

## Simulación de sociedades artificiales de agentes y autómatas celulares en Ingeniería de Organización: aplicación a la gestión del agua

José Manuel Galán Ordax<sup>1</sup>, Adolfo López Paredes<sup>2</sup>, Ricardo del Olmo Martínez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Área de Organización de Empresas. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Burgos. Avenida de Cantabria, s/n. Ed.A1.; 09006 Burgos. jmgalan@ubu.es

<sup>2</sup> Área de Organización y Gestión de Empresas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad de Valladolid. Paseo del Cauce, s/n. 47011 Valladolid. adlo@eis.uva.es

<sup>3</sup> Área de Organización de Empresas. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Burgos. Edificio "La Milanera" C/ Villadiego s/n.; 09001 Burgos. rdelolmo@ubu.es

### Resumen

*En este trabajo se ilustra con un ejemplo cómo la utilización combinada de la simulación multiagente y los autómatas celulares constituye una nueva aproximación metodológica muy útil para el estudio del comportamiento de organizaciones complejas. En el presente documento se subrayan las principales aportaciones de esta metodología en el campo de la integración de conocimiento y los procesos de participación.*

*El caso que se presenta es la construcción de un simulador de vuelo para la toma de decisiones en relación con el balance recursos-demanda doméstica de agua en la Región Metropolitana de Barcelona\*. Este simulador tiene como finalidad el análisis de escenarios y la evaluación del impacto de los procesos sociales en la demanda doméstica de agua.*

**Palabras clave:** Simulación, Sistemas Multiagente, Autómatas celulares, Gestión del agua.

### 1. Introducción

En el presente trabajo, se aborda la elaboración de un modelo de simulación social basado en agentes para el estudio del balance recursos-demanda doméstica de agua en la región Metropolitana de Barcelona (RMB). Este estudio se lleva a cabo mediante el análisis de escenarios de balance en el modelo (ver Saurí *et al*, 2003) y mediante el estudio del impacto de los procesos sociales en la demanda doméstica de agua. El que el simulador se centre en el consumo doméstico de agua y en la exploración de nuevas políticas para su evaluación, se fundamenta en que es el uso más importante en el contexto urbano y su gestión resulta una de las decisiones más controvertidas desde un punto de vista socioeconómico (Arbués *et al*, 2003).

Tanto la elaboración del modelo multiagente como su posterior validación se basan en procesos participativos en torno a una plataforma creada para tal efecto por diversas organizaciones sociales (incluyendo tanto a organizaciones públicas, como privadas y cívicas).

---

\* Este trabajo se deriva de la participación de sus autores en el proyecto de investigación financiado por la CICYT con referencia BEC-2001-2108, titulado "La Investigación Socioeconómica desde la Inteligencia Artificial: Modelos Basados en Agentes (Contribuciones en memoria de Herbert Simon)", por el proyecto FIRMA financiado por el V programa Marco de la Unión Europea con referencia EVK1-CT1999-00016 y por el proyecto de referencia VA034/04 financiado por la Junta de Castilla y León.

La elección metodológica se debe en parte a la necesidad de un enfoque integrado, como se discutirá mas adelante, y en parte a la utilidad de esta aproximación para incorporar el conocimiento y las opiniones de stakeholders y expertos, mediante procesos de participación, a modelos de simulación (ver Downing *et al*, 2001).

Este enfoque pretende cubrir el vacío dejado por herramientas más convencionales como las proyecciones de recursos y demandas de agua basadas en unas pocas variables (por ejemplo proyecciones de población absoluta y proyecciones globales de consumo de agua por cápita), cuyas insuficiencias se han resaltado por parte de diferentes autores (ver, por ejemplo, Baumann *et al*, 1998), y abordar el problema de la gestión de los recursos hídricos de forma integrada.

