



Simulación de la construcción residencial mediante un modelo basado en agentes

N. Shurupov¹, M. Gómez Delgado¹, J. Clemente Párraga²

¹ Unidad Docente de Geografía. Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente. Universidad de Alcalá. C. Colegios 2, 28801 Alcalá de Henares.

² Unidad Docente de Sistemas Operativos y Lenguajes. Departamento de Automática. Universidad de Alcalá. Campus Universitario, 28805 Alcalá de Henares.

nikolai.shurupov@edu.uah.es, montserrat.gomez@uah.es, julia.clemente@uah.es

RESUMEN: La utilización de Modelos Basados en Agentes (MBA) está abriendo nuevas posibilidades para el análisis de la complejidad inherente a las actuales dinámicas urbanas y sus consecuencias, ofreciendo la posibilidad de plasmar complejas interacciones entre los agentes implicados en el proceso y su entorno. En este contexto, el fenómeno de la promoción inmobiliaria conforma uno de los inductores de cambio territorial más importantes. Sin embargo, su inclusión es poco frecuente, tanto en modelos de simulación del crecimiento urbano generales, como en MBA en forma de agentes. El presente trabajo se ha centrado en estudiar las posibilidades en cuanto al uso de este tipo de actores en el proceso de simulación. Concretamente se han diseñado dos tipos de promotores, resultado de un extenso análisis de los que actualmente ejercen su actividad dentro del área de estudio: el Corredor Urbano-industrial del Henares, entre las provincias de Madrid y Guadalajara (España). El diferente comportamiento de ambos se ha basado en factores como su adaptabilidad al mercado, su capacidad de recabar información del entorno y capacidad de evaluación de las características del área de estudio. Como resultado, se ha desarrollado un prototipo en la plataforma NetLogo (una de las más utilizadas en el ámbito de los MBA) que tiene la capacidad de simular la aparición de nuevas edificaciones en suelo urbanizable en función de su tipología (unifamiliar o multifamiliar) y su estándar de calidad (alto, medio y bajo). La interfaz diseñada para el prototipo es bastante flexible, permitiendo la configuración de distintos parámetros relacionados con la demanda de cada tipo de edificación y el grado de diferenciación entre cada tipo de promotor.

Palabras-clave: modelo basado en agentes, promotores inmobiliarios, dinámica urbana, simulación construcción residencial.

1. INTRODUCCIÓN.

El último informe de Naciones Unidas indica que la expansión urbana continuará en las próximas décadas, pasando de una tasa de urbanización a nivel mundial del 56,2%, a casi un 70% en 2050 (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2018) En el contexto español, un 82,2 % de la población total ya residía en 2019 en áreas urbanas (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2020). Dicha expansión está suponiendo un impacto importante sobre el planeta, siendo los cambios de usos del suelo provocados por este hecho un factor de gran incidencia en el actual proceso de cambio climático (Jia et al., 2019). Para intentar minimizar estos impactos, las simulaciones de la dinámica urbana a futuro pueden ilustrar sobre las consecuencias que pueden suponer una forma u otra de crecimiento y expansión del fenómeno urbano.

Si bien entre las distintas técnicas y modelos utilizados para este tipo de simulaciones los basados en Autómatas Celulares (AC) han sido los más ampliamente utilizados (Triantakoustantis y Mountrakis, 2012), son cada vez más los estudios que optan por la utilización de MBA, ya que abren nuevas posibilidades para el análisis de la complejidad inherente a las actuales dinámicas urbanas y sus consecuencias (Cantergiani y Gómez-Delgado, 2020). Estos permiten simular sistemas virtuales compuestos por unos agentes heterogéneos y autónomos que desarrollan su acción en un determinado entorno y con unas reglas de comportamiento que definen las interacciones de estos agentes entre ellos mismos y con su entorno. Esta estructura permite evaluar los efectos que emergen de esta interacción a gran escala a partir de las dinámicas generadas a pequeña escala (Crooks et al., 2017; Gallagher y Bryson, 2018; Heckbert et al., 2010), así como detectar posibles patrones, estructuras y comportamientos que no estaban inicialmente programados (Macal

y North, 2010). Estos modelos siguen también una filosofía de simulación prospectiva, es decir, exploran las posibles evoluciones del sistema estudiado y permiten utilizar distintos escenarios de futuro para realizar comparaciones (Aguilera-Benavente et al., 2010).

En los estudios realizados hasta el momento, tanto los planificadores como la población aparecen como los actores determinantes en la simulación de la expansión urbana y la ocupación residencial. Sin embargo, la figura de los Promotores Inmobiliarios (PI), con un papel determinante en el proceso de construcción residencial, aparece en muchos menos estudios y siempre de manera parcial o definidos a partir de unas reglas de comportamiento muy básicas y determinísticas, sin, por supuesto, considerar la diferenciación de distintos tipos de PI actuando de manera simultánea en el territorio objeto de estudio (Alghais y Pullar, 2018; Cantergiani y Gómez-Delgado, 2018; Filatova, 2015; Kaviari et al., 2019; Ligmann-Zielinska, 2009; Mustafa et al., 2017; Tan et al., 2015; Zhuge et al., 2016).

