

DESARROLLO DE UN MODELO BASADO EN AGENTES PARA SIMULAR EL CRECIMIENTO URBANO: SUBMODELO DE OCUPACIÓN RESIDENCIAL

Carolina Cantergiani¹, Montserrat Gómez-Delgado¹

¹Universidad de Alcalá, Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente, Unidad Docente de Geografía, C/ Colegios, 2, 28801 Alcalá de Henares. carolina.carvalho@uah.es; montserrat.gomez@uah.es

RESUMEN

En la actualidad, y a pesar de sus interesantes posibilidades, todavía son muy escasos los Modelos Basados en Agentes (MBA) diseñados para simular procesos espaciales, en general, y relacionados con la simulación de cambios de usos del suelo y simulación de crecimiento urbano, en particular.

En esta comunicación se presenta el último de los tres submodelos de un MBA desarrollado para la simulación del crecimiento urbano condicionado por la acción de tres agentes: planificadores urbanos, promotores inmobiliarios y población. Una vez que los planificadores urbanos han establecido el suelo que se urbanizará en los próximos años, los promotores inmobiliarios promoverán la construcción (en ese suelo prefijado) de diferentes tipos de viviendas. Finalmente la población, representada en tres grupos de diferente poder adquisitivo, actuaría como agente motor que decide cambiar de residencia, generando la demanda de nuevas viviendas y configurando la expansión urbana final.

Finalizados los dos primeros submodelos, en esta comunicación se presenta el relacionado con la elección de lugar de residencia por parte de la población, siendo el más complejo de los tres. Como zona de estudio y prueba se ha elegido la sección madrileña del Corredor del Henares, una zona urbano-industrial muy consolidada, pero todavía con un volumen importante de territorio disponible y “expectante”.

Todos los submodelos están desarrollados en la plataforma *Netlogo*, que permite de manera asequible el intercambio de información espacial con un Sistema de Información Geográfica.

Palabras clave: Modelos basados en agentes; simulación del crecimiento urbano; población; Sistemas de Información Geográfica; Corredor del Henares (Madrid)

ABSTRACT

Agent-based Models (ABM) designed to simulate spatial processes are still not very popular nowadays, and in particular, the ones related to land use change and urban growth simulation.

This work presents the third of the three submodels developed in order to simulate urban growth driven by the action of three agents: urban planners, developers and population. Once urban planners establish the land to be urbanized in the next years, developers promote building (in that land) of different types of residence. Finally, the population, represented by three different income groups, act as the main actor that decides to move, generating new residential demands and so, delimitating the final urban expansion.

The first and second submodels are complete. The current document presents the third and most complex or them, showing the population behavior of *where* to choose new residence. To test this submodel, the chosen study area is the *Corredor del Henares* (at Madrid Region), a very consolidated urban-industrial zone, still presenting a significant surface available and “expectant”.

All submodels are developed in *Netlogo* that easily allows the interchange of spatial information within a Geographical Information System.

Keywords: Agent-Based Models; simulation of urban growth; Population; Geographical Information Systems; Corredor del Henares (Madrid)

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos urbanos son fenómenos de gran relevancia en la coyuntura actual de desarrollo territorial en el mundo. Su complejidad reside, principalmente, en el intento de controlar su expansión y buscar un equilibrio entre las relaciones territoriales, ambientales, culturales, económicas, etc. Entre las muchas formas disponibles para intentar comprender y reproducir este tipo de procesos territoriales, encontramos una cantidad importante de modelos espaciales, que de alguna manera representan el territorio y permiten aproximarnos al entendimiento de los cambios observados entre el pasado y el presente, o inclusive, proyectar otros hacia el futuro.

En los últimos años se ha comenzado a indagar en las posibilidades de los MBA en este campo, pues su ámbito de aplicación ha estado tradicionalmente unido a la Sociología, Ecología, Economía, etc., pero sin implicaciones espaciales o de alcance espacial reducido.

Los Modelos Basados en Agentes (MBA) son modelos celulares que simulan un determinado fenómeno a través del comportamiento de agentes autónomos que actúan teniendo en cuenta su estado y características propias, la percepción de su entorno, así como sus propios intereses, reflejados en una serie de reglas de decisión que les permiten alcanzar un objetivo prefijado y cuya actuación acaba provocando cambios en la estructura inicial del sistema (Gilbert, 2008; Cantergiani, 2011). Además son modelos híbridos, pudiendo incorporar propiedades de modelos de dinámica de sistemas, estadísticos o de flujos económicos. A través de los agentes, los MBA incorporan un aspecto comportamental, ya que estos deben representar los principales elementos involucrados en el fenómeno estudiado y, a su vez, son los actores responsables de promover los cambios que se pretenden simular. Por lo tanto, se trata de modelos que permiten a los investigadores estudiar cómo el comportamiento del sistema emerge y está conectado a las características y comportamiento de sus componentes individuales (Railsback y Grimm, 2009).