De hecho, son muchos los autores que argumentan la necesidad de este enfoque integrado para la valoración y el modelado de los recursos ambientales (Harris, 2002; Parker *et al*, 2002; Rotmans y Dowlatabadi, 1997). En particular la propia idiosincrasia del problema de la gestión del agua doméstica en un determinado espacio geográfico obliga a tener en cuenta tanto aspectos ambientales y físicos (Ej. factores climáticos o tecnológicos) como aspectos sociales y económicos (Ej. Patrones territoriales).

## **2. Simulación basada en agentes**

La aproximación utilizada para tratar con las fuentes de complejidad inherentes al sistema (heterogeneidad de agentes, influencia espacial y procesos autónomos) es la simulación multiagente. Se puede considerar que MABS (*Multi-agent based simulation*) es un tipo de simulación computacional en la que existe un grupo de agentes individuales (a cuya colectividad denominamos *Artificial Society*) implementados como software, cada uno con sus reglas específicas de comportamiento, que interaccionan entre ellos y con el entorno, representando un fenómeno real que simula.

En el caso del presente artículo, un agente puede ser definido como un programa auto-contenido que controla sus propias acciones en función de sus percepciones del entorno con el que interactúa. Típicamente, los agentes representan individuos humanos, aunque también pueden representar animales o colectividades como empresas, estados o instituciones.

La utilización de esta aproximación metodológica para el estudio de sistemas complejos está creciendo en la actualidad en muy diversos campos científicos, desde Economía (López-Paredes *et al*, 2002), Ecología (Janssen, 2002), Teoría Organizacional (Prietula *et al.*, 1998), Uso del suelo (Polhill *et al*, 2001)... Una explicación de este creciente interés en esta técnica, se debe a la posibilidad de incorporar de forma casi directa e intuitiva los comportamientos observados en el mundo real mediante un modelo computacional. Este hecho permite conseguir representaciones muy refinadas y detalladas de los individuos, con la esperanza de que este nivel de detalle permita mayor realismo al modelo.

En el caso de estudio específico que nos ocupa, esta característica se traduce en la posibilidad de representar la diversidad de tipos de entidades que forman el sistema y a su vez la posibilidad de representar la heterogeneidad interna de cada uno de estos tipos, evitando asumir la hipótesis de agentes representativos de la colectividad.

Aparte de permitir tratar de manera casi intuitiva con la heterogeneidad, el modelado basado en agentes permite la representación explícita del espacio y de las interacciones locales entre

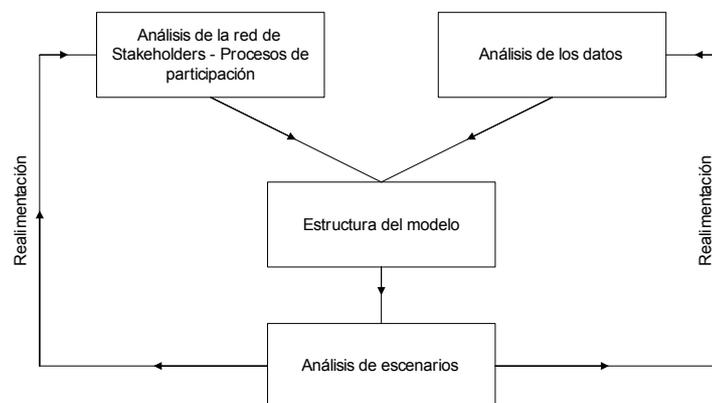
los agentes. En general, esto resulta difícil a través de modelado matemático, sin embargo mediante MABS es posible llevarlo a cabo con redes, grids o GIS (Sistemas de información geográfica).

Las características de heterogeneidad, representación espacial explícita e interacción local hacen del modelado basado en agentes una técnica más apropiada para dominios caracterizados por un alto grado de localización y distribución, dominados por la decisión discreta, frente al modelado basado en ecuaciones, más apropiado para sistemas centralizados dominados más por leyes físicas que por procesos de información (ver una completa comparación metodológica en Parunak *et al*, 1998).