El punto principal de partida para intentar diferenciar la acción de distintos tipos de agentes como PI, sería conocer de manera más empírica cuestiones relacionadas con su comportamiento y forma de proceder y actuar. En general cualquier promotora se define por las siguientes características: búsqueda de beneficios económicos a corto plazo, ejecución rápida de los proyectos para poder pasar al siguiente (Mohamed, 2006) y minimización del riesgo de la inversión una vez alcanzan un umbral de beneficio económico (Magliocca et al., 2014). Sin embargo, también existen diferencias entre ellas, especialmente en la capacidad económica y la cantidad y calidad de la información a la que tienen acceso, lo que genera una competencia que da lugar a distintos niveles de actuación (Calderón-Calderón, 2002; Calderón-Calderón, 2004; Naredo, 2010). Por lo tanto, los PI no presentan un comportamiento homogéneo y plasmar estas diferencias a través de un MBA con varios tipos de agentes puede resultar de gran interés.

Tomando como referencia el modelo desarrollado por Cantergiani y Gómez-Delgado (2020), el presente trabajo pretende profundizar en las posibilidades de representar distintos tipos de agentes PI que intervendrían en la dinámica urbana futura del Corredor Urbano-industrial del Henares, entre las provincias de Madrid y Guadalajara (España). Para ello se caracterizará en primer lugar los distintos tipos de PI que operan actualmente en el área de estudio. Con estos datos, y las premisas de partida del modelo preexistente (AMEBA, *Agent-based Model for the Evolution of urBan Areas*), se diseñará y programará un nuevo submodelo con una nueva interfaz de usuario que permita introducir la acción diferenciada de varios tipos de estos agentes.

El trabajo se estructura de la siguiente forma: en el epígrafe 2 se presenta el área de estudio, los PI que ejercen su actividad en ella y el proceso seguido para su diferenciación, así como las modificaciones introducidas en la conceptualización del submodelo preexistente. El epígrafe 3 presenta la nueva propuesta de submodelo desarrollada y su interfaz, así como unos resultados preliminares. Finalmente, el epígrafe 4 presenta la discusión y conclusiones del trabajo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS.

AMEBA está compuesto por tres tipos de agentes: planificadores, PI y población, cada uno plasmado en un submodelo. El submodelo 2, que refleja la actividad de los PI con un único tipo de agente, incorpora información relativa a la zonificación legal del área de estudio, el precio, el número de viviendas y las distancias a zonas de interés (carreteras, zonas urbanas consolidadas y estaciones de tren). Con toda esta información se evalúan las zonas con potencial de construcción (categorizadas como urbanizables) e incrementa el valor de número de viviendas en función del estándar de la vivienda construida.

Existen diferentes plataformas y lenguajes de programación para la construcción de MBA. Dado que la presente investigación ha tomado como punto de partida a AMEBA, se ha escogido la misma plataforma utilizada: *NetLogo*¹. Es de código abierto, gratuita y de fácil iniciación. Ofrece una interfaz, guías y lenguaje de programación sencillos, que facilitan tanto la inclusión de nuevos usuarios en este ámbito, como el uso educativo para el profesorado, siendo por tanto una plataforma ampliamente utilizada (Abar et al., 2017).

2.1. Caracterización de los agentes promotores en el área de estudio (Corredor del Henares).

El área de estudio donde se ha desarrollado y testado el modelo AMEBA comprende 18 municipios de la Comunidad de Madrid (Figura 1), pertenecientes a un importante y dinámico corredor urbano-industrial entre Madrid y Guadalajara (Corredor del Henares), donde todavía existen municipios con posibilidades de expansión urbana.