Entre los trabajos realizados en el ámbito urbano, encontramos un número significativo de ellos centrado en analizar elementos a escala local, considerando los individuos como agentes y simulando, por ejemplo, movimientos de coches y peatones en el tráfico urbano (Jiang, 2000; Torrens, 2012), procesos de evacuación de emergencia (Batty *et al.*, 2003; Crooks, 2014), modelos de segregación urbana (Barros, 2012; Feitosa *et al.*, 2011), dinámicas sociales (Fontaine y Rounsevell, 2009), promoción inmobiliaria (Filatova *et al.*, 2009; Ettema, 2011) o estudios de urbanismo (Sanders *et al.*, 1997, Pumain y Sanders, 2013). Sin embargo, no se encuentran todavía en la literatura modelos dedicados a simular el crecimiento urbano a escala supramunicipal y con datos reales (no simulaciones teóricas con datos hipotéticos), que es el objetivo del modelo integrado del que forma parte este trabajo.

En la presente comunicación se presenta el tercer submodelo de un modelo integrado que pretende simular el crecimiento urbano, como un proceso decisorio desencadenado de abajo hacia arriba (*bottom-up*). Este modelo consta de tres submodelos independientes para cada uno de los agentes diseñados como protagonistas de este proceso (en Cantergiani y Gómez, 2016 se puede encontrar una reflexión sobre la posible justificación de la consideración de estos tres agentes): planificadores urbanos (1), promotores inmobiliarios (2) y población (3). Los tres submodelos mencionados son independientes en su elaboración, pero dependientes funcionalmente, ya que los datos de entrada y los resultados obtenidos, así como la toma de decisión final, se generan en función de los productos de los demás submodelos, conforme se indica en la Figura 1.

Así, de manera resumida podemos decir que la estructura del modelo integrado se inicia con un submodelo en el que los agentes **planificadores urbanos** asignarán nuevas zonas urbanizables, partiendo de una situación de zonificación legal de partida, una serie de restricciones relacionadas con la existencia de suelo ya urbanizado, comprometido u ocupado por zonas de especial protección o con condiciones topográficas a evitar y unos factores espaciales de "atracción" que serán utilizados en función del perfil del planificador establecido por el usuario (Cantergiani *et al.*, 2014).

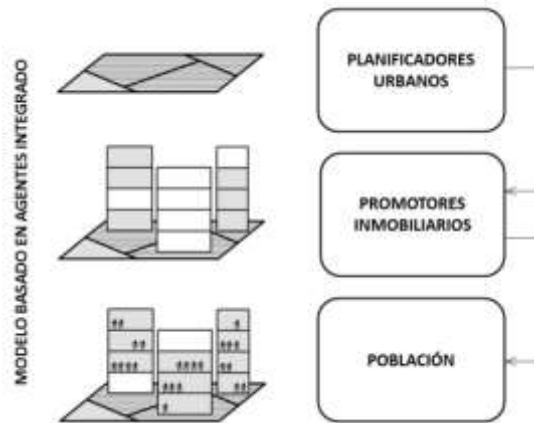


Figura 1. Estructura del modelo basado en agentes integrado para la simulación del crecimiento urbano.

El segundo submodelo de **promotores inmobiliarios** será el que definirá, en función de las zonas disponibles para urbanizar resultado de la ejecución del primer modelo, la construcción de nuevas zonas residenciales. El prototipo está diseñado de tal forma que estos promotores puedan desarrollar residencias de alto, medio o bajo estándar, según la situación del mercado en cada momento. En este caso también se definen un número de factores espaciales de atracción como la cercanía a vías de comunicación, equipamientos de transporte público, zonas urbanas consolidadas, densidad de edificación o valor del suelo.

Con el tercer submodelo se llevaría a cabo la ocupación por parte de la **población** de esas zonas residenciales propuestas por los promotores.

La entidad “población” es uno de los principales motores de este modelo. Se trata de un agente comúnmente utilizado en los MBA por contar siempre con un comportamiento humano asociado y relacionado con un fenómeno emergente (en nuestro caso ocupación de viviendas). Es evidente que la toma de decisiones humanas ejerce un papel fundamental en cualquier proceso de dinámica urbana y por ello resulta la parte más importante y crucial del modelo integrado desarrollado. Sin embargo, el comportamiento es difícil de replicar, pues la conducta humana no suele ser objetiva, no es conocida en profundidad y está determinada habitualmente por la cultura, actitudes, emociones, valores, etc., en un determinado contexto social. Si bien en el campo que podemos denominar de la psicología social se han desarrollado investigaciones sobre estos temas (Valera y Pol, 1994; Souza, 2005; Taberner *et al.*, 2015), sigue siendo complicado reproducir unos comportamientos de naturaleza humana caracterizados por una gran carga de incertidumbre.