### 3. Los procesos de participación y la integración de conocimiento

Por todo lo expuesto ya estaría prácticamente justificada la adopción de este tipo de simulación para el problema que nos concierne, pero además, MABS presenta dos ventajas relacionadas que sugieren su utilización:

- El enfoque interdisciplinar. Parece evidente que muchos procesos, sobretodo en aquellos en los que tiene influencia la dimensión social, no pueden ser separados de forma precisa en los subprocesos que lo componen –económicos, demográficos, culturales, espaciales-. Como señala Epstein (1999) el modelado basado en agentes llena el vacío metodológico para evitar el análisis aislado de los subprocesos de forma natural. Cuando ponemos en marcha una sociedad artificial, inevitablemente, estamos uniendo todos los subprocesos en uno solo integrado. Esta aproximación evita tener que fijar límites artificiales en la construcción de modelos.
- Los procesos de participación con stakeholders. MABS permite la posibilidad de incluir las perspectivas de los stakeholders en el diseño de los modelos. De hecho, en la actualidad existe una tendencia hacia el uso de técnicas de participación para capturar, de forma realista, el comportamiento de los actores con representatividad en el sistema (Downing *et al*, *op cit*; Moss *et al*, 2001; Pahl-Wostl, 2002). La ventaja que posee MABS para integrarse con procesos de participación es consecuencia de la relativa claridad descriptiva de los modelos basados en agentes. La posibilidad por parte de expertos en el dominio y de stakeholders de interpretar fácilmente las hipótesis de los modelos permite criticarlos y poder modificarlos. Este proceso realizado iterativamente (Ver Fig. 1) puede permitir en la fase de diseño incorporar su conocimiento e integrarlo, y constituye además un método de validación de los modelos.



**Figura 1.** Combinación de metodologías para el desarrollo de modelos (Adaptado de Pahl-Wostl, 2002)

En la elaboración específica del modelo expuesto en el presente artículo se constituyó una plataforma de entidades sociales formada por representantes de un total de nueve organizaciones (ver <http://firma.cfpm.org/regions/regbarcelona.htm>).

Para conocer las actitudes, preferencias y objetivos de estas organizaciones en relación a la gestión doméstica de agua se desarrolló en primer lugar una serie de entrevistas individuales destinadas a presentar nuestro estudio y obtener información sobre cada organización en lo que atañe a su papel de influencia en la gestión del recurso en la RMB. A continuación, se elaboró un cuestionario sobre el estado del ciclo hidrológico en el área de estudio para el que se desarrollaron un conjunto de proposiciones sobre posibles trayectorias futuras de los diferentes componentes del ciclo hidrológico en la RMB y de los factores que podrían influir en estos componentes. Las proposiciones se elaboraron teniendo en cuenta tendencias recientes climáticas, recursos disponibles, alternativas de abastecimiento y de demanda. Estas proposiciones debían ser estimadas de manera cualitativa. En total se valoraron 36 parámetros incluidos en nueve categorías: clima, usos del suelo, abastecimiento en alta, abastecimiento en baja, demanda de agua, aguas residuales, tendencias demográficas y migratorias, tendencias en la vivienda y otros.

En base a estas opiniones se elaboró un modelo de simulación donde explorar diferentes escenarios de futuro y la influencia que los diversos factores tenían sobre ellos. Estos escenarios fueron discutidos en reuniones mantenidas con la plataforma social con el propósito de seguir el esquema metodológico mostrado en la figura 1.

#### 4. El modelo de simulación

##### 4.1. Punto de partida

En esta sección se presentan los principales elementos que describen el funcionamiento del simulador. El punto de partida del modelo es el ciclo del agua consensuado por los stakeholders implicados y mostrado en la figura 2. El uso de la tierra y el clima determinan el entorno y afectan al comportamiento global del sistema, mientras que la dinámica poblacional modifica el uso del suelo y el total de demanda de agua. En la figura también se especifican los factores sociales con influencia, directa o indirecta, tanto en el uso del suelo como en la demanda de agua y que son modelados explícitamente en el simulador. Este proceso se ha llevado a cabo incluyendo una sociedad artificial de familias que se comportan de acuerdo a los atributos sociales que las caracterizan. Cada familia exhibe su propio estilo de vida y sus actitudes sociales y determinando en cada iteración los niveles de consumo del recurso real y deseado.