¹ <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

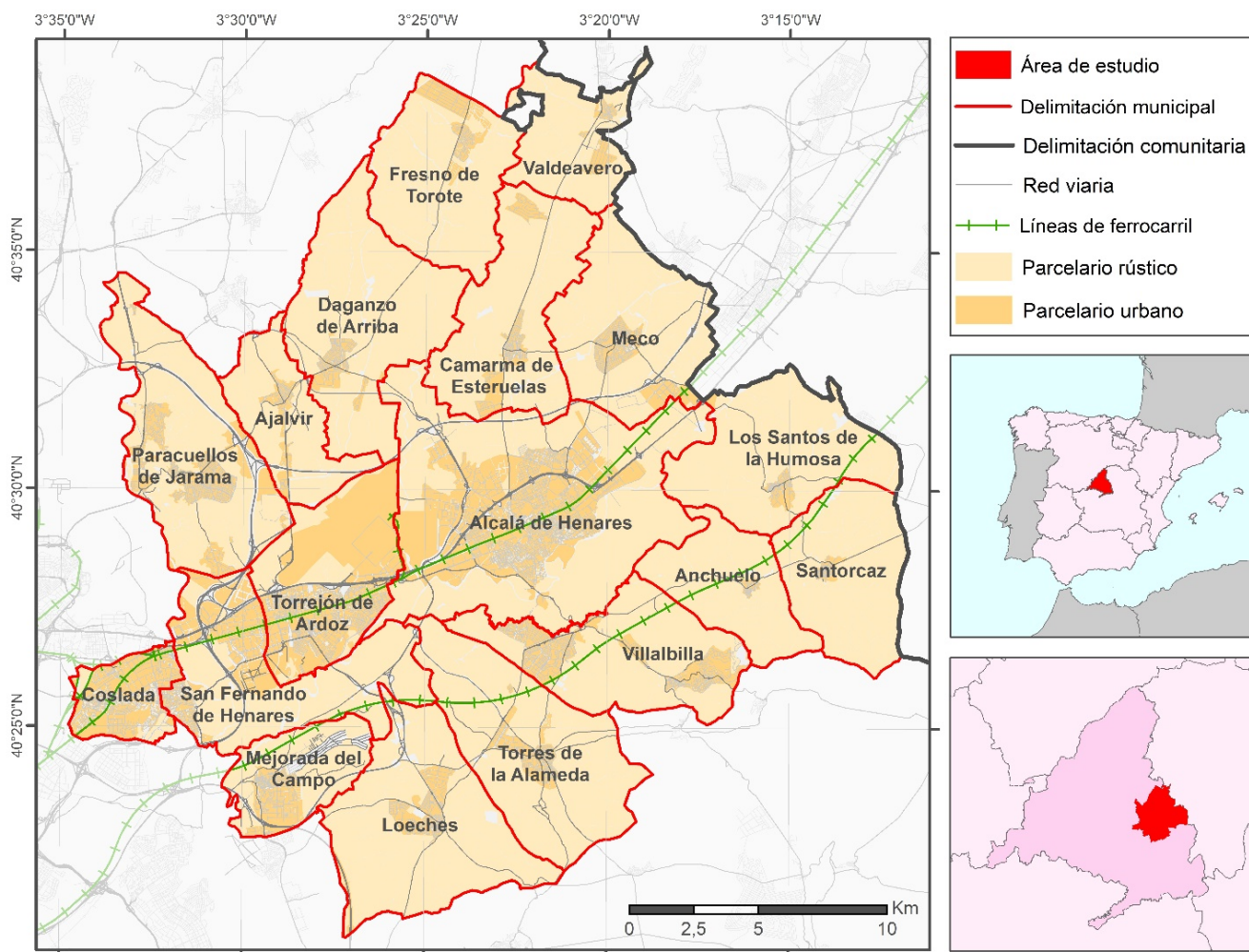


Figura 1. Contextualización geográfica del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos catastrales de la Dirección General del Catastro (DGC) y BTN25 del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).

Para solventar el problema de falta de información sobre las dinámicas, tanto internas como externas, de los PI en el área de estudio, se ha realizado un análisis del mercado de vivienda de nueva obra, junto con una localización y catalogación de los proyectos inmobiliarios concretos de cada promotor. Se han diferenciado las distintas promociones en desarrollo en función del estándar (alto, medio o bajo) y del tipo de edificación (unifamiliar o multifamiliar). Para la clasificación según estándar se ha optado por la utilización del precio de las viviendas, estableciendo los siguientes intervalos: bajo: $\leq 150\,000$ €; medio: $> 150\,000$ € $\leq 360\,000$ € y alto: $> 360\,000$ €.

En función del tipo de promociones diferenciadas, se muestra en la Tabla 1 los PI que las llevan a cabo y, mediante el superíndice, al tipo que pertenecen. Las características de cada uno de ellos son las siguientes:

- **¹Generalista:** lleva operando en el área de estudio durante un período prolongado, posee (por la característica anterior o por otros motivos) mayor acceso a información sobre el área de estudio y tiene suficiente respaldo económico como para competir en diversos segmentos y áreas de la zona, por lo que tiene gran capacidad de adaptación a los requerimientos del mercado.
- **²Especializado:** lleva menos tiempo operando en el área de estudio, tiene un acceso más limitado a información, opera con márgenes de beneficio menores, le cuesta más adaptarse a los requerimientos del mercado y debe embarcarse en proyectos que conllevan más dificultades en su ejecución y, por tanto, mayor riesgo.

Tabla 1. PI con promociones actualmente activas en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de información de los portales Idealista y Pisos.com.

		ESTÁNDAR		
		Bajo	Medio	Alto
TIPO DE EDIFICACIÓN	Unifamiliar		Cooper Actívat ¹ Alena promotores ² Aedas Homes ¹ Hi!Real Estate ¹ Grupo Ferrocarril ¹ Kampodomo ¹ Zanda Homes ² Aldesa Home ¹	Iberdrola ² Design & Häuser ² Aedas Homes ¹ Hi! Real Estate ¹ Wilcox ¹ Momentum Real Estate ² Nuevo Valkey ¹ Reintor ²
	Multifamiliar	Camporosso ¹ Alcalá Home ² Amenábar Promociones ¹ Servihabitat ² Adania ² Factory Casas ² Hola pisos ² Altamira ²	Cooper Actívat ¹ Viveland ² SJ8 Herrería ² Camporosso ¹ ASG Homes ² Pryconsa ² Promored ² SG Villas Alcalá ² V.C.R. ² Gestilar ² Aedas Homes ¹ Amenábar Promociones ¹ Hi!Real Estate ¹ Grupo Ferrocarril ¹	Tecnohbitat ² Kampodomo ¹ Wilcox ¹ Asentis ² Premier ² Baquero indecor ² Grupo comillas 2 ² Aldesa Home ¹ Activitas ² Nuevo Valkey ¹ Salzhenia ² Solvía ¹ Sagelliv ²

2.2. Conceptualización del nuevo submodelo.

A continuación se detallan las características que tendrá el entorno (que incluye información utilizada por el submodelo 2 de AMEBA), las propiedades de los agentes (modificadas en función del estudio y caracterización realizados) y los parámetros que el usuario podrá ajustar para ejecutar distintas simulaciones de acción de estos nuevos PI.

