

**UNIVERSIDAD DE BURGOS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**EVALUACIÓN INTEGRADORA DE POLÍTICAS DE AGUA:  
MODELADO Y SIMULACIÓN CON SOCIEDADES  
ARTIFICIALES DE AGENTES**

**TESIS DOCTORAL**

**JOSÉ MANUEL GALÁN ORDAX**

**Directores de Tesis**

**Dr. Ricardo del Olmo Martínez**

**Dr. Adolfo López Paredes**

**Burgos, 2007**



*"Simplicity is no reason, difficulty is no excuse."  
Dr. Bruce Edmonds*

## **Agradecimientos**

En el desarrollo de esta tesis doctoral me he convertido en deudor de muchas personas a las que me gustaría expresar mi agradecimiento.

En primer lugar quiero expresar mi gratitud a mis directores de tesis. Siempre me han transmitido orientación y ánimo, y han contribuido con su guía y consejo a mejorar enormemente este trabajo. Pero sin duda mi deuda con ellos va mucho más allá. He tenido la suerte de que el Dr. Adolfo López me llevase de la mano en los primeros pasos en la investigación, sin duda los más difíciles, y de que continuamente me enseñe, con la experiencia que da abrir camino, su visión del mundo científico. Al Dr. Ricardo del Olmo le debo su constante apoyo, su disposición a ayudarme y, sobre todo, la confianza que demuestra continuamente en mí. Ambos enriquecen compartiendo su experiencia y conocimiento, no sólo este trabajo sino muchos más aspectos de mi vida académica.

Al resto de compañeros del grupo INSISOC haber podido aprender de su cultura de investigación y de su inmenso conocimiento colectivo. Especialmente a su director, el Dr. Cesáreo Hernández. Su curiosidad científica, su constante renovación y su ilusión por aprender son el ejemplo y la mejor lección que se puede dar a quienes tenemos el orgullo de considerarle nuestro maestro.

Quiero agradecer a D. José Ignacio Santos las incansables horas de discusión en la carretera sobre agentes y otras muchas cosas. Tengo el privilegio de compartir con él la aventura de la vida académica y no dejar de aprender de su visión de las cosas. También merecen un agradecimiento especial los Drs. Segismundo Izquierdo y Óscar Martín porque su espíritu crítico, su capacidad intelectual, su esfuerzo y trabajo (y las cenas en La Picota) han sido luces que me han iluminado el camino.

A Luis Rodrigo Izquierdo porque nunca necesito pedirle ayuda, siempre me la da mucho antes. Es un honor y un orgullo tenerle como compañero, pero es un privilegio mucho mayor tenerle como amigo.

A mis compañeros del área de Organización de Empresas de la Universidad de Burgos, porque consiguen que no sea capaz de imaginar un lugar mejor para trabajar.

Al Departamento de Geografía de la Universidad de Valladolid por su ayuda.

A las empresas Aguas de Valladolid y Aquagest por darnos acceso a su información, y por su gentileza y disposición hacia esta investigación en todo momento.

A la Universidad de Burgos, a la Universidad de Valladolid, a la Junta de Castilla y León y al Ministerio de Educación y Ciencia que mediante sus proyectos, becas y ayudas han permitido financiar parte de este trabajo.

Mucho más allá del ámbito académico y profesional tengo que agradecer a mis padres, a mi hermano, a mis abuelas y a toda mi familia y amigos el apoyo, la confianza y el amor incondicional que me dan. Todo es mucho más fácil cuando sabes que ya tienes lo importante.

A María, porque ella es el motor de todo.

A todos, muchas gracias.

## RESUMEN

---

La gestión del agua para consumo humano se ha basado históricamente en políticas del lado de la oferta, centradas en satisfacer el abastecimiento de la demanda. Sin embargo, en la actualidad y debido a su impacto ecológico y económico están siendo sustituidas por políticas basadas en la demanda. Este cambio requiere el uso de métodos de estimación de la demanda que incorporen de forma explícita las dimensiones socioeconómica y geográfica para valorar de forma integrada el efecto combinado y aislado de las distintas políticas.

En esta tesis doctoral demostramos que la simulación y el modelado basado en agentes constituyen una aproximación metodológica robusta y rigurosa para abordar la complejidad multidimensional de la gestión del agua doméstica en áreas metropolitanas emergentes. En particular, integramos y adaptamos diferentes submodelos sociales –de dinámicas urbanas, de difusión tecnológica y de opinión, y de consumo de agua– en un modelo basado en agentes que a su vez enlazamos con un sistema de información geográfico (SIG). El resultado es un entorno computacional programado para realizar la simulación de políticas de demanda de agua en distintos escenarios.

Hemos parametrizado el modelo general en la Región Metropolitana de Valladolid obteniendo interesantes resultados. Las conclusiones obtenidas de esta forma son difícilmente alcanzables por otra vía, empleando por ejemplo las técnicas convencionales de previsión. Mostramos de esta forma que la metodología descrita es capaz de complementar aquéllas ofreciendo visiones alternativas, realistas y rigurosas del problema.

Palabras clave: modelado basado en agentes, simulación, gestión de agua, demanda doméstica de agua, integración, sistemas de información geográficos.



## SUMMARY

---

Water management for human consumption has been traditionally based on supply side policies, aimed at meeting an estimated demand that was considered given, exogenous, and unchangeable. However, due mainly to the ecological and economic impacts of such policies, the situation is nowadays changing, and supply side policies are increasingly being replaced by policies based on demand. This shift is requiring the use of new forecasting methods to estimate and influence the demand; such methods should ideally include the socioeconomic and geographic dimensions of the problem explicitly, so the coupled and isolated effects of different policies can be properly assessed in an integrated fashion.

In this doctoral thesis we demonstrate that the combination of agent based modelling and simulation is a robust and rigorous methodological approach for dealing with the multidimensional complexity of freshwater management in emergent metropolitan areas. In particular, we integrate and adapt different social submodels –models of urban dynamics, water consumption, and technological and opinion diffusion– in an agent based model that is, in turn, linked with a geographic information system (GIS). The result is a computational environment that enables the simulation and comparison of various water demand policies under different scenarios.

We have successfully parameterized the general model for the Metropolitan Area of Valladolid, obtaining interesting results. The conclusions drawn in this way would have been difficult to obtain using other approaches, such as conventional forecasting methods. We prove that the described methodology can complement conventional approaches, offering realistic and rigorous alternative insights to the problem.

Keywords: agent based modelling, simulation, water management, domestic water demand, integration, geographic information systems.



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

---

<b>RESUMEN</b> .....	<b>5</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>7</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b> .....	<b>9</b>
<b>I INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>13</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>15</b>
ANTECEDENTES.....	15
OBJETIVO .....	19
JUSTIFICACIÓN .....	20
ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO .....	26
<b>II FUNDAMENTOS</b> .....	<b>31</b>
<b>1 ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DOMÉSTICA DE AGUA</b> .....	<b>35</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	35
1.2 CONCEPTOS PREVIOS Y DEFINICIONES EN LA PREVISIÓN DE LA DEMANDA URBANA ...	38
1.3 FACTORES DE INFLUENCIA EN LA DEMANDA DOMÉSTICA DE AGUA.....	44
1.3.1 Controlabilidad de variables y gestión de la demanda.....	44
1.3.2 Clima y tiempo .....	47
1.3.3 Sistema de suministro de agua.....	47
1.3.4 Demografía y uso del suelo .....	48
1.3.5 Equipamiento de utilización de agua .....	48
1.3.6 Sustitución de fuentes .....	49
1.3.7 Algunos instrumentos de gestión de la demanda.....	50
1.3.8 Otros factores.....	53
1.4 MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DOMÉSTICA DE AGUA .....	54
1.4.1 Introducción.....	54
1.4.2 Aproximaciones <i>per cápita</i> y otros coeficientes de uso por unidad .....	55
1.4.3 Modelos de uso final.....	57
1.4.4 Modelos de extrapolación.....	59
1.4.5 Modelos causales o estructurales.....	64
1.4.6 Otras metodologías en la estimación de la demanda .....	67
<b>2 MODELADO BASADO EN AGENTES</b> .....	<b>77</b>
2.1 ANTECEDENTES AL MODELADO BASADO EN AGENTES.....	77
2.1.1 Agentes .....	78
2.1.2 Investigar para hacer mejores agentes y hacer mejores agentes para investigar.....	80
2.2 EL ARTE DE MODELAR Y LOS MODELOS DE SIMULACIÓN .....	85
2.2.1 Hacer modelos .....	86
2.2.2 Tres sistemas simbólicos para modelos sociales .....	87
2.3 MODELADO BASADO EN AGENTES .....	91
2.3.1 Concepto .....	91
2.3.2 Terminología y diferentes usos de ABM.....	95
2.4 METODOLOGÍA EN ABM .....	101

2.4.1	Marco general .....	101
2.4.2	Programar un modelo y analizar los resultados .....	106
2.4.3	Compartir los resultados .....	108
2.4.4	Replicación, verificación y validación de modelos .....	116
2.5	FORTALEZAS Y DEBILIDADES DEL MODELADO BASADO EN AGENTES .....	119
2.5.1	Puntos fuertes del modelado basado en agentes .....	120
2.5.2	Puntos débiles del modelado basado en agentes .....	124
<b>3</b>	<b>GESTIÓN DE AGUA CON SOCIEDADES ARTIFICIALES DE AGENTES .....</b>	<b>129</b>
3.1	MODELADO BASADO EN AGENTES EN LA GESTIÓN DE RECURSOS NATURALES .....	129
3.1.1	Introducción .....	129
3.1.2	Modelos de simulación como herramientas de investigación .....	130
3.1.3	Modelos de simulación como herramientas de entrenamiento y aprendizaje .....	131
3.1.4	Modelos de simulación como herramientas de soporte a la decisión y negociación .....	131
3.1.5	Taxonomía de los modelos basados en agentes en la gestión ambiental .....	132
3.2	MODELADO BASADO EN AGENTES Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA .....	135
3.2.1	Introducción a los SIG .....	135
3.2.2	SIG y sistemas de modelado. Acoplamiento SIG-ABM .....	138
3.2.3	Niveles de integración actual. Principales modelos .....	140
3.3	PRINCIPALES MODELOS BASADOS EN AGENTES EN EL DOMINIO DEL AGUA .....	142
3.3.1	El modelo del Támesis .....	142
3.3.2	El modelo FIRMABAR .....	144
3.3.3	El modelo DAWN .....	149
3.3.4	El modelo de Ducrot <i>et al.</i> .....	152
3.3.5	El modelo de Kotz y Hiessl .....	154
3.3.6	El modelo de consumo con proceso de difusión de Edwards <i>et al.</i> .....	157
3.3.7	El modelo SINUSE .....	160
3.3.8	El modelo CATCHSCAPE .....	163
3.3.9	El proyecto GLOWA-Danube .....	165

### **III APLICACIÓN .....** **167**

<b>4</b>	<b>MODELO INTEGRADO DE CONSUMO .....</b>	<b>171</b>
4.1	EL MODELO URBANO .....	171
4.1.1	Modelos urbanos .....	171
4.1.2	Modelo general. El modelo original de Benenson .....	174
4.1.3	Modelo específico. Adaptación del modelo de Benenson .....	179
4.2	EL MODELO DE DIFUSIÓN DE COMPORTAMIENTO .....	192
4.2.1	Los modelos de Young y Edwards <i>et al.</i> .....	192
4.2.2	Adaptación del modelo .....	194
4.3	EL MODELO DE DIFUSIÓN TECNOLÓGICA .....	196
4.3.1	Modelo clásico de difusión de la innovación .....	196
4.3.2	El modelo de Bass .....	201
4.3.3	Adaptación del modelo de Bass .....	204
4.4	EL MODELO DE CONSUMO .....	207
<b>5</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>213</b>
5.1	CONFIGURACIÓN DE ESCENARIOS .....	213
5.2	ESCENARIO 1 .....	215
5.2.1	Escenario básico .....	216
5.2.2	Efecto del parámetro $e_s$ en la difusión de comportamiento .....	221
5.2.3	Efecto de los modelos de difusión tecnológica .....	226
5.3	ESCENARIO 2 .....	236
5.3.1	Escenario básico .....	237
5.3.2	Efecto del parámetro $e_s$ en la difusión de comportamiento .....	243
5.3.3	Cambiando la tipología de viviendas del alfoz .....	252

5.4	ESCENARIO 3.....	254
5.4.1	Escenario básico y tipología de vivienda.....	254
5.4.2	Efecto del parámetro $e_S$ en la difusión de comportamiento.....	258
5.4.3	Efecto de los modelos de difusión tecnológica.....	260

#### **IV CONCLUSIONES ..... 265**

<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>267</b>
6.1	CONCLUSIONES METODOLÓGICAS .....	268
6.2	CONCLUSIONES EN EL DOMINIO DE APLICACIÓN .....	274
6.3	CONTINUIDAD Y EXTENSIONES.....	277

#### **V ANEXOS ..... 279**

<b>A</b>	<b>FUNDAMENTOS DE SIMULACIÓN.....</b>	<b>283</b>
A.1	DEFINICIONES Y CONCEPTOS .....	283
A.2	TIPOS Y JERARQUÍAS DE MODELOS DE SIMULACIÓN .....	286
A.3	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA SIMULACIÓN .....	288
A.4	ESTRUCTURA GENERAL DE UNA SIMULACIÓN .....	290
<b>B</b>	<b>HERRAMIENTAS Y PLATAFORMAS DE MODELADO EN ABM.....</b>	<b>297</b>
B.1	INTRODUCCIÓN.....	297
B.2	SWARM.....	299
B.3	REPAST.....	301
B.4	STRICTLY DECLARATIVE MODELLING LANGUAGE, SDML .....	304
B.5	OTRAS PLATAFORMAS Y HERRAMIENTAS .....	308
B.5.1	Ascape.....	308
B.5.2	Mason.....	309
B.5.3	AgentSheets .....	310
B.5.4	StarLogo y NetLogo.....	311
B.5.5	Cormas .....	313
B.5.6	MAS-SOC.....	314
B.5.7	PS-I .....	314
B.5.8	SeSam .....	315
B.5.9	Quicksilver .....	315
B.5.10	VSEit.....	315
B.5.11	MAML .....	316
B.5.12	Sim2Web.....	316
B.5.13	SimBioSys.....	317
B.5.14	LSD .....	317
B.5.15	MIMOSE - LispStat .....	317
B.5.16	ACT-R.....	318
B.5.17	Ingenias .....	318
<b>C</b>	<b>FUENTES DE INFORMACIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS.....</b>	<b>323</b>
C.1	FUENTES DE INFORMACIÓN .....	323
C.2	DETERMINACIÓN DE LA TIPOLOGÍA DE VIVIENDA DE CADA MANZANA.....	324
C.3	DETERMINACIÓN DEL CONSUMO DOMÉSTICO POR MANZANA .....	335
C.4	CÁLCULO DE VECINDADES .....	345
C.5	OTRA INFORMACIÓN UTILIZADA .....	347
C.5.1	Cálculo de la actitud social inicial de la población .....	347
C.5.2	Gestión de agua en el alfoz .....	348
C.5.3	Número de miembros de las familias.....	349

#### **REFERENCIAS..... 351**

**ÍNDICE DE TÉRMINOS..... 379**

**ÍNDICE DE FIGURAS..... 383**

**ÍNDICE DE TABLAS..... 389**

---

## **I INTRODUCCIÓN**



## Antecedentes

En 2001 abordé la decisión de elegir como proyecto final de carrera “*Ingeniería de los Mercados Financieros y Programación de Sistemas Multiagente: Una aproximación desde Swarm*”. Comenzaba así mi interés (y mi carrera) en la investigación como una forma de vida alternativa a las opciones de incorporarme como ingeniero a una empresa o preparar oposiciones.

El proyecto final de carrera se encuadraba en el programa de investigación del Grupo INSISOC (INGeniería de los SISTemas SOCiales) de la Universidad de Valladolid.

INSISOC emerge como resultado del trabajo desempeñado años atrás por el Prof. Dr. Cesáreo Hernández dirigiendo la tesis doctoral “*Análisis e Ingeniería de la Instituciones Económicas. Una metodología basada en agentes*”, realizada por el Dr. Adolfo López-Paredes. No obstante, su trabajo seminal (Hernández y Hernández, 1981) ya auspiciaba lo que se convertiría a la postre en el objetivo del grupo “*fomentar la investigación y modelado del comportamiento agregado de los sistemas sociales complejos, a partir de los comportamientos de los individuos que integran el sistema*”.

A pesar de ser un grupo de investigación joven<sup>1</sup> y de que en su fase inicial adoptó una metodología completamente heterodoxa e innovadora, en la actualidad, con casi una veintena de investigadores, es uno de los grupos de investigación en el campo con más presencia en el panorama nacional.

El apoyo y asistencia de los profesores del *Centre for Policy Modelling*, y en particular de su Director, el Profesor Scott Moss, fueron claves en los primeros pasos de INSISOC. Los resultados del grupo dirigido por el Profesor Hernández se materializan en las primeras tesis doctorales en nuestro país que incluyen el modelado basado en agentes en las ciencias sociales en general, y en la ciencia

---

<sup>1</sup> Se considera como hito inicial del grupo el artículo presentado precisamente por los directores de esta tesis, el Dr. López-Paredes y el Dr. del Olmo en 1998 “*The Social Dimension of Economics and Multiagent Systems*” (López-Paredes y del Olmo, 1998)

económica en particular, como una tercera vía en la investigación científica: López-Paredes (2000), Pajares (2001), Posada (2005), Pascual (2006).

El grupo fue pionero en la publicación de los primeros manuales sobre modelado basado en agentes escritos en español. Señalar entre ellos el libro “*Ingeniería de Sistemas Sociales. Diseño, Modelado y Simulación de Sociedades Artificiales de Agentes*” (López-Paredes, 2004) que toma el nombre del grupo de investigación. Otros volúmenes publicados en castellano que han contribuido a la difusión de las actividades del grupo y a la internacionalización de sus actividades han sido: López-Paredes (2001), Aguilera y López-Paredes (2001), Aguilera (2002); Aguilera, López-Paredes y Martínez Mendoza (2004a).

Actualmente se encuentra en prensa el título: “*Agent-based modelling in Natural Resources Management*”, del que son editores los artífices de los primeros pasos del grupo de investigación, los profesores Hernández y López-Paredes. En él se recogen trabajos diversos que van desde la metodología general de modelado basado en agentes a aplicaciones en la gestión de los recursos naturales en los más diversos ámbitos.

INSISOC comenzó sus trabajos aplicando la simulación basada en agentes para el estudio alternativo de problemas que no eran matemáticamente ni computacionalmente abordables desde la ciencia económica. En el período 2001-2004, el proyecto dirigido por el profesor Hernández “*ISIA: La investigación Socioeconómica desde la Inteligencia Artificial: Contribuciones en memoria de Herbert Simon*” y financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología permitió el desarrollo de numerosos trabajos relacionados con la economía como ciencia social: la caracterización de los problemas de negociación bilateral (Hernández y López-Paredes, 1999; López-Paredes, 2001; López-Paredes *et al.*, 2002) y la caracterización de comportamientos en dinámica industrial (Pajares *et al.*, 2003a; Pajares *et al.*, 2004). Posteriormente ese bagaje económico se extendió hacia el estudio del comportamiento y la reproducción de agentes artificiales en las subastas (Posada *et al.*, 2004; Posada *et al.*, 2005; Posada, 2006; Posada *et al.*, 2006a; Posada *et al.*, 2006b); el estudio de mercados artificiales (Pascual *et al.*, 2003; Pajares *et al.*, 2003b; Pajares *et al.*, 2005; Pascual *et al.*, 2006; Lavios *et al.*, 2006), imperfecciones de mercado (Izquierdo *et al.*, 2006; Izquierdo y Izquierdo, 2007); el estudio de

fenómenos de difusión de conocimiento y redes sociales complejas (Santos *et al.*, 2005; Santos *et al.*, 2006); y la teoría de juegos y de cooperación (Galán y Izquierdo, 2005; Galán *et al.*, 2005a; Izquierdo y Izquierdo, 2006; Izquierdo *et al.*, 2007).

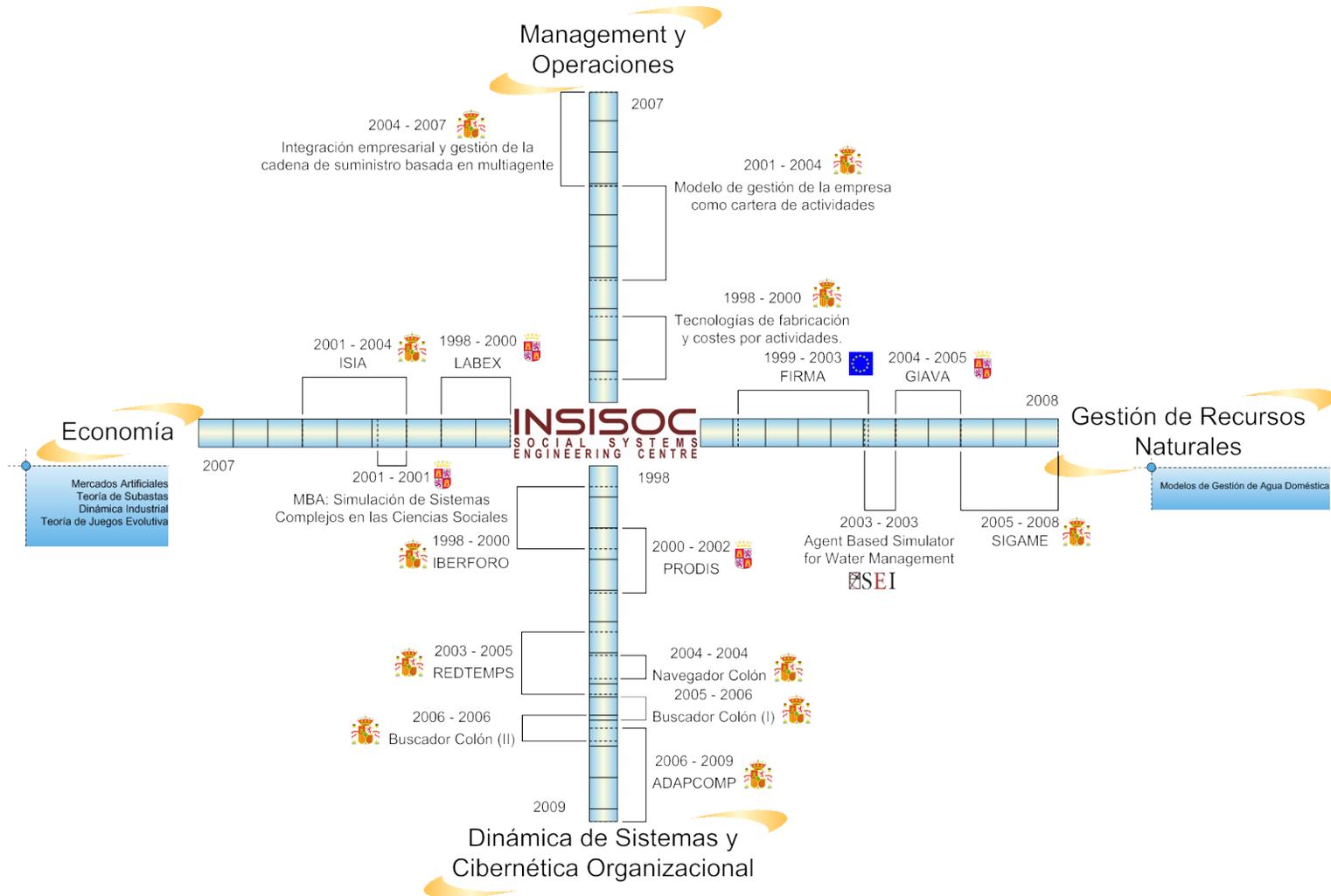
Otra línea de trabajo conducida por el Prof. del Olmo, investigador principal de “*Integración Empresarial y Gestión de la Cadena de Suministro basada en Sistemas Multiagente*”, consiste en la aplicación de los sistemas multiagente a la cadena de suministro, a problemas de *scheduling* (Arauzo *et al.*, 2004b; Arauzo *et al.*, 2004c; Arauzo *et al.*, 2004d; Arauzo *et al.*, 2005; Arauzo *et al.*, 2006), empresa virtual (Sanz *et al.*, 2004a; Sanz *et al.*, 2004b; Benito *et al.*, 2005) y a la organización de la producción en general (Arauzo *et al.*, 2003; Arauzo *et al.*, 2004a)

La participación en proyectos de investigación aplicada llevó a extender las líneas de trabajo de INSISOC hacia otros ámbitos. Uno de ellos el estudio de la gestión de recursos naturales.

Desde la obtención del título de Ingeniero Industrial entro a colaborar en un proyecto de investigación del V Programa Marco cuyo objetivo es el estudio de las políticas de agua empleando el modelado basado en agentes.

Comienzo el trabajo conducente a esta tesis doctoral al entrar a formar parte de las actividades realizadas por los miembros de INSISOC en el proyecto FIRMA, *Freshwater Integrated Resource Management with Agents*, financiado por el V programa Marco de la Unión Europea (el cual supuso en su momento el proyecto más importante de simulación social hasta la fecha en Europa). Su objetivo era “*mejorar la planificación de recursos de agua mediante el desarrollo y aplicación del modelado basado en agentes para integrar aspectos físicos, hidrológicos, sociales y económicos de la gestión de agua*”.

Dicho proyecto dio como resultado el modelo FIRMABAR (López-Paredes *et al.*, 2005), piedra angular del trabajo realizado en esta tesis, y que se analizará de manera pormenorizada en el documento.



**Figura 1.** Algunas líneas de investigación en INSISOC (financiación mediante proyectos y contratos de investigación). En el gráfico representamos las tres líneas de aplicación de modelado basado en agentes en las que se trabaja en INSISOC junto con la línea de investigación en Dinámica de Sistemas y Cibernética Organizacional que dirige el Prof. Pérez Ríos. Pese a que no analizamos pormenorizadamente el trabajo en esta línea<sup>2</sup> por no estar tan metodológicamente tan conectada con el trabajo de esta tesis doctoral, tengo una deuda con el *pensamiento sistémico* que ha servido en esta tesis para adaptar el modelo de Bass como veremos a lo largo los capítulos.

<sup>2</sup> A pesar de su fructífera actividad (Pérez Ríos, 2004; Pérez Ríos, 2005; Pérez Ríos, 2006)

Al proyecto FIRMA le sucedieron otros proyectos con financiación bien privada bien pública. El primero de ellos, financiado por el *Stockholm Environment Institute-Oxford Office*, tenía como objetivo la construcción de un modelo similar al FIRMABAR para la región del Támesis y supuso nuestro primer trabajo de replicación en ABM (Galán *et al.*, 2003a).

La Junta de Castilla-León financió en el bienio 2004-2005 el proyecto “GIAVA”, *Gestión integrada del agua con agentes en el área metropolitana de Valladolid*, cuyo objeto era la adecuación del modelo FIRMABAR al emergente área metropolitana de Valladolid (Galán *et al.*, 2005b; Galán *et al.*, 2007).

El trabajo que iniciamos en el año 2002 dentro del proyecto FIRMA se extiende hasta hoy con el proyecto SIGAME (Ref.: DPI2005-05676), financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia para el período 2006-2008. Esta tesis doctoral es el fruto de la materialización de una línea comenzada años atrás aplicando la simulación basada en agentes al estudio de problemas reales, de importancia y relevancia no desdeñable y con rigor.

Aspiramos a cumplir de esta manera con una aspiración del eminente Herb’ Simon –*no más modelos de juguete*– y de nuestro no menos admirado profesor Scott Moss, quien repetidamente ha clamado porque la investigación se libere de las ataduras de lo formalmente correcto en pos de la tríada “*Relevance, Realism and Rigour*”.

Esta tesis se beneficia sin duda alguna de la experiencia y el conocimiento (tanto sustantivo como procedimental) generado en el grupo a lo largo de estos años, no sólo en la línea de recursos naturales, de la que hereda directamente, sino también del intercambio de ideas y de la cultura de investigación que se ha creado dentro del grupo INSISOC.

## Objetivo

El objetivo central del trabajo de investigación es demostrar que la simulación y el modelado basado en agentes constituyen una aproximación

metodológica robusta y rigurosa para tratar y abordar la complejidad del problema de la gestión del agua en las áreas metropolitanas emergentes. El marco de trabajo descrito en esta tesis es extrapolable al estudio de otros sistemas complejos, si bien no existen en la literatura referencias a trabajos con el Realismo y la Relevancia del problema abordado como caso de estudio.

Afirmamos que la simulación de modelos “bottom-up” (abajo-a-arriba) desarrollados bajo el marco lógico de Sistemas Multi-Agente en las Ciencias Sociales, no es simplemente una opción: es una necesidad para el progreso científico. La simulación de modelos basados en agentes permite una visión “*consilient*” (conciliadora) e integradora en las Ciencias Sociales, ya que proporciona el laboratorio del que tradicionalmente se han beneficiado las Ciencias Naturales (llamadas así quizás inadecuadamente).

Más aún, el modelado basado en agentes permite una visión integradora de la Ciencia: los sistemas complejos no pueden ser descompuestos en subsistemas físicos y subsistemas sociales, pues “*todas las cosas están ligadas, como la sangre de una misma familia*”. Se trata de dar un paso más hacia el rigor en el modelado.

En este trabajo integramos diferentes submodelos sociales con amplia aceptación y difusión en sus respectivas comunidades científicas (dinámicas poblacionales urbanas, difusión tecnológica y de opinión, y consumo de agua, principalmente) y un Sistema de Información Geográfico. El resultado es un entorno computacional programado para realizar la simulación de políticas de demanda de agua en distintos escenarios con el que hemos obtenido interesantes resultados. Las conclusiones obtenidas de esta forma son difícilmente alcanzables por otra vía, empleando por ejemplo las técnicas convencionales de previsión.

## **Justificación**

La *Valoración Integrada* (Integrated Assessment, IA), normalmente utilizada en gestión de recursos naturales, es una aproximación holística y multidisciplinar para valorar el efecto y el impacto que de forma integrada tienen sobre el recurso las actividades humanas. A pesar de que la necesidad de este tipo de aproximación está

bien documentada (Rotmans y Dowlatabadi, 1997; Downing *et al.*, 2001; Parker *et al.*, 2002; Pahl-Wostl, 2002b; Moss, 2002b; Pahl-Wostl y Hare, 2004), sin embargo todavía se está muy lejos de la puesta en práctica de herramientas de gestión que tengan en cuenta la complejidad de la interacción humano-tecnología-entorno (Pahl-Wostl, 2002a).

Muchas de las políticas de gestión de recursos aplicadas en los últimos años han provocado efectos indeseados a largo plazo. Algunos esfuerzos por controlar inundaciones han conducido a inundaciones aun más severas, determinados pesticidas han provocado resistencias inmunes y han pasado a través de las cadenas alimentarias (Pahl-Wostl, 2007), programas para incrementar la capacidad de las carreteras y reducir la congestión han dado incentivos a más gente para utilizar el automóvil, abandonar el transporte público, migrar a zonas donde dependen de forma más importante del transporte, etc., y han provocado mayores colapsos y contaminación (Sterman, 2000) o políticas para evitar fuegos han provocado fuegos aun mayores (Pahl-Wostl, 2007) por poner algunos ejemplos.

En todos estos casos los gestores infravaloraron la importancia de los efectos de realimentación, de las no-linealidades del sistema, de los retardos, de los efectos límite y en muchos casos del comportamiento adaptativo humano ante cambios en los sistemas, precisamente los conceptos que definen un sistema como complejo. Por tanto resulta crucial desarrollar métodos que permitan explorar diferentes escenarios en los que co-evoluciona la interacción humano-tecnología-entorno que comentábamos, ya sea bajo la presión de un cambio en el sistema que se produzca de forma natural o como consecuencia de una intervención de gestión planificada.

El caso de la gestión doméstica del agua representa un caso paradigmático de sistema que presenta comportamiento complejo. Mientras que su gestión se ha basado históricamente en *políticas del lado de la oferta*, centradas en satisfacer el abastecimiento de la demanda, que a su vez depende de un sistema socio-económico y tecnológico percibido como una condición de contorno exógena, hoy en día se está produciendo un cambio de paradigma en la concepción de su gestión. Las políticas de oferta, caracterizadas por un impacto ecológico y económico brutal, están perdiendo importancia frente al éxito que determinadas políticas de demanda están teniendo lugar en California o Australia. La demanda ha dejado de ser un valor para

ser estimado y se presenta ante los diferentes *stakeholders* como una oportunidad para hacer políticas de gestión.

Este cambio de paradigma, en nuestra opinión, exige también un cambio en las herramientas de ayuda a la decisión. Mientras la demanda ha sido una condición exógena del modelo, muchas de las técnicas de estimación se han basado en sistemas de predicción sin teoría, en mero ajuste predictivo pero sin proporcionar conocimiento de la estructura, y sin ella la dificultad de tomar decisiones. Si se pretende entender los mecanismos y las implicaciones que tienen lugar en las dimensiones sociales y de cambio tecnológico, es necesario representarlas explícitamente en los modelos. Es necesario representar la dimensión humana y cierto nivel de cognición. Este hecho se ve reforzado por la importancia social que está cobrando el agua como recurso y que es fácilmente detectable en los últimos años. Durante la década de los noventa, por ejemplo, más de 80.000 familias en el área metropolitana de Barcelona decidieron no pagar los impuestos de sus importes de agua facturada en lo que se llamó “*la guerra del agua de Barcelona*”. Hoy en día los problemas de escasez que afectan en general a España y las campañas de ahorro doméstico están provocando que en zonas sin problemas graves de escasez se reduzca el consumo y se salga de las zonas de operación óptimas forzando a las empresas suministradoras a aumentar los precios, etc.

Una vez que la relevancia de incluir la dimensión social en los modelos ha sido demostrada, es necesario responder una pregunta más operativa, ¿cómo incluirla? ¿cómo crear modelos que de forma explícita recojan la multidimensionalidad de los factores con influencia en la demanda de agua? (algunos de ellos dependientes de factores espaciales y que además no dependen de la misma forma con cada actor participante en el sistema) ¿cómo hacer *Integrated Assessment*? ¿cómo hacer predicción con teoría?

A lo largo de esta tesis intentaremos demostrar que el modelado basado en agentes junto con el análisis de escenarios puede complementar a las técnicas tradicionales de estimación de la demanda, ofreciendo visiones alternativas a la mayoría de ellas. Con el modelado basado en agentes tendremos un mayor control de las hipótesis del modelo, podremos profundizar en el entendimiento del sistema y

centrarnos en entender los mecanismos y las implicaciones, en hacer exploración del sistema, más allá de las predicciones exactas.

Precisamente una de las ventajas del modelado basado en agentes, que lo distingue del resto de los paradigmas de modelado, es la posibilidad de establecer correspondencia directa entre las entidades (y las interacciones) que participan en un sistema y los agentes (y sus interacciones) en un modelo (Edmonds, 2001). Este tipo de abstracción es atractiva por diversas razones; por ejemplo, conduce a descripciones más naturales del sistema de estudio, permite modelar heterogeneidad, facilita la representación explícita del entorno y de los agentes que interaccionan con él, permite el estudio bidireccional de las relaciones entre individuos y grupos, permite capturar el comportamiento emergente (ver Epstein (1999), Axtell (2000), Bonabeau (2002)). Cualquiera de estas razones justificaría su uso como herramienta de modelado, pero quizá una de las razones que, en nuestra opinión, más aproximan la metodología al marco del *Integrated Assessment* es la capacidad potencial que tiene el ABM para integrar múltiples dimensiones de decisión a través del individuo, a través del agente.

A pesar de todo este conjunto de avances hacia la precisión descriptiva, transparencia y rigor, el modelado basado en agentes tiene una contrapartida: los modelos construidos de esta manera son frecuentemente intratables utilizando análisis matemático, por lo que normalmente hemos de recurrir a la simulación computacional. Este hecho conlleva implicaciones importantes: puesto que el análisis mediante esta técnica requiere con frecuencia simulación como método de inferencia, lo que obtenemos a partir de ella son por definición soluciones del sistema deducidas del modelo. Al fin y al cabo una simulación no deja de ser un teorema, pero de una sola simulación no se conoce la robustez de esas soluciones.

La incertidumbre en las soluciones obtenidas además suele ser doble: como la mayoría de los modelos conllevan procesos estocásticos se necesitan varias simulaciones para entender cómo se *suele* comportar el modelo y no sólo cómo se *puede* comportar (Galán y Izquierdo, 2005). Tampoco sabemos qué pasa en el modelo si modificamos los parámetros de la simulación por otros parámetros. Mediante una simulación conocemos un punto de la función de soluciones (con múltiples repeticiones estimamos la esperanza, puesto que se trata de una función

estocástica). Una manera ideal de abordar este problema sería estimar la función para todas las posibles combinaciones de parámetros de los modelos, pero esto es completamente imposible pues las combinaciones de parámetros de un modelo pueden ser potencialmente infinitas y además las simulaciones de modelos con cierta complejidad tienen un coste computacional, y por tanto en tiempo, muy importante.

El último hecho de no poder simular todas las posibles combinaciones de parámetros con suficientes repeticiones para cada combinación tiene una importancia muy relevante en la metodología en general y también en esta tesis en particular, porque nos obliga a elegir para qué combinaciones de parámetros queremos explorar nuestros modelos, es decir qué escenarios queremos estudiar. El análisis de escenarios en este contexto no es más (ni menos) que evaluar la adecuación de cada una de las hipótesis del modelo (aquí nos referimos con el término hipótesis al rango de parámetros que vamos a evaluar) y eligiendo aquellas que consideremos más plausibles o que tengan una relevancia particular para ser estudiadas<sup>3</sup>, seguir la evolución del sistema que emerge bajo ese determinado espacio de hipótesis.

Si este breve análisis metodológico de ABM que hemos hecho lo contrastamos empíricamente con la cantidad de trabajo que se está realizando en los diferentes campos científicos mediante la aproximación, el resultado no nos decepcionará. La técnica ha pasado en muy pocos años de ser una aproximación de modelado heterodoxa a ser en algunos campos una de las líneas principales de investigación. A pesar de los inconvenientes que pueda tener la metodología no es extraño este fenómeno, ABM es capaz de ofrecer *insights* alternativos y complementarios en muchos campos de la ciencia. Al fin y al cabo permite incluir heterogeneidad, procesos de participación en el modelado, influencia espacial explícita, integración de modelos y multidimensionalidad de decisión en los agentes.

Pero si profundizamos un poco más en este análisis veremos que la mayoría de los modelos que se han creado de esta forma sí que analizan fenómenos con heterogeneidad y algunos incluyen efectos espaciales desde puntos de vista bastante abstractos, pero son muchísimos menos los modelos que abordan integración,

---

<sup>3</sup> Puede ocurrir que determinados escenarios no sean muy probables pero que puedan llevar a situaciones extremas o de emergencia y que por tanto resultasen relevantes para su estudio.

incluyen procesos de participación en el modelado o interacción espacial más avanzada.

Lo cierto es que mientras que se está avanzando en investigación básica y con alto grado de abstracción de forma muy importante, existen pocos modelos que aprovechen la mayoría de las ventajas que desde un punto teórico hemos mencionado que tiene ABM. Confirmando esta línea argumental, hace unos meses tuve el privilegio de ser invitado, acompañando al Prof. Dr. Cesáreo Hernández y a la Dra. Marta Posada, al *Encuentro Interdisciplinar para el Desarrollo de las Ciencias Sociales* (ENDIN) organizado por el Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA), donde en un foro marcadamente multidisciplinar se debatió precisamente el bajo nivel de aplicación que la ciencia de los sistemas complejos en general estaba teniendo, y la posibilidad de dar el salto desde los modelos que se están construyendo, en ocasiones muy abstractos, a modelos muchísimo más aplicados.

Uno de los objetivos de investigación de esta tesis es hacer un intento por llenar ese relativo vacío que existe de modelos más aplicados utilizando los mayores niveles de precisión y de realismo posibles. El modelo FIRMABAR (López-Paredes *et al.*, 2005), antecedente inmediato del modelo desarrollado en esta tesis, supuso un hito porque ha sido de los primeros modelos que utilizan una plataforma de *stakeholders* en procesos de participación, no como jugadores de juegos de rol junto con ABM, sino como actores en las etapas de modelado y validación del modelo. A pesar del interés del modelo, la propia plataforma consideraba que a pesar de ser un modelo aplicado, calibrado mediante datos reales, con interacción espacial explícita, heterogeneidad de actores y posibilidad de escenarios, era necesario reducir la abstracción y alcanzar un mayor nivel de realismo.

En esta tesis, con el fin de poder explorar una amplia variedad de escenarios, integramos en una única base de datos georeferenciada los datos de consumo proporcionados por Aguas de Valladolid con los datos socioeconómicos de los diferentes ayuntamientos de los municipios del alfoz y con cartografía de la Junta de Castilla y León mediante un Sistema de Información Geográfica. A partir de esa información creamos un entorno realista y un conjunto de agentes con el que interactúan.

Además abordamos el problema de la integración y la decisión multi-nivel de los agentes (mediante la adaptación de modelos basados en autómatas celulares regulares a SIG) implementando capacidades para la toma de decisiones de dinámica urbana y modelos de difusión, reversible en el caso del modelo de difusión de opinión, y no reversibles en el caso de difusión tecnológica. En este último caso probamos con éxito la traslación de modelos de otros paradigmas, propios de la dinámica de sistemas como el modelo de Bass, al paradigma de la simulación discreta en la que se basa nuestro modelo basado en agentes.

En cuanto a la caracterización del consumo individual adoptamos una aproximación híbrida. Puesto que en España no existen estudios de modelos de uso final de agua doméstica rigurosos, la razón es que se trata de una técnica bastante costosa, y la mayoría de los pocos estudios que existen de este tipo se localizan en California y Australia, se nos abrían dos opciones, la primera, tomar los datos de consumo de estas zonas como representativos y hacer el modelo orientado a usos finales pero con datos poco fiables, y la segunda, la opción que finalmente decidimos adoptar, aprovechar la base de datos de la región para caracterizar con precisión mediante técnicas estadísticas el consumo individual, y por tanto estar obligados a utilizar una aproximación híbrida.

## Estructura del documento

Hemos estructurado la tesis doctoral en seis capítulos y tres anexos (figura 2). Los tres primeros capítulos conforman un primer bloque que hemos englobado bajo el nombre común de **fundamentos**. Esta sección unifica los aspectos metodológicos y de dominio de aplicación de la tesis. El segundo bloque, el de **aplicación**, está formado por los capítulos cuatro y cinco de la tesis doctoral. En estos capítulos se describe el modelo de aplicación y los resultados obtenidos con el modelo bajo los diferentes escenarios analizados. En el sexto y último capítulo se analizan las conclusiones de la tesis y posibles extensiones a esta investigación.

De forma más específica, en el **primer capítulo** repasamos los principales conceptos y factores de influencia relacionados con la gestión y planificación de agua, con un especial énfasis en aquellos relacionados con la demanda urbana. Este

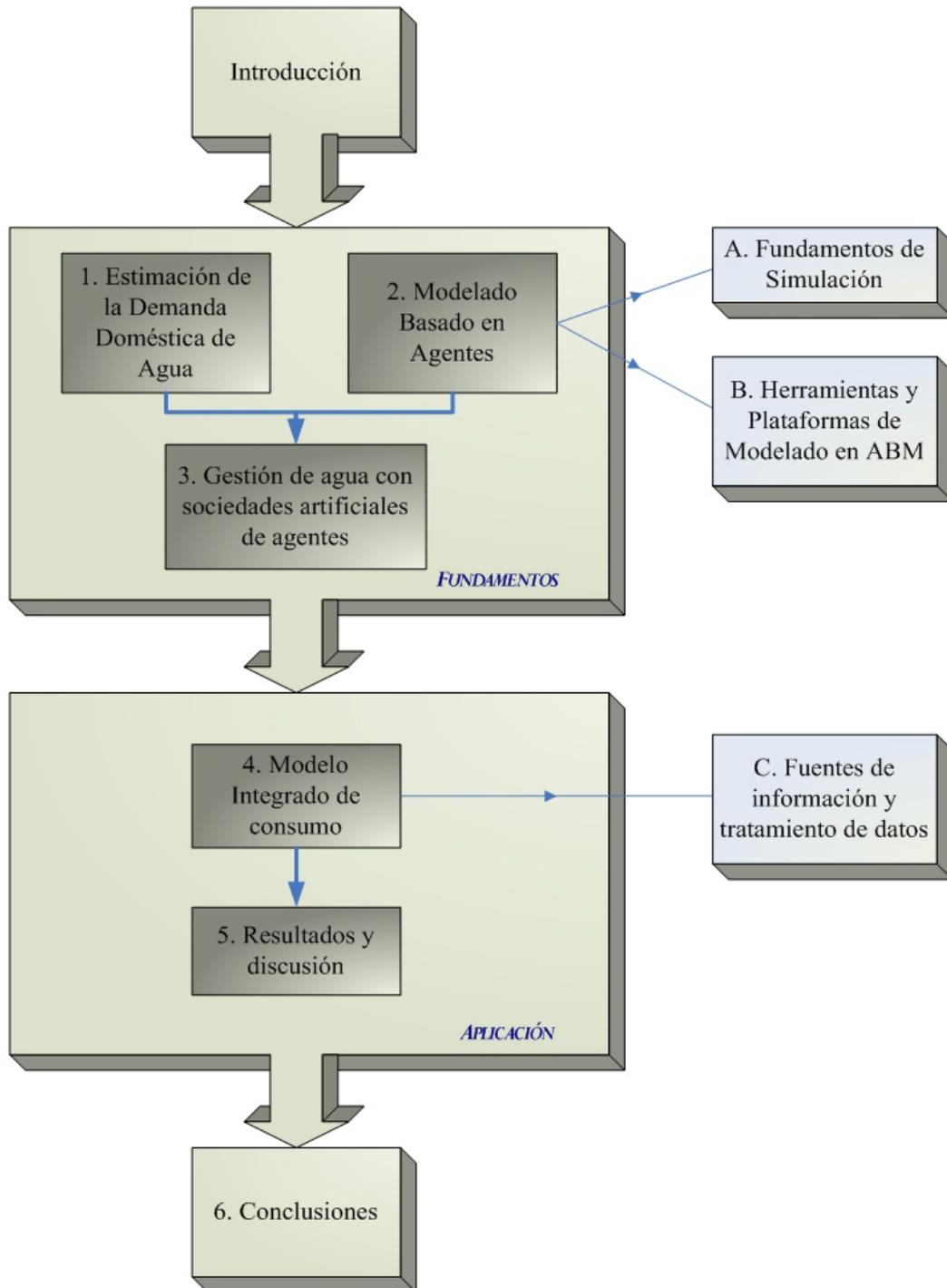
análisis permite revisar las diferentes metodologías de previsión de demanda doméstica de agua y sus ámbitos de uso. Analizamos las metodologías *per cápita* y de uso por unidad, los modelos de uso final, los modelos de extrapolación más frecuentes, los modelos causales y estructurales y otras metodologías que se utilizan como técnicas de estimación. Finalmente consideramos el análisis de escenarios como herramienta de análisis del sistema. La conclusión principal del capítulo es la posibilidad de buscar alternativas que complementen las visiones que ofrecen las metodologías tradicionales de predicción.

En el **segundo capítulo** analizamos el modelado basado en agentes, metodología que se utiliza a lo largo de la tesis para complementar las aproximaciones clásicas de previsión del capítulo anterior. Recorremos brevemente el punto de vista computacional del agente para centrarse en sus posibilidades como herramienta de modelado. Definimos nuestra visión de la metodología, justificamos la necesidad de la simulación y establecemos un marco general metodológico repasando las principales etapas del proceso. Al final del capítulo realizamos un análisis crítico de las ventajas e inconvenientes de la aproximación.

El **capítulo tres** sirve como integración de los dos capítulos anteriores. Aquí hacemos una revisión de la literatura científica más relevante en el modelado basado en agentes aplicado a la gestión del agua. Inicialmente analizamos la estructura general de los modelos basados en agentes aplicados a la gestión de los recursos naturales<sup>4</sup> y establecemos una clasificación respecto a objetivo y estructura. Posteriormente profundizamos en el tipo de representación espacial adoptada en el modelo de la tesis, los sistemas de información geográficos. En la parte final del capítulo, resumimos las características de los principales modelos publicados y aplicados a la gestión del agua, con especial énfasis en el modelo del Támesis y el modelo FIRMABAR.

---

<sup>4</sup> Donde el agua es uno en particular.



**Figura 2.** Estructura del documento

El **capítulo cuatro** describe el modelo desarrollado. Se trata de un modelo basado en agentes con aproximación híbrida en la caracterización del individuo y sobre SIG. Hemos estructurado el capítulo de acuerdo a los submodelos que lo

componen: el modelo adaptado de dinámica urbana por disonancia residencial, los modelos de difusión de comportamiento y de difusión tecnológica, y el modelo de consumo.

En el **capítulo cinco** se muestran los resultados de las simulaciones obtenidas particularizando nuestro modelo en la Región Metropolitana de Valladolid bajo tres escenarios diferentes. Cada uno de los escenarios se caracteriza por los parámetros que determinan la dinámica urbana, y se analiza bajo diferentes combinaciones y perfiles de parámetros del resto de los submodelos que integran el modelo completo.

Por último, en las **conclusiones** resumimos los resultados obtenidos en el análisis de escenarios y las lecciones metodológicas del trabajo de investigación. Indicamos también posibles extensiones de la investigación a partir de este trabajo.

En el **anexo A** analizamos los diferentes tipