 126-136. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.02.014>
- Feitosa, F.F., Le, Q.B., & Vlek, P.L.G. (2011). Multi-agent simulator for urban segregation (MASUS): A tool to explore alternatives for promoting inclusive cities. *Computers, Environment and Urban Systems*, 35, 104–115. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2010.06.001>
- Fernández Güell, J.M. (2011). Recuperación de los estudios del futuro a través de la prospectiva territorial. *Ciudad y Territorio*, XLIII(167), 11-32.
- Filatova, T. (2015). Empirical agent-based land market: Integrating adaptive economic behavior in urban land-use models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, 397–413. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2014.06.007>
- Fontaine, C.M., & Rounsevell, M.D.A. (2009). An agent-based approach to model futures residential pressure on a regional landscape. *Landscape Ecology*, 24, 1237–1254. <https://doi.org/10.1007/s10980-009-9378-0>
- Gallardo, M., & Martínez-Vega, J. (2016). Three decades of land-use changes in the region of madrid and how they relate to territorial planning. *European Planning Studies*, 24, 1016–1033. <https://doi.org/10.1080/09654313.2016.1139059>

- Ghavami, S. M., Taleai, M., & Arentze, T. (2016). Socially rational agents in spatial land use planning: A heuristic proposal based negotiation mechanism. *Computers, Environment and Urban Systems*, 60, 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.08.004>
- Grimm, V., & Railsback, S.F. (Eds) (2005). *Individual-based modeling and ecology*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Groeneveld, J., Müller, B., Buchmann, C.M., Dressler, G., Guo C., Hase, N., ... Schwarz, N. (2017). Theoretical foundations of human decision-making in agent-based land use models - A review. *Environmental Modelling and Software*, 87, 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.10.008>
- Guo, C., Buchmann, C.M., & Schwarz, N. (2017). Linking urban sprawl and income segregation- Findings from stylized agent-based model. *Environment and Planning B: Urban analytics and city science*, 46(3), 469-489. <https://doi.org/10.1177/2399808317719072>
- Hackl, J., & Dubernet, T. (2019). Epidemic spreading in urban areas using agent-based transportation models. *Future internet*, 11, 92.
- Hosseinali, F., Alesheikh, A.A., & Nourian, F. (2013). Agent-based modeling of urban land-use development, case study: Simulating future scenarios of Qazvin city. *Cities*, 31, 105-113. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2012.09.002>
- Jordan, R., Birkin, M., & Evans, A. (2012). A. Agent-based modeling of residential mobility, housing choice and regeneration. In A. Heppenstall, A.T. Crooks, L.M. See & M. Batty (Eds.), *Agent-Based Models of Geographical Systems* (pp. 511-524). Dordrecht: Springer.
- Langlois, P. (2013). *Simulation of complex systems in GIS*. Londres, John Wiley & Sons
- Ligmann-Zielinska, A., & Jankowski, P. (2010). Exploring normative scenarios of land use development decisions with an agent-based simulation laboratory. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34, 409–423. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2012.09.002>
- Long Y., & Zhang, Y. (2015). Land-use pattern scenario analysis using planner agents. *Environment and planning B: Planning and Design*, 42, 615-637. <https://doi.org/10.1068/b130012p>
- Magliocca, N., Safirova, E., Mcconnell, V., & Walls, M. (2011). An economic agent-based model of coupled housing and land markets (CHALMS). *Computers, Environment and Urban Systems*, 35, 83-191. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2011.01.002>