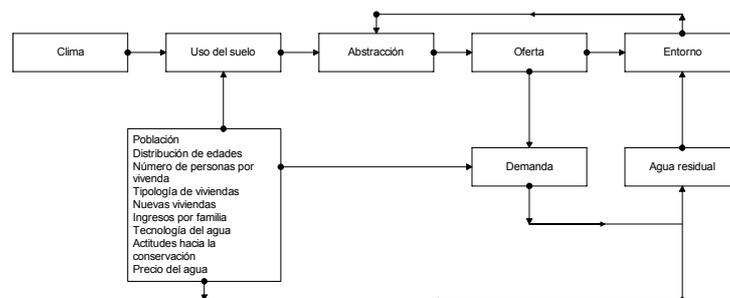


Figura 2. Diagrama del ciclo de agua (en la gestión)

Un requisito importante que debía cumplir el modelo era la inclusión de un submodelo de dinámica urbana de la región que diese soporte para simular procesos migratorios, dinámicas de crecimiento y el cambio territorial de la región. Este submodelo está basado en los modelos de dinámica urbana de Benenson (1998). Un mecanismo fundamental que explica las tendencias actuales de consumo en la región es el proceso migratorio desde la ciudad compacta hacia un urbanismo extendido o difuso. Por lo tanto resulta preciso que la sociedad artificial tenga en cuenta, mediante evolución endógena, todo este proceso migratorio. Es más, las conclusiones del análisis de diferentes escenarios de futuro confirman la influencia clave de este factor para entender los patrones de consumo.

Con el fin de modelar esta dinámica se representan explícitamente diferentes tipos de núcleos urbanos (municipios) localizados en una superficie reticular (grid). Cada uno de los municipios está organizado en vecindades o distritos. Algunos de los distritos, están dotados con un plan de desarrollo urbano que irá evolucionando a medida que la presión por la edificación de nuevas viviendas aumente.

#### **4.2. Descripción del modelo multiagente**

En el modelo desarrollado se ha utilizado la tecnología de agentes para simular los actores más relevantes del proceso del agua doméstica. Estos agentes han sido modelados para imitar el comportamiento de sus referentes reales. El principal agente de todo el modelo es la familia, pero también se puede encontrar el gobierno regional, los municipios o las compañías inmobiliarias. De la interacción entre ellos y con el entorno físico simulado se generan historias completas del proceso del agua en la región bajo diferentes condiciones.

El modelo completo contiene dos submodelos, el modelo territorial y el modelo social (ver Fig.3). También hay módulos adicionales para configurar las simulaciones, computar el comportamiento agregado, y permitir a los gestores de políticas modificar las diferentes estrategias de forma interactiva durante la simulación.

#### **4.3. El modelo territorial. Organización espacial**

El modelo territorial está situado en un grid de 100x100 celdas representando el área de estudio. En el grid se localizan tres unidades territoriales (municipios) representativos de las unidades urbanas de la región: la ciudad de Barcelona, los municipios mayores de 50000 habitantes, y los municipios en la región menores de 50000. Cada una de estas unidades territoriales ocupa un determinado número de celdas del grid. Cada celda está ocupada por un tipo de vivienda. Los diferentes estados, o tipos de vivienda que puede tener cada celda son, vivienda unifamiliar, vivienda adosada, piso o superficie no construida. Cada uno de los tipos de vivienda puede ser habitado simultáneamente por un número diferente de familias, reflejando la diferente densidad poblacional que las caracteriza. Las viviendas se denotan por  $H_{ij}$ ,  $i, j \in [1, 100]$  representando la posición geométrica que identifican a la celda en el entorno.