En este trabajo se ha pretendido vincular este comportamiento con los estudios derivados de la mencionada psicología social, en tanto que los futuros residentes actuarán en relación con su entorno y en función de estímulos externos. En este sentido hemos de destacar que el agente población se encuentra presente en casi todos los MBA desarrollados en ámbito urbano, aunque es tratado de forma diversa en función del contexto y objetivo del modelo. En un gran número de ocasiones es tratado, no como un agente propiamente dicho, sino como hogares clasificados según las características de los habitantes que los componen, asignándoles diferentes comportamientos (Fontaine y Rounsevell, 2009; Feitosa *et al.*, 2011; Barros, 2012; Dahal, 2014). Lo más habitual es utilizar una clasificación socioeconómica, según volumen de ingresos (que será la utilizada en nuestro trabajo), pero también su dinámica puede estar asociada a la estructura familiar de la población (casado con hijos, soltero, jubilado, etc.).

Tras esta breve introducción sobre el estado del arte y presentación de la primera parte del modelo, a continuación se describe brevemente el área de estudio que se está utilizando como base para el desarrollo, prueba y verificación del mismo. En la sección 3 se describe la lógica del modelo y las reglas que dirigirán el comportamiento de los agentes implicados en este submodelo, así como su estructura. En el apartado 4 se presentan los resultados preliminares de los ensayos llevados a cabo, simulando distintos escenarios de expansión urbana en el área de estudio y finalmente se presentan, en el último apartado, unas breves conclusiones.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio elegida para el desarrollo y prueba de este prototipo es un corredor urbano-industrial que se extiende de Madrid hasta Guadalajara, siguiendo dos vías de comunicación de primer orden (la nacional A-2 y la vía de ferrocarril Madrid-Barcelona), así como un importante curso fluvial (el río Henares). En este caso el área se limita a la sección perteneciente a la Comunidad Autónoma de Madrid, un área que ha experimentado un fuerte proceso de expansión en las últimas dos décadas debido a la burbuja inmobiliaria (Plata Rocha *et al.*, 2009) y por encontrarse en el área de influencia de un importante motor de dinámica urbana como es la capital del país.

El eje central de este corredor está compuesto por los municipios de Coslada, San Fernando de Henares, Torrejón de Ardoz y Alcalá de Henares, existiendo un área de expansión hacia el norte y sur de este eje que en este caso hemos limitado a un total de 14 municipios. La influencia y expansión hacia los márgenes norte y sur de este privilegiado corredor se ha dejado notar en los últimos años, pero todavía existen algunos municipios con posibilidades de desarrollo para los que no se debería dejar pasar la oportunidad de realizar una planificación más equilibrada y sostenible. Por ello se considera un área de potencial interés para proceder a un análisis de la expansión urbana y simulación de su crecimiento.

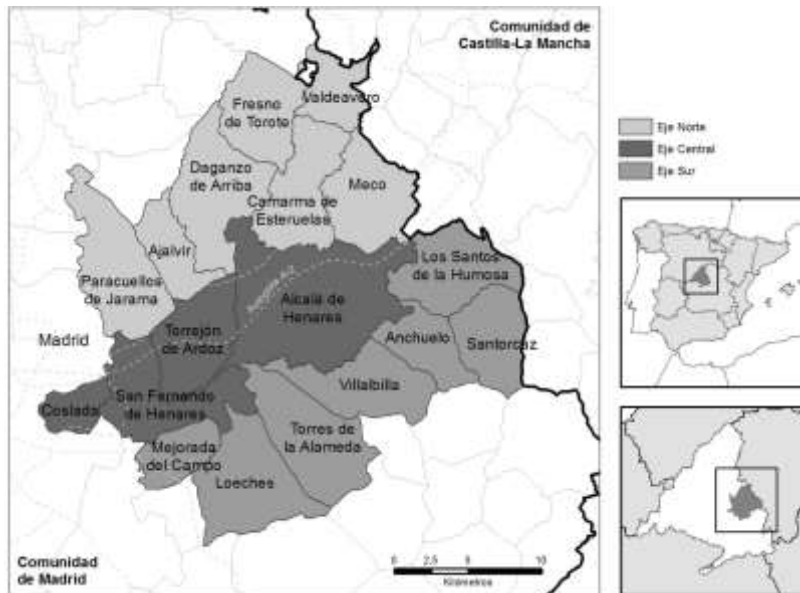


Figura 2. Delimitación del sector madrileño del Corredor del Henares, con sus ejes central, norte y sur.