2.1.1. Entorno.

El submodelo propuesto opera con un tamaño de píxel de 25m x 25m, equivalente a un área de 625m², y representando cada píxel la unidad mínima edificable, es decir, directamente una edificación. Además de esto, cada píxel del entorno posee diferente información asociada que define cada una de las características concretas del entorno. En primer lugar, cada píxel está caracterizado por la tipología de edificación presente. Se diferencia en las tipologías anteriormente descritas y el vacante, que define aquellos píxeles que tienen capacidad de ser edificados. Adicionalmente, cada píxel tiene información correspondiente a los factores a tener en cuenta para la simulación (Tabla 2).

Tabla 2. Caracterización del entorno. Fuente: Elaboración propia, a partir de los datos de partida del modelo de referencia. (*) indica los nuevos factores que se han incorporado.

FACTOR	DESCRIPCIÓN
Zonificación legal	Clasificación del suelo en urbano, urbanizable, no urbanizable y sistemas generales
Clasificación del uso*	Uso unifamiliar, multifamiliar o vacante
Zonificación por coste del suelo	Alto, medio o bajo coste
Distancia a zonas urbanas consolidadas	Caracteriza el atractivo de cada píxel en función de la distancia a los distintos elementos de referencia. A menor distancia, mayor atractivo
Distancia a carreteras	
Distancia a zonas de trabajo*	
Distancia a zonas verdes*	
Distancia a transporte público	Atractivo decreciente hasta una distancia de 1000m, a partir de la cual se convierte en nulo

2.1.2. Agentes.

En esta nueva propuesta, cada agente tiene una serie de variables internas que definen, por un lado, su estado, y por otro sus características distintivas que se diferencian en función de tres aspectos:

- **Acceso a información:** cada agente tiene acceso a una cantidad limitada de información en función de su posición en el entorno. Esto se traduce en un área a su alrededor sobre el que el agente puede operar denominada área de actuación. Los PI de tipo 1 actúan en un área dos veces mayor que los PI de tipo 2.
- **Adaptación al mercado:** a medida que la demanda de cada tipo de edificación se va cubriendo y se produce una saturación en el mercado de una tipología de edificación determinada, cada promotor se adapta para construir tipologías de edificaciones que aún no están cubiertas. En este sentido, un promotor, pese a querer construir un determinado tipo de edificación, necesita evitar tipologías de edificaciones que estén ya cubiertas, puesto que la saturación implica menores ventas en el futuro. De esta manera, durante la ejecución del submodelo, los PI efectúan intentos de construcción de una tipología de edificación determinada. Si no lo consiguen deberán adaptarse y construir otro tipo de edificación para obtener algún beneficio. Los PI tipo 1 necesitan “fallar” tres veces antes de optar por construir otra tipología y los de tipo 2 seis veces.
- **Preferencias de los PI:** cada tipo de promotor evalúa las características de la zona de forma distinta. Ambos aplican la ecuación 1 para evaluar la calidad de determinada zona:

$$A_{t,e} = \sum A_f \cdot \alpha_{t,e,f} \quad (1)$$

Donde $A_{t,e}$ es la aptitud del píxel para una tipología t y un estándar e ,
 A_f el valor de aptitud para cada uno de los factores f detallados en la Tabla 2 y
 $\alpha_{t,e,f}$ el coeficiente aplicado según la tipología t y estándar e para el factor f .

$\alpha_{t,e,f}$ engloba dos aspectos de una promoción: 1) qué características de una edificación de determinado tipo y estándar son las que más le interesa a la población y, 2) cómo evalúa el promotor la viabilidad económica de la nueva edificación. Estos aspectos están plasmados mediante una corrección de cada coeficiente $\alpha_{t,e,f}$ con el factor β , aplicado en forma de $\alpha = \alpha^\beta$. Para los PI de tipo 1, $\beta = 0.5$, y para los PI de tipo 2, $\beta = 1.5$.

2.1.3. Parámetros del submodelo.

Con los agentes y el entorno definido, a continuación se detallan los parámetros que podrán ser configurados por el usuario, previa ejecución del submodelo:

- **Número de iteraciones:** número de veces que se va a completar un ciclo completo de ejecución. En cada ciclo de ejecución el submodelo suplirá el total de la demanda que el usuario introduzca. Puede tomar cualquier valor entero mayor a 0.
- **Demanda de edificaciones de cada tipo:** cantidad de edificaciones que deben ser construidas de cada combinación entre tipología-estándar. Puede tomar para cada tipo cualquier valor entero mayor a 0.
- **Número de PI de cada tipo:** cantidad de agentes de cada tipo de PI que habrá en el área de estudio. Puede tomar cualquier valor entero mayor a 1.

- **Área de actuación base:** alcance, en cantidad de píxeles, que tienen todos los PI en su entorno inmediato. El área de actuación final de cada tipo de PI asegurará que el tipo 1 tiene el doble que el tipo 2, realizando para ello un aumento porcentual en el tipo 1 y una reducción en el tipo 2. Puede tomar cualquier valor entero mayor a 0.
- **Ponderación de los factores:** permite, para cada tipología y estándar, definir un valor de α para cada factor. Estos valores de α serán corregidos para cada tipo de promotor. De esta manera el usuario puede configurar cada uno de estos coeficientes para cada factor-tipología-estándar, ofreciendo una gran flexibilidad a la hora de caracterizar las simulaciones y generar distintos escenarios. Puede tomar cualquier valor entre 0 y 1 con intervalos de 0.1 para cada factor.