Cada una de las unidades territoriales (municipio en adelante) está dotada de una configuración inicial urbanizada y de un plan urbano de desarrollo. El plan urbano de desarrollo determina los tipos de edificaciones características permitidos en las zonas de crecimiento de los municipios. Estas zonas se desarrollarán dependiendo de la presión que la demanda de ese tipo de vivienda tenga en el municipio, mediante su índice de ocupación y las variaciones de precio en el mercado inmobiliario.

La configuración inicial urbanizada de cada municipio se ocupa con viviendas de acuerdo a las características iniciales especificadas en el simulador. Cada una de estas viviendas es habitada por familias, a las que se dota con atributos sociales, como su clase social, ingresos, actitud hacia la conservación, etc.

#### **4.4. El modelo social**

El agente elemental en el modelo es la familia. Cada familia está caracterizada por el número de miembros en la familia, la edad de la familia, los ingresos, la riqueza acumulada, la clase social, la actitud social las preferencias por el tipo de vivienda. Durante un periodo de simulación, las familias desarrollan su propio ciclo vital (desde el nacimiento a la muerte).

Cada familia afronta dos tipos de decisiones en cada iteración: cambio de vivienda y consumo de agua. En la primera decisión influye la satisfacción relativa que la vivienda actual proporciona a la familia. Ésta satisfacción se evalúa como media ponderada de los efectos de considerar las preferencias de vivienda de la familia, la clase social predominante en el vecindario y los precios de la vivienda en el vecindario. Cada una de las familias pondera estos efectos de forma diversa para cubrir la heterogeneidad de motivaciones en el proceso.

La otra decisión a la que se enfrentan las familias en el modelo es la decisión de consumo de agua doméstica. Esta decisión depende para cada periodo y para cada familia de la política de precios del agua, de la demanda deseada, de la oferta de agua en la región y del consumo máximo capaz de destinar cada familia al gasto en agua, función a su vez de los ingresos. En el modelo se diferencia entre consumo y demanda para ilustrar el impacto de las restricciones oficiales de agua o las limitaciones económicas propias de la familia cuando los precios son altos. La diferencia entre consumo y demanda es una medida útil de la insatisfacción social generada por las políticas de agua adoptadas.

La demanda deseada de agua de cada familia depende inicialmente de su tamaño, de los electrodomésticos utilizados en la vivienda (tipo de vivienda), de la actitud social de la familia en situaciones de escasez, y de la clase social de la familia. La demanda resultante se adapta en parte a las costumbres vecinales mediante imitación del comportamiento del entorno cercano.

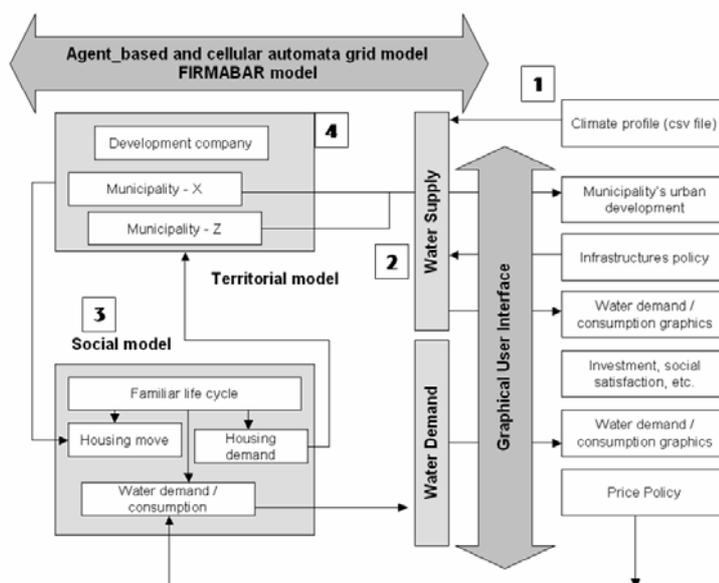


Figura 3. Dinámica del modelo

## 5. Implementación y verificación

La versión inicial del modelo fue implementada en dos plataformas de simulación multiagente diferentes. Inicialmente se creó una versión simplificada del modelo en *Strictly Declarative Modeling Language* (SDML) para crear la estructura y chequear los resultados a pequeña escala (ver detalles de SDML en Wallis y Moss, 1994 o en Moss *et al*, 1998). A partir del modelo inicial en SDML se creó un segundo modelo al que se añadieron posteriores detalles de implementación y diversas modificaciones sugeridas por los stakeholders.