3. METODOLOGÍA: LÓGICA DEL MODELO Y ESTRUCTURA

En el submodelo que se presenta, el movimiento de la población para llevar a cabo la ocupación de viviendas es motivado por una serie de fuerzas motrices definidas en el arranque del proceso. Esta búsqueda de nueva vivienda se basa en una serie de criterios de preferencia siempre distribuidos espacialmente. Estas preferencias varían según el nivel de renta, por lo que en este submodelo se establecen hasta tres tipos de agentes que actúan según su poder adquisitivo sea alto, medio o bajo. Los diferentes tipos de agentes interactúan entre ellos, cambiando su comportamiento acorde a las nuevas situaciones que van emergiendo también en su entorno. Para entender mejor la ejecución del modelo describiremos los atributos asociados a los agentes y este entorno, así como los factores a considerar por la población para ocupar una nueva vivienda.

Los agentes están caracterizados por cinco atributos (alguno de ellos dinámico y cambiante) que se combinan para producir el cambio:

- *Poder adquisitivo*: alto, medio y bajo
- *Situación* (asentado o no-asentado): indica si el agente está actualmente ubicado (asentado) en alguna vivienda o no (esta 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).

- *Nivel de satisfacción*: estando todas las viviendas tipificadas en alto, medio y bajo estándar, se considera que un agente está satisfecho si coincide con su poder adquisitivo.
- *Estado* (activo o pasivo): los agentes activos se encuentran en estado de búsqueda de vivienda (si a la vez están insatisfechos con la tipología de la vivienda donde están ubicados), mientras que los pasivos se mantienen estables, sin reacción. 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, pero que aun así se quedan en sus viviendas (por comodidad, por falta de recursos u otra razón), de aquellos que buscan condiciones más adecuadas para vivir (en función de los elementos de atracción que se definirán más adelante). De esta forma, el prototipo permite simular, no sólo procesos de expansión urbana, sino otros más sostenibles de renovación urbana, posibles procesos de gentrificación, etc.
- *Capacidad de insistencia*: hace alusión al número de ejecuciones (fijado entre 0 y 10) con intento de cambio de residencia fallido permitido para cada agente en su búsqueda de una nueva residencia. Pasado este umbral, el agente se adapta a su entorno.

Estos atributos cambian y evolucionan en cada ejecución del modelo, variando en función de lo que la población vaya seleccionando.

En cuanto a los atributos asociados al entorno sobre el que se mueven y desarrollan los agentes, se ha incluido el volumen de población, el número y tipología de vivienda disponible, nivel de ocupación (población asentada por vivienda) y capacidad máxima (distribución media de población por vivienda registrada en cada sección censal) y una serie de criterios de preferencia espacial. Todos estos datos están expresados a nivel de celda (50x50m), siguiendo el formato celular habitual de este tipo de modelos.

Como en los otros dos submodelos, los criterios de preferencia espacial están generados y modelados previamente en un SIG, en este caso definidos por la distancia a elementos territoriales como vías de comunicación, paradas de transporte público, equipamientos sanitarios y educativos o proximidad a las distintas tipologías de viviendas.

Aclaradas todas estas premisas, a continuación se presenta el diagrama de flujo que, de forma sintética y secuencial, describe las distintas acciones de la población.

Para iniciar la ejecución del modelo, el usuario establece la configuración de arranque a partir del establecimiento inicial de una serie de parámetros detallados en la figura 3 (FASE 1).

En la FASE 2 se describe la acción de los agentes respecto a la búsqueda de nueva vivienda. Hemos de advertir que el modelo se ha configurado de tal manera que haya escasos parámetros pre-fijados a la hora de su ejecución. Se trata, por tanto, de un proceso muy flexible, en el que el usuario puede tomar decisiones propias sobre un número elevado de inputs, lo que confiere a este prototipo una adaptabilidad importante para ser utilizado en distintos ámbitos de estudio y simular escenarios de muy diferente índole.

A partir de ahí, la población no satisfecha y en estado activo (FASE 2a) elegirá un punto aleatorio en el área de estudio (FASE 2b) y verificará que dentro de su área de influencia haya alguna residencia que cumpla con los criterios relacionados con su grupo de poder adquisitivo y con disponibilidad para ser ocupada. El proceso se repite hasta que se encuentre vivienda disponible o se alcance el máximo número de repeticiones permitidas (FASE 2c). Si se encuentra vivienda disponible, se procederá a comprobar que ésta cumple los requisitos establecidos para cada grupo de población (FASE 2d). Esta decisión estará vinculada a una fórmula (ecuación 1), 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:

$$Pt = ((plt * V1) + (p2t * V2) + (p3t * V3) + \dots + (pnt * Vn)) \quad (1)$$

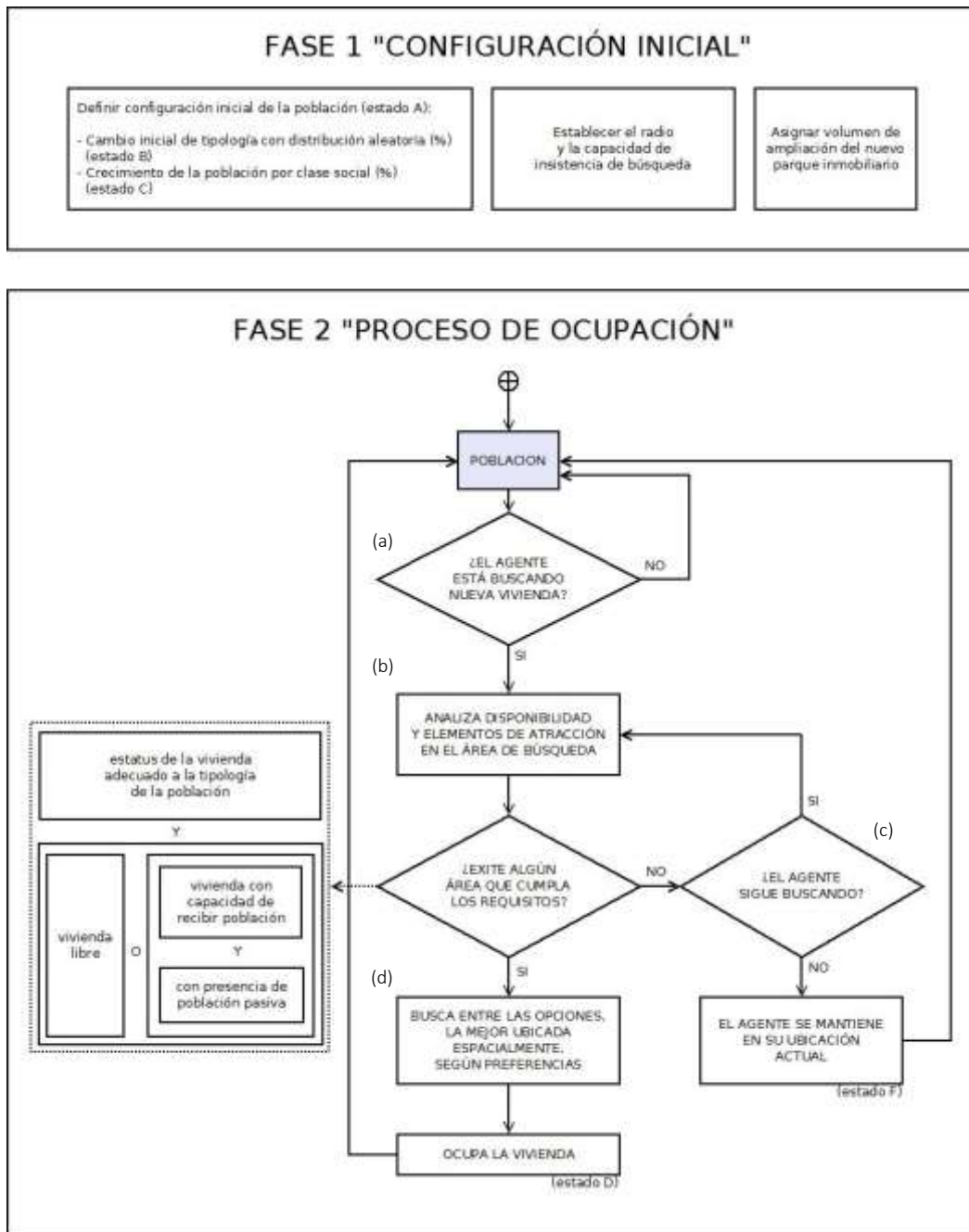


Figura 3. Diagrama de flujo que describe secuencialmente las distintas acciones por parte del agente población.

Como ejemplo, se podría establecer la siguiente ponderación en función del grupo de población:

CRITERIO ESPACIAL	Renta alta	Renta media	Renta baja
Proximidad a vías de comunicación	60	0	0
Proximidad a estaciones de transporte público	0	35	35
Proximidad a hospitales	0	20	30
Proximidad a centros universitarios	10	20	0
Proximidad a viviendas de estándar alto	25	5	0
Proximidad a viviendas de estándar medio	5	15	5
Proximidad a viviendas de estándar bajo	0	5	30
Suma:	100	100	100

Tabla 1. Ejemplo de ponderación de los distintos criterios espaciales de preferencia de localización residencial en función del tipo de grupo poblacional.

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 nueva residencia; por lo que el siguiente paso consiste en una actualización del estado de ocupación y características de las zonas residenciales.

Todos los submodelos están desarrollados en la plataforma *NetLogo* (Wilensky, 1999) por disponer de una interfaz intuitiva y sencilla, y que a la vez permite la obtención de resultados muy visuales de los cambios producidos entre la situación inicial y la simulada. Además, otra ventaja importante es que *NetLogo* permite ya en sus últimas versiones el intercambio directo con datos geográficos en formato SIG.