3. DESARROLLO DEL SUBMODELO

Habiendo expuesto todas las características y componentes del submodelo, se detalla en la Figura 2 la interfaz de usuario diseñada para interactuar con el mismo.

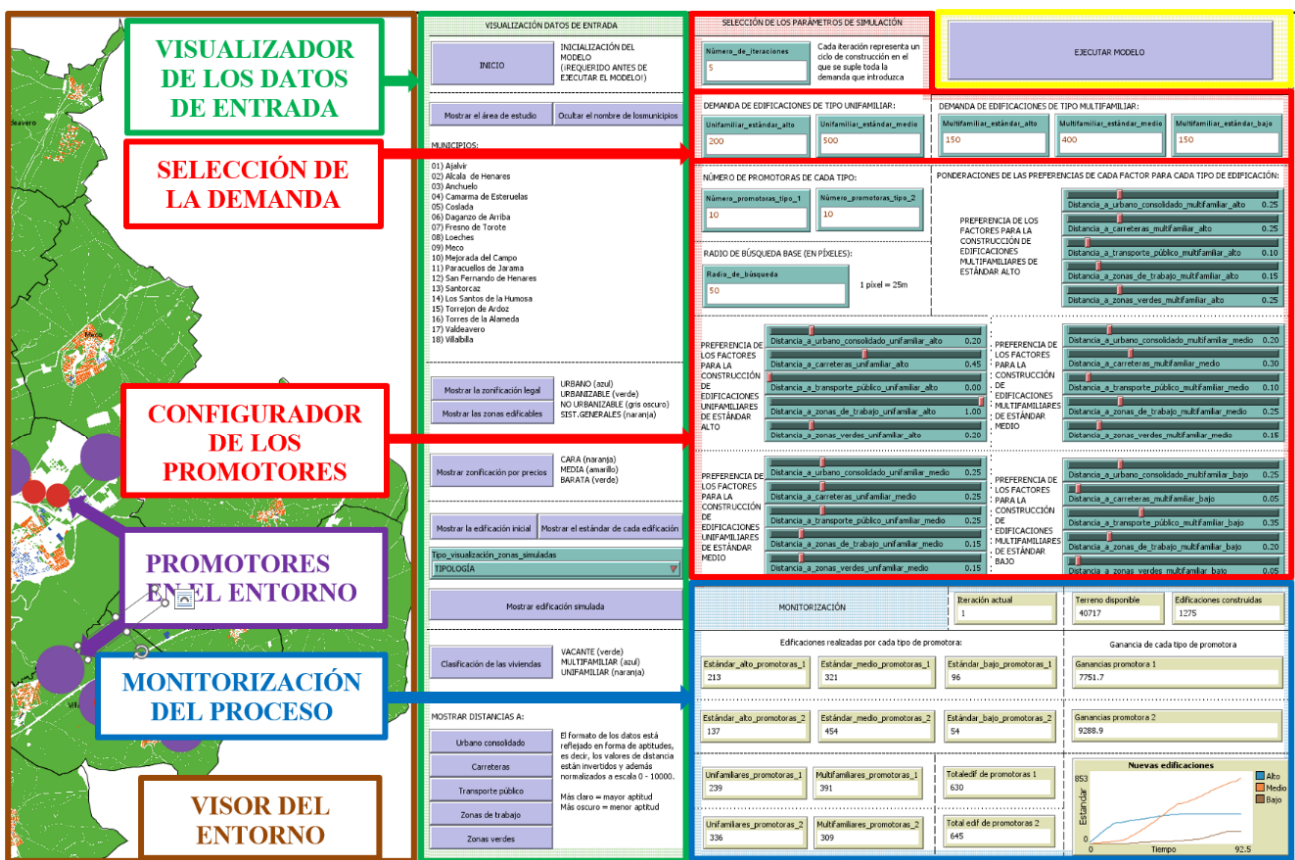


Figura 2. Interfaz del nuevo submodelo. Fuente: Elaboración propia.

La interfaz consta principalmente de tres módulos, además del visor del entorno (que se muestra de forma parcial en la Figura 2). El módulo de visualización permite escoger los datos que el visor del entorno debe mostrar. Se pueden observar todos los datos de entrada, las zonas edificables, antes y después de ejecutar el submodelo, así como los resultados de la simulación, agrupados según el criterio del usuario. El módulo de configuración permite seleccionar: a) número de iteraciones, b) cantidad que debe ser edificada en cada iteración y c) características generales de los PI. El módulo de monitorización muestra el valor de las variables relevantes a lo largo de la ejecución de la simulación. Es posible ver en todo momento la cantidad de edificaciones que cada tipo de promotor ha construido, las ganancias que han obtenido y el ritmo al que se construye cada estándar de edificación. El submodelo proporciona como salida imágenes de tipo ráster en formato ASCII con las edificaciones simuladas agrupadas de distinta manera (en función del estándar, la

tipología y ambos), así como un archivo CSV con las estadísticas de crecimiento para cada uno de los municipios de la zona de estudio. Se muestra en la Figura 3 el diagrama de secuencia en formato UML2.