La versión final del modelo ha sido implementada en Java y utilizando las librerías *Swarm* del Santa Fe Institute (Hiebeler, 1994; Minar *et al*, 1996). *Swarm* es un lenguaje de simulación multiagente para el modelado de colecciones de agentes que interactúan concurrentemente en entornos dinámicos. Su origen parte de la biología computacional (Carley y Gasser, 1999) por lo que es particularmente apto para explorar sistemas adaptativos complejos compuestos por un gran número de agentes, relativamente simples, en interacción.

*Swarm* consiste en una colección orientada a objetos de librerías de componentes reutilizables que proporcionan un conjunto flexible de herramientas para la construcción de modelos y para analizar, visualizar y controlar experimentos generados con ellos.

El componente fundamental que organiza los agentes de un modelo en *Swarm* es el "swarm". Los *swarms* son el componente básico de las simulaciones; un *swarm* no es más que la combinación de una colección de objetos (los agentes), un planificador (*scheduler*) de las actividades y eventos de esos objetos y un conjunto de datos de entrada y salida (*inputs* y *outputs*). Cada *swarm* representa un modelo completo de una simulación con su propia representación del tiempo. Los agentes interactúan mediante series de eventos discretos. Las acciones se especifican mediante una colección de métodos únicos para cada tipo o clase de agentes. El planificador especifica el orden en el que los métodos se ejecutan a lo largo del tiempo. No existe nada en el modelo que dirija específicamente el comportamiento global del

sistema. Ese comportamiento de la simulación emerge como resultado de la interacción de los individuos.

Verificación es el proceso de determinación de la bondad de ajuste de la representación computacional del modelo conceptual que implementa. Debido a la naturaleza de exploración de la simulación, en general no se posee unos requerimientos funcionales a priori con los que contrastar el funcionamiento del simulador, sino que los resultados son inesperados, por ello resulta difícil identificar un error de implementación de un comportamiento emergente del sistema, dificultando la verificación (Edmonds y Hales 2003; Galán *et al.*, 2003). En este modelo, el proyecto de verificación ha sido abordado esencialmente en dos pasos, primero a partir de los depuradores paso a paso de cada una de las plataformas de desarrollo, y posteriormente contrastando los resultados de la arquitectura inicial del modelo entre ambas plataformas.

## **6. Validación**

La validación de un modelo de simulación de un sistema complejo es una de las tareas más difíciles de la modelización de un sistema. Validación es el proceso de determinación de si el modelo conceptual y su subsiguiente implementación es una representación precisa del modelo bajo estudio para una aplicación dada. Tradicionalmente los métodos utilizados en la validación de modelos se basan en la comparación de las salidas del modelo con la realidad, con otros modelos, con resultados del modelo en situaciones degeneradas, etc. Sin embargo, cuando lo que se está tratando de modelar es un sistema complejo, la utilización de estas metodologías no está ampliamente aceptada (Brown y Kulasiri, 1996).

El proceso de validación del modelo se ha enfocado desde dos puntos de vista diferentes, desde la validación conceptual del modelo y desde la validación de las salidas generadas por el modelo (Moss y Edmonds, 2003). En ambos casos, la validación del modelo se sustenta en el proceso de participación de stakeholders y de expertos en el dominio de aplicación.

La validación conceptual del modelo es la comprobación de la corrección y razonabilidad de los fundamentos teóricos y de las suposiciones del modelo de acuerdo a su intención de uso. En el caso del modelo desarrollado, se fundamenta en la inclusión de los propios stakeholders en el proceso de modelado y en el establecimiento consensuado tanto del proceso general de simulación como de las pautas de comportamiento de cada una de las entidades del modelo.

Esta captación se ha llevado a cabo mediante encuestas, entrevistas y reuniones, y contrastando la información con datos estadísticos propios del consumo de la región. Además, el proceso de realimentación que conlleva el proceso participativo provoca que al mismo tiempo que se elaboran los fundamentos del modelo se evalúe su comportamiento global.

## **7. Conclusiones**

En el presente artículo hemos presentado una aplicación muy prometedora de la simulación social basada en agentes para la gestión del agua potable. Hemos justificado las razones que sugieren la adopción de esta metodología como alternativa a las metodologías tradicionales de balance demanda-recursos. Entre las ventajas que hemos identificado se encuentra la posibilidad conseguir representaciones muy detalladas de los individuos participantes en el sistema, captar su heterogeneidad y buscar el realismo en la representación de los procesos.

También es posible representar explícitamente el espacio y las interacciones locales entre individuos. Pero hemos hecho hincapié en el enfoque interdisciplinar y en los procesos de participación con los stakeholders. De hecho, el trabajo presentado es un ejemplo de la utilización de una plataforma con las entidades, de todo ámbito, más representativas del dominio del problema como metodología tanto para el diseño como para la validación de modelos sociales de simulación.

Se ha descrito brevemente la utilización de una sociedad artificial de familias cuyo comportamiento determina la dinámica urbana. Sus hábitos de consumo individuales, condicionados por su entorno social, político y ambiental determinan el consumo agregado de agua doméstica de la región.

El proceso de validación ha constado de dos fases, una primera, la validación conceptual del modelo, llevada a cabo mediante la inclusión de las hipótesis y las suposiciones de los stakeholders y contrastadas con los datos estadísticos recogidos de la región. Y mediante una segunda etapa en la que expertos en el dominio han validado los patrones de consumo generados en el simulador.

A pesar de que el modelo ha sido diseñado para la idiosincrasia específica de una determinada región, y para un campo de investigación muy específico, representa un ejemplo de utilización útil de la simulación basada en agentes, exportable, al menos como metodología, a otros ámbitos de aplicación

## Referencias

- Arbués, F., García, M.A., and Martínez-Espiñeira, R. (2003) Estimation of residential water demand: a state of the art review. *Journal of Socioeconomics*, Vol. 32, pp. 81-102
- Baumann, D.D., Boland, J.J. and Hanemann, W.M. (1998) *Urban Water Demand Management and Planning*. New York: McGraw-Hill.
- Benenson I. (1998) Multi-Agent Simulations of Residential Dynamics in the City. *Computing, Environment and Urban Systems*. Vol. 22, No 1. pp 25-42
- Brown T.N., Kulasiri G.D. (1996) Validating models of complex, stochastic, biological systems. *Ecological Modelling*, Vol 86, pp. 129-134.
- Carley, K. M., Gasser, L. (1999) Computational Organization Theory. In G. Weiss, editor, *Multiagent Systems. A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*, pp. 299 - 330. MIT Press, 1999.
- Downing, T.E.; Moss, S. and Pahl-Wostl C. (2001) Understanding climate policy using participatory agent-based social simulation, In *Lecture Notes in Computer Science: Multi Agent Based Simulation*. Vol. 1979. Ed by Moss,S. and Davidsson, P. Springer Verlag, Berlin.
- Edmonds, B., Hales D. (2003) Replication, Replication and Replication: Some Hard Lessons from Model Alignment. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* Vol. 6, No. 4 <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/4/11.html>>
- Epstein, J.M. (1999) Agent-based computational models and generative social science, *Complexity*, Vol 4, No 5, pp. 41-60,
- Galán, J.M., Downing, T.E., López-Paredes, A., Warwick, C. (2003) Rigour and reliability in agent-based social simulation through replication. *Proceedings of the First Conference of the European Social Simulation Association*, <<http://www.uni-koblenz.de/~kgt/ESSA/ESSA1/Galan.doc>>

- Gilbert, N., Troitzsch K.G. (1999) *Simulation for the Social Scientist*. Open University Press. Buckingham. Philadelphia.
- Harris, G. (2002) Integrated assessment and modelling: an essential way of doing science. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 17, pp. 201-207
- Hiebeler, D. (1994) The swarm simulation system and individual-based modeling. In J.M. Power, M. Strome, and T.C. Daniel, editors, *Decision Support 2001. 17th Annual Geographic Information Seminar and the Resource Technology '94 Symposium*, pp. 474-494. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1994.
- Janssen, M.A. (Ed.) (2002) *Complexity and Ecosystem Management: The Theory and Practice of Multi-Agent Systems*, Edward Elgar Publishers, Cheltenham, UK.
- López-Paredes, A., Hernández, C., Pajares, J. (2002) Towards a New Experimental Socio-economics. Complex Behaviour in Bargaining. *Journal of Socioeconomics*. Vol. 31, pp. 423-429.
- Minar, N.; Burkhart, R.; Langton, C.; and Askenazi, M. (1996). The Swarm Simulation System: A Toolkit for Building Multi-Agent Simulations. *SFI Working Paper 96-06-042, Santa Fe Institute*.
- Moss, S., Gaylard, H., Wallis, S., Edmonds, B. (1998) SDML: A Multi-Agent Language For Organizational Modelling. *Computational & Mathematical Organization Theory*. Vol. 4, No 1, pp. 43-63
- Moss, S., Pahl-Wostl, C. and Downing, T. (2001) Agent-based integrated assessment modelling: the example of climate change. *Integrated Assessment* Vol. 2, pp.17-30.
- Moss, S., Edmonds, B. (2003) Sociology and Simulation: - Statistical and Qualitative Cross-Validation. *CPM Report No.: 03-105*. <<http://cfpm.org/cpmrep105.html>>
- Pahl-Wostl, C. (2002) Agent Based Simulation in Integrated Assessment and Resources Management. In Proceedings iEMSs 2002 *Integrated Assessment and Decision Support* Vol. 2, pp. 239-245
- Parker, P. et al. (2002) Progress in integrated assessment and modelling. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 17, pp. 209-217
- Parunak, H.V.D., Savit, R. and Riolo, R.L. (1998). Agent-Based Modeling vs. Equation-Based Modeling: A Case Study and Users' Guide. In Sichman, J.S., Conte, R., and Gilbert, N. (Eds.), *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, Springer Verlag.
- Prietula, M., Carley, K., Gasser, L. (Eds) (1998) *Simulating Organizations: Computational Models of Institutions and Groups*. Cambridge, MA: The MIT Press
- Polhill, J.G., Gotts N.M., Law A.N.R. (2001) Imitative Versus Non-Imitative Strategies in a Land Use Simulation. *Cybernetics and Systems* Vol. 32, No 1-2, pp. 285-307.
- Rotmans, J. and Dowlatabadi, H (1997) Integrated Assessment Modeling, in *Human Choice and Climate Change*, eds S Rayner and E L Malone, Vol. 3, *The Tools for Policy Analysis*, Battle Press, Columbus, OH, pp. 291–377.
- Saurí, D., López-Paredes, A., Galán, J.M., Capellades, M., Rivera, M., (2003) Aproximación a la Demanda Domestica de Agua Mediante Modelos Multiagente. El Caso de la Región Metropolitana de Barcelona. *Ingeniería Civil* Vol. 131, pp. 147-151
- Schelling, T.C. (1978) *Micromotives and Macrobehavior*, New York, W.W. Norton and Company.
- Wallis, S. and Moss, S. (1994) Efficient Forward Chaining for Declarative Rules in a Multi-Agent Modelling Language. *CPM Report No.: 004*. <<http://cfpm.org/cpmrep04.html>>