En la siguiente imagen (figura 4) aparece la interfaz de submodelo de población, relativamente más compleja que la de los otros dos submodelos, precisamente para poder llevar a cabo una ejecución muy flexible que permita al usuario especificar un número importante de parámetros de manera independiente. Cuenta con un área de visualización de datos espaciales de entrada, un espacio para la configuración inicial de los parámetros de arranque, cuadros de resultados alfanuméricos (ej.: el volumen de población que todavía sigue sin residencia, la población que se encuentra en estado de búsqueda, las edificaciones disponibles o el crecimiento de la población de las tres tipologías) y un panel para la visualización de resultados espaciales que consisten en una actualización de la cobertura de viviendas con la nueva población asignada.



Figura 4. Interfaz gráfica diseñada en la plataforma *NETLOGO*, del submodelo de ocupación de nuevas residencias por parte de la población y sus herramientas de control.

4. RESULTADOS

Como venimos indicando, el prototipo ha sido diseñado para disponer de una gran versatilidad a la hora de configurar las condiciones iniciales de partida y, así, poder convertirse en un importante laboratorio de simulación que permita reproducir diferentes escenarios de futuro, además de poder adaptarse más fácilmente a otros contextos espaciales y socioeconómicos.

El modelo y prototipo han sido verificados a partir de la simulación de distintos escenarios con el objetivo de comprobar sus posibilidades y correcto funcionamiento. A continuación se presentan los resultados de tres escenarios con configuraciones y supuestos diferentes entre sí:

- de *boom demográfico*: caracterizado por una demanda elevada de vivienda debido a un aumento importante del volumen de población; las condiciones son aquí más flexibles, determinando un radio de búsqueda más amplio.
- de *estancamiento demográfico*: la búsqueda de vivienda es más restringida en un momento de crisis que obliga a la población a marcharse, mientras la que se queda permanece bastante estable, no realizando muchos movimientos de cambio.
- de *equilibrio demográfico*: la oferta y la demanda están más o menos equilibradas, por lo que la búsqueda es más ajustada a las necesidades y preferencias de cada grupo de población.

Los parámetros iniciales fueron calibrados de forma que reflejen las características de cada escenario, según aparece en la tabla 2.

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 (km)	0 a 1,5	25	5	15
Insistencia en la búsqueda (intentos)	1 a 10	7	7	7
Incremento número de viviendas	0 a 100	80	20	50

Tabla 2. Configuración de los parámetros iniciales para los tres escenarios futuros: boom, estancamiento y equilibrio demográfico.

En todos los escenarios se asume un lapsus temporal para cada ejecución de los diferentes submodelos de: 8 años en el caso de los planificadores, un lapsus temporal de un año para los promotores inmobiliarios y de 4 meses para la población. No obstante, y como venimos indicando, se puede fijar en función de las preferencias del usuario.

Dadas las condiciones establecidas para el primer escenario de *boom demográfico*, se prevé un flujo grande de personas moviéndose simultáneamente. Los resultados reflejan cierta dificultad en encontrar viviendas disponibles, contando con que muchos agentes acaben por agotar su capacidad de insistencia y se adapten al entorno, cambiando su situación socioeconómica. Si analizamos el flujo demográfico espacial, esto es, origen y destino de las reubicaciones de población, los resultados de este escenario muestran que la mayoría 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 (figura 5).

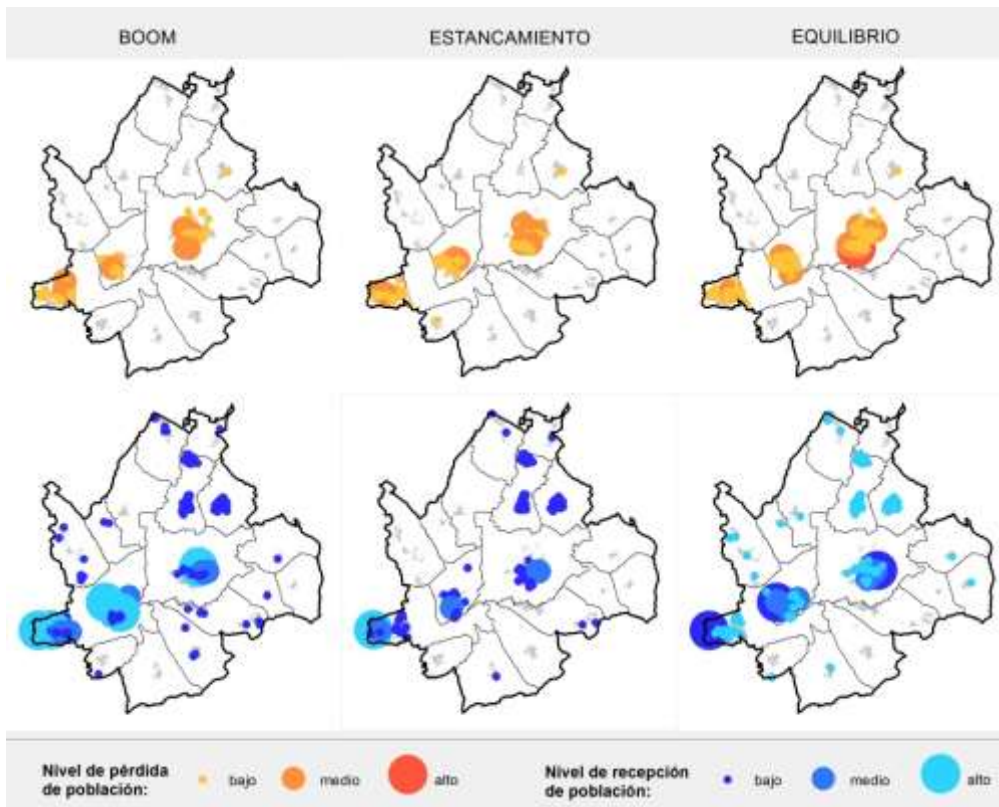


Figura 5. Resultados de reubicación de población en cada uno de los escenarios planteados: (a) boom, (b) estancamiento y (c) equilibrio demográfico.

La distribución espacial resultante del segundo escenario de *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.

Por último, podemos comprobar como también los resultados del escenario de *equilibrio demográfico* se ajustan a la situación intermedia planteada respecto a los otros dos escenarios. 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 3 aparecen algunos datos numéricos resultantes para cada escenario simulado. Como en los tres casos se optó por ejecutar el prototipo 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 en este punto de inflexión, sólo les queda adaptarse a su entorno o irse del área de estudio. Por este motivo, dichos valores de adaptación y eliminación son bastante elevados.

VALORES	ESCENARIOS					
	Boom		Estancamiento		Equilibrio	
	inicial	simulado	inicial	simulado	inicial	simulado
Población de Clase Alta	6.093	6.179	5.955	6.086	6.024	6.129
Población de Clase Media	3.468	2.612	3.206	2.554	3.274	2.586
Población de Clase Baja	3.097	3.132	3.015	3.040	3.119	3.077
Viviendas libres (vacías)	814	3.342	728	2.651	780	3.085
Población insatisfecha	1.813	0	1.331	0	1.568	0
Población eliminada	0	735	0	496	0	625
Población adaptada al entorno	0	154	0	152	0	129

Tabla 3. Comparación de los resultados de las simulaciones realizadas para cada escenario propuesto.

5. CONCLUSIONES

A continuación listamos las principales conclusiones sacadas a partir del desarrollo de esta investigación y de los resultados presentados:

- Según los resultados obtenidos, concluimos que el diferente comportamiento del agente población puede cambiar notablemente la configuración de ocupación urbana de un territorio. En este caso, las decisiones en cuanto a la búsqueda de nuevas viviendas generan una dinámica de movimiento poblacional importante.
- La interfaz del submodelo, aunque parezca complicada en un primer momento debido a la cantidad de posibles interacciones con el usuario, cuenta con pasos sencillos y accesibles en su ejecución, por lo que no resulta demasiado complicado su uso. La organización en bloques facilitó el mejor entendimiento del proceso de simulación.
- Los escenarios presentados son apenas tres ejemplos entre los numerosos que podrían generarse para la simulación prospectiva del crecimiento urbano, debido al importante número de parámetros que pueden ser prefijados por el usuario. De esta forma es posible configurar muy diversas situaciones de partida y explorar las consecuencias de los resultados de esos distintos escenarios. Esta información es de un valor incalculable a la hora de llevar a cabo cualquier propuesta de planificación territorial. Esta flexibilidad permite, por otro lado, intentar manejar de manera más adecuada la complejidad del comportamiento humano en este tipo de procesos.
- El análisis temático de los resultados, aunque no sea en sí mismo el objetivo de esta investigación, muestra una tendencia general de movimiento demográfico en el Corredor del Henares. Pese a las similitudes de los resultados numéricos alcanzados, las diferencias espaciales que se pueden identificar visualmente son interesantes, especialmente el importante flujo registrado en el ya consolidado eje central. También es destacable que ninguno de los dos márgenes pierden población en ningún escenario, aunque el que más gana siempre es el eje norte (con más elementos de “atracción”).

6. AGRADECIMIENTOS

Esta comunicación se ha realizado dentro de las actividades del proyecto de investigación coordinado *SIMURBAN2: Instrumentos de Geosimulación y planificación ambiental en la ordenación territorial de ámbitos metropolitanos. Aplicación a escalas intermedias*, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (ref. CSO2012-38158-C02-01), Subproyecto *Geosimulación de escenarios futuros de crecimiento urbano a partir de información espacial de detalle y valoración de sus resultados desde la planificación ambiental*, y parcialmente financiado por la beca IELAT-SANTANDER. Especial agradecimiento a Cesar Vergara por su aporte fundamental a la labor de programación en *NetLogo*.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Barros, J. (2012): “Exploring Urban Dynamics in Latin American Cities Using an Agent-Based Simulation Approach”, en Heppenstall, A.; Crooks, A. T.; See, L. M. y Batty, M. (Eds.): *Agent-Based Models of Geographical Systems*, Springer, pp. 571-589.
- Benenson, I., y Torrens, P. M. (2004): *Geosimulation: Automata-based modeling or urban phenomena*. John Wiley & Sons, L.
- Batty, M.; Desyllas, J. y Duxbury, E. (2003): “Safety in Numbers? Modelling Crowds and Designing Control for the Notting Hill Carnival”. *Urban Studies*, 40(8), pp. 1573-1590.
- Cantergiani, C.C. (2011): “Modelos basados en agentes aplicados a estudios urbanos: una aproximación teórica”, *Serie Geográfica*, 17, pp. 29-43.
- Cantergiani, C.C.; Gómez Delgado, M. y Vergara, C. (2014): “Desarrollo de un modelo basado en agentes para la simulación del crecimiento urbano: submodelo de asignación de nuevo suelo urbanizable”, en Ramón, A. (Ed.): *Tecnologías de la Información para nuevas formas de ver el territorio*, Alicante, Publicaciones Universidad

de Alicante, pp. 10-18. 25-27 de Junio de 2014, Alicante, XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica.

Cantergiani, C.C. y 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 AGE*, 70, pp. 259-283.

Crooks, A.T.; Patel, A. y Wise, S. (2014): "Multi-Agent Systems for Urban Planning". En Pinto, N. N.; Tenedório, J. A.; Antunes, A. P. y Roca, J. (Eds.), *Technologies for Urban and Spatial Planning: Virtual Cities and Territories*, pp. 29-56. Hershey, PA: IGI Global.

Dahal, K.R. y Chow, T.E. (2014): "An agent-integrated irregular automata model of urban land-use dynamics", *International Journal of Geographical Information Science*, 28, 11, pp. 2281-2303.

Ettema, D. (2011): "A multi-agent model of urban processes: Modelling relocation processes and price setting in housing markets". *Computers, Environment and Urban Systems*, 35(1), pp. 1-11.

Feitosa, F.F.; Le, Q.B. y 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, 2, pp.104-115.

Filatova, T.; Parker, D.C. y Van Der Veen, A. (2009): "Agent-Based Urban Land Markets: Agent's pricing behavior, land prices and urban land use change". *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 12 (1)(3).

Fontaine, C.M., y Rounsevell, M.D.A. (2009): "An agent-based approach to model futures residential pressure on a regional landscape", *Landscape Ecology*, 24, 9, pp. 1237-1254.

Gilbert, N. (2008): *Agent-Based Models*. Sage Publications.

Jiang, B. (2000): "Agent-based approach to modeling urban and environmental systems within GIS". *9th International Symposium on Spatial Data Handling*.

Plata Rocha, W., Gomez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2009): "Análisis de factores explicativos del crecimiento urbano en la CM a través de métodos estadísticos (RLO y MLA) y SIG". *Revista de Planeamiento Territorial y Urbanismo Iberoamericana*, 4.

Pumain, D. y Sanders, L. (2013): "Theoretical principles in interurban simulation models: a comparison". *Environment and Planning A*, 45, pp. 2243-2260.

Railsback, S.F., y Grimm, V. (2009): *A Course in Individual-based and Agent-based Modeling*. Princeton University Press.

Sanders, L., Pumain, D., Mathian, H., Gherin-Pace, F., y Bura, S. (1997): "SIMPOP: a multi-agents system for the study of urbanism", *Environment and Planning B*, 24, pp. 287-305.

Souza, L. (2005): *O ensino da psicologia social e suas representações. A formação do saber e o saber em formação*. PhD, UFRJ, Rio de Janeiro.

Taberner, C.; Hernández, B.; Cuadrado, E.; Luque, B. y Pereira, C.R. (2015): "A multilevel perspective to explain recycling behaviour in communities". *Journal of Environmental Management*, 159, pp. 192-201.

Torrens, P.M. (2012): "Moving agent-pedestrians through space and time". *Annals of the Association of American Geographers*, 102(1), pp. 35-66.

Valera, S. y Pol, E. (1994): "El concepto de identidad social urbana: una aproximación entre la Psicología Social y la Psicología Ambiental", *Anuario de Psicología*, 62, pp. 5-24.

Wilensky, U. (1999): NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.