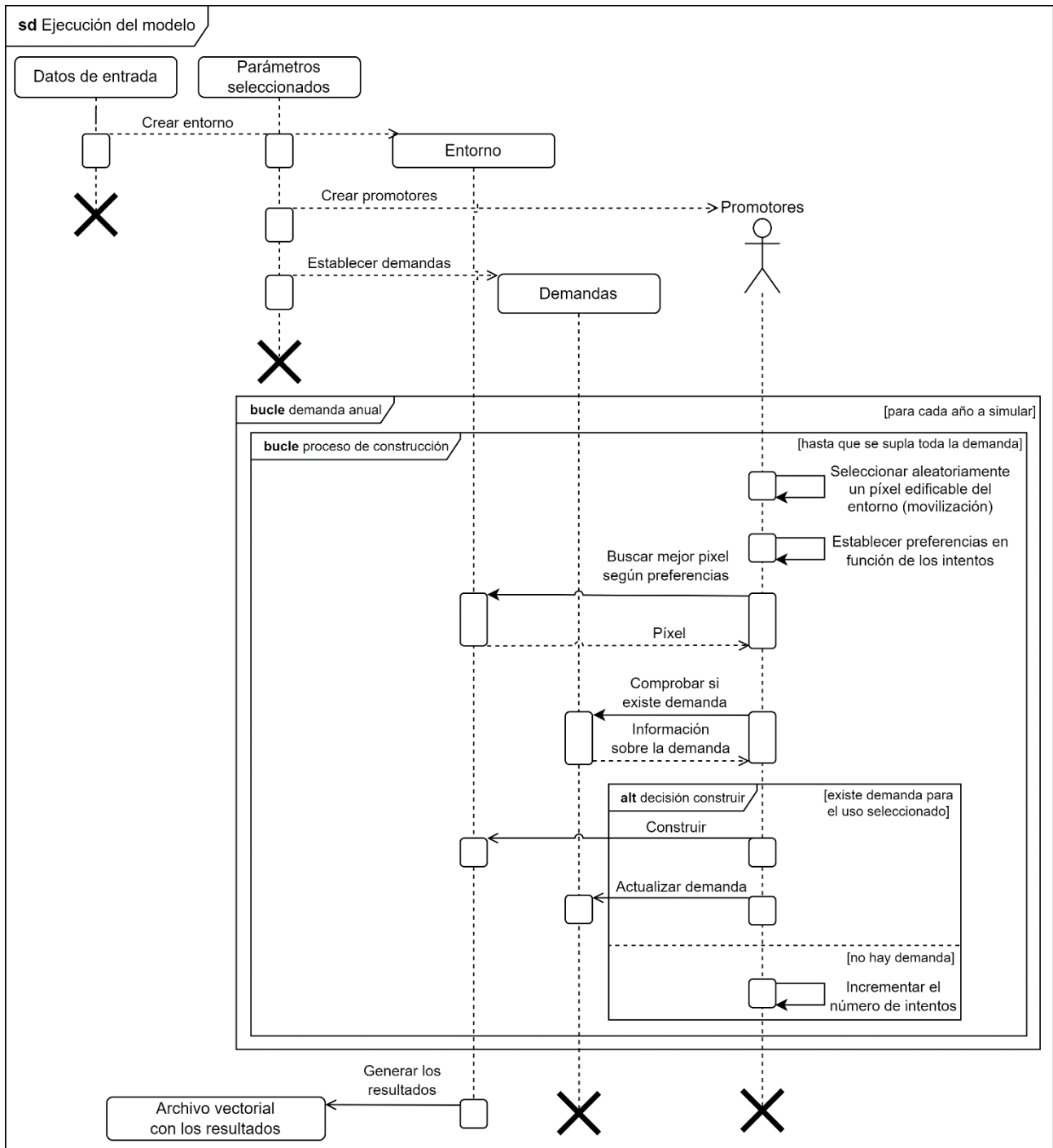


Figura 3. Diagrama de secuencias UML del submodelo. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4 muestra los resultados preliminares de una simulación realizada con 10 PI de cada tipo, un área de actuación base de 50 píxeles y 5 iteraciones equivalentes a un total de 10 años. En la zona (a), que muestra el municipio de Coslada, se pueden observar fenómenos de concentración residencial con una importante mezcla de tipología. La zona (b), que pertenece al municipio de Torres de la Alameda, muestra cómo se generan distintos focos de crecimiento con una mezcla de usos menor y con una predominancia de uso

² Lenguaje unificado de modelado (por sus siglas en inglés, *Unified Modeling Language*).

unifamiliar, reflejando las proporciones características de la zona. Para el caso de la zona (c), que refleja una parte del municipio de Alcalá de Henares, se observan distintos focos de crecimiento, tanto muy dispersos como concentrados y con importantes mezclas de tipología. Así mismo, también se han localizado las promociones que hay actualmente en curso. Si bien estos datos no están coordinados con la clasificación del catastro (algunas promociones están totalmente edificadas, y esto está reflejado en la información catastral, mientras que otras están aún en proceso), sirven como una primera comparación visual con los resultados simulados. En general se observa que el submodelo es capaz de reproducir patrones de crecimiento muy similares a los observados en las promociones actuales.

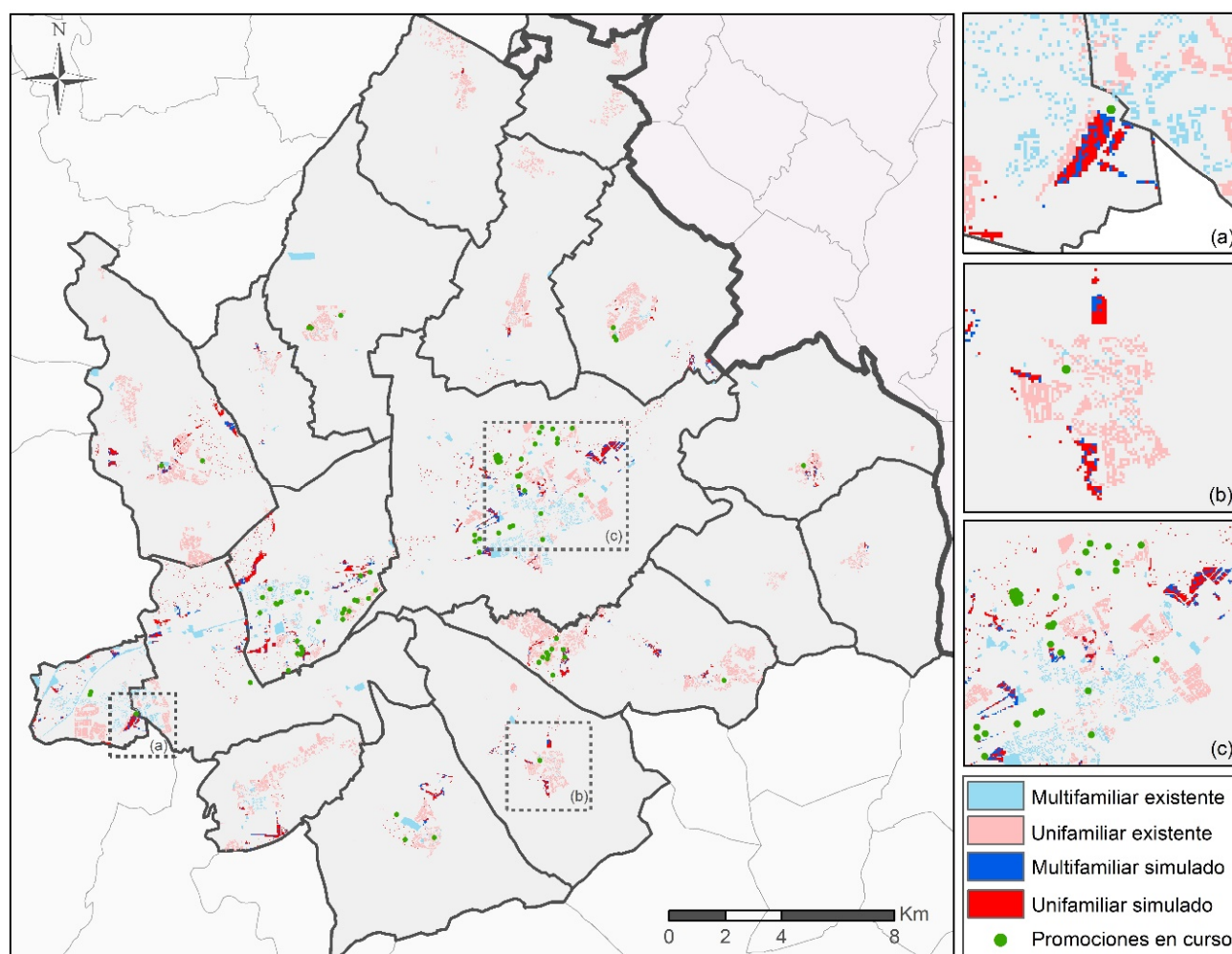


Figura 4. Resultados preliminares. Fuente: Elaboración propia

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El fenómeno de construcción residencial por parte de los PI constituye un componente clave en las dinámicas urbanas, especialmente en países como el nuestro. Sin embargo, su actividad no ha sido suficientemente reflejada y reproducida en los estudios de simulación realizados hasta ahora mediante MBAs. La acción de los PI en estos modelos suele ser bastante determinista, obedeciendo a reglas muy concretas y genéricas para todos ellos, no reproduciéndose distintos tipos de comportamiento para distintos PI, ni la posibilidad de interacción entre ellos.

Con el presente trabajo se ha intentado realizar una primera aproximación al estudio de este fenómeno mediante el desarrollo de un MBA que incorpora 2 tipos de agentes PI. Estos dos tipos de agentes responden a las características de las promociones llevadas a cabo en la zona de estudio. El mayor reto y dificultad ha sido intentar reproducir distintos comportamientos para cada promotor en función de la escasa información a la que es posible acceder, por razones evidentes de competitividad en el mercado inmobiliario. Así, somos conscientes de que el submodelo presenta todavía diversas limitaciones. Por un lado, no se ha

modelizado explícitamente procesos de competencia o negociación entre los PI, aspectos que pueden implementarse mediante un sistema de pujas o la resolución mediante teoría de juegos (Tan et al., 2015; Kaviari et al., 2019). Por otro lado, tampoco se han implementado criterios de vecindad, ni en cuanto a tipología de edificación, ni en cuanto a estándar. En este sentido, sería de utilidad añadir un factor que controle la cantidad de mezclas de uso que cada tipo de promotor está dispuesto a asumir en sus procesos de construcción.

Aun así, pensamos que el presente trabajo supone un avance modesto, pero decisivo. La complejidad del comportamiento humano y la falta de información han sido los grandes retos afrontados. La diferenciación realizada responde a un análisis lo más detallado posible de la acción de los PI de un área de estudio concreta, pero pensamos que puede ser extrapolable a otras zonas con características similares. Por otro lado, el nuevo submodelo desarrollado permite trabajar con un alto nivel de detalle, manejando hasta 5 tipos de edificaciones diferentes. Finalmente, presenta gran flexibilidad a la hora de la configuración de sus parámetros, lo que abre la posibilidad a trabajar con diferentes escenarios de futuro.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el contexto del proyecto TRANSURBAN (Simulación de escenarios colaborativos para integrar políticas de transportes urbano sostenible y usos del suelo) financiado por el *Ministerio de Economía y Competitividad de España* (CSO2017-86914-C2-1-P).

5. BIBLIOGRAFÍA

- Abar, S., Theodoropoulos, G. K., Lemarinier, P., y O'Hare, G. M. P. (2017). Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. *Computer Science Review*. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.03.001>
- Aguilera-Benavente, F., Gómez-Delgado, M., y Cantergiani, C. (2010). Instrumentos de simulación prospectiva del crecimiento urbano. *Ciudad y Territorio Estudios Territorial*, XLII(1), 481–496.
- Alghais, N., y 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>
- Calderón-Calderón, B. (2002). Ganar tamaño y territorio: fusiones de empresas y nuevos yacimientos de actividad en el sector inmobiliario español. *Investigaciones Geográficas*, 28(28), 71. <https://doi.org/10.14198/ingeo2002.28.04>
- Calderón-Calderón, B. (2004). La Ciudad Del Todo Urbanizable : Estrategias Del Sector Inmobiliario Y Nuevas E Insostenibles Formas De Urbanización . the City of “ the All Developable Land ”: Strategies of the Real Estate and New and. *Ciudades*, 8(2004), 135–155.
- Cantergiani, C., y Gómez-Delgado, M. (2018). Urban land allocation model of territorial expansion by urban planners and housing developers. *Environments*, 5(1), 1–21. <https://doi.org/10.3390/environments5010005>
- Cantergiani, C., y Gómez-Delgado, M. (2020). Simulación del crecimiento urbano con AMEBA: Modelo Basado en Agentes para la ocupación residencial. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 86. <https://doi.org/10.21138/bage.2910>
- Crooks, A., Heppenstall, A. J., y Malleon, N. (2017). Agent-Based Modeling. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09704-9>
- 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>
- Gallagher, E. M., y Bryson, J. J. (2018). Agent-Based Modelling. *Encyclopedia of Animal Cognition and Behavior*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47829-6_224-1
- Heckbert, S., Baynes, T., y Reeson, A. (2010). Agent-based modeling in ecological economics. *Annals of the New York Academy of Sciences*. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.05286.x>
- Jia, G., Shevliakova, E., Artaxo, P., De Noblet-Ducoudré, N., Houghton, R., House, J., Kitajima, K., Lennard, C., Popp, A., Sirin, A., Sukumar, R., y Verchot, L. (2019). Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Chapter 2: Land-climate interactions. *Online edition*,

available in: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCCL-Full-Report-Compiled-191128.pdf>

- Kaviari, F., Mesgari, M. S., Seidi, E., y Motieyan, H. (2019). Simulation of urban growth using agent-based modeling and game theory with different temporal resolutions. *Cities*, 95(June), 102387. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.06.018>
- Ligmann-Zielinska, A. (2009). The impact of risk-taking attitudes on a land use pattern: An agent-based model of residential development. *Journal of Land Use Science*, 4(4), 215–232. <https://doi.org/10.1080/17474230903220386>
- Macal, C. M., y North, M. J. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*. <https://doi.org/10.1057/jos.2010.3>
- Magliocca, N. R., Brown, D. G., McConnell, V. D., Nassauer, J. I., y Westbrook, S. E. (2014). Effects of alternative developer Decision-Making models on the production of ecological subdivision designs: Experimental results from an agent-based model. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 41(5), 907–927. <https://doi.org/10.1068/b130118p>
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (2020). Áreas urbanas en España 2019. *Gobierno de España*. Disponible en: <https://www.mitma.gob.es/CVP/handlers/pdfhandler.ashx?idpub=BAW070>
- Mustafa, A., Cools, M., Saadi, I., y Teller, J. (2017). Coupling agent-based, cellular automata and logistic regression into a hybrid urban expansion model (HUEM). *Land Use Policy*, 69(December 2015), 529–540. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.10.009>
- Naredo, J. M. (2010). El modelo inmobiliario español y sus consecuencias. *Boletín CF+ S*, 44, 13–27. <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n44/ajnar.html>
- Tan, R., Liu, Y., Zhou, K., Jiao, L., y 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>
- Triantakostas, D., y Mountrakis, G. (2012). Urban Growth Prediction: A Review of Computational Models and Human Perceptions. *Journal of Geographic Information System*, 04(06), 555–587. <https://doi.org/10.4236/jgis.2012.46060>
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2018). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision 2018. *Online Edition*, available in: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Highlights.pdf/>
- Zhuge, C., Shao, C., Gao, J., Dong, C., y 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.compenvurbsys.2016.02.001>