- Malik, A., & Abdalla, R. (2017). Agent-based modelling for urban sprawl in the region of Waterloo, Ontario, Canada. *Modeling Earth Systems and Environment*, 3(7). <https://doi.org/10.1007/s40808-017-0271-6>
- Mansury, Y. (2015). Bottom-up computational models of urban systems: In search of micro-foundations. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, 385-387. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.10.006>
- Matthews, R.B., Gilbert, N.G., Roach, A., Polhill, J.G., & Gotts, N.M. (2007). Agent-based land-use models: a review of applications. *Landscape Ecology*, 22, 1447-1459. <https://doi.org/10.1007/s10980-007-9135-1>
- Motieyan, H., & Mesgari, M.S. (2018). An agent-based modeling approach for sustainable urban planning from land use and public transit perspectives. *Cities*, 81, 91-100. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.03.018>
- Mustafa, A., Cools, M., Saadi, I., & Teller, J. (2017). Coupling agent-based, cellular automata and logistic regression into a hybrid urban expansion model (HUEM). *Land Use Policy*, 69, 529-540. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.10.009>
- Parker, D.C, Manson, S.M., Janssen, M.A., Hoffmann, M.J., & Deadman, P. (2003). Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review. *Annals of the Association of American Geographers*, 93(2), 314-337. <https://doi.org/10.1111/1467-8306.9302004>
- Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., & Bosque Sendra, J. (2011). Simulation urban growth scenarios using gis and multicriteria evaluation techniques. Case study: Madrid region, Spain. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 38, 1012–1031. <https://doi.org/10.1068/b37061>
- Pumain, D., & Sanders, L. (2013). Theoretical principles in interurban simulation models: a comparison. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 45, 2243-2260. <https://doi.org/10.1068/a45620>
- Soria-Lara, J.A., Ariza-Álvarez, M.A., Aguilera-Benavente, F., Cascajo, R., Arce, R., López-García de Lenaiz, C., & Gómez-Delgado, M. (Final review). Participatory visioning for building disruptive future scenarios for transport and land use planning. *Journal of Transport Geography*.
- Souza, L.C.G.D. (2005). *O ensino da psicologia social e suas representações. A formação do saber o saber em formação*. PhD, UFRJ. Retrieved from <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp023945.pdf>

- Sun, Z., Lorscheid, I., Millington, J.D., Lauf, S., Magliocca, N.R., Groeneveld, J., ... Buchmann, C.M. (2016). Simple or complicated agent-based models? A complicated issue. *Environmental modelling and software*, 86, 56-67. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.09.006>
- Tabernerero, C., Hernández, B., Cuadrado, E., Luque, B., & Pereira, C.R. (2015). A multilevel perspective to explain recycling behaviour in communities. *Journal of Environmental Management*, 159, 192-201. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.05.024>
- Tan, R., Liu, Y., Zhou, K., Jiao, L. & Tang, W. (2015). A game-theory based agent-cellular model for use in urban growth simulation: A case study of the rapidly urbanizing Wuhan area of central China. *Computers, environment and urban systems*, 49, 15-29. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2014.09.001>
- Tayyebi, A., Pijanowski, B. C., & Pekin, B. (2011). Two rule-based urban growth boundary models applied to the Tehran metropolitan area, Iran. *Applied Geography*, 31(3), 908–918. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.01.018>
- Tesfatsion, L., Rehmann, C.R., Cardoso, D.S., Jie, Y., & Gutowski, W.J. (2017). An agent-based platform for the study of watersheds as coupled natural and human systems. *Environmental Modelling & Software*, 89, 40-60. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.11.021>
- Torrens, P.M., & O’Sullivan, D. (2001). Cellular automata and urban simulation: where do we go from here? *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28(2), 163-168. <https://doi.org/10.1068/b2802ed>
- Torrens, P.M. (2012). Moving agent-pedestrians through space and time. *Annals of the Association of American Geographers*, 102(1), 35-66. <https://doi.org/10.1080/00045608.2011.595658>
- Triantakostas, D., & Mountrakis, G. (2012). Urban growth prediction: A review of computational models and human perceptions. *Journal of Geographical Information Systems*, 4, 555-587. <https://doi.org/10.4236/jgis.2012.46060>
- UN-HABITAT (2016). *Urbanization and development: emerging futures*. Nairobi, Kenya: World Cities report 2016.
- Valenzuela Rubio, M. (2010). La planificación territorial de la región metropolitana de Madrid. Una asignatura pendiente. *Cuadernos geográficos*, 47(2), 95-129.
- Valera, S., & Pol, E. (1994). El concepto de identidad social urbana: una aproximación entre la Psicología Social y la Psicología Ambiental. *Anuario de Psicología*, 62, 5-24.

- Yang, Y., Mao, L., & Metcalf, S.S. (2019). Diffusion of hurricane evacuation behavior through a home-workplace social network: A spatially explicit agent-based simulation model. *Computers, environment and urban systems*, 74, 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.compenurbsys.2018.11.010>
- Zhuge, C., Shao, C., Gao, J., Dong, C., & Zhang, H. (2016). Agent-based joint model of residential location choice and real estate price for land use and transport model. *Computers, environment and urban systems*, 57, 93-105. <https://doi.org/10.1016/j.compenurbsys.2016.02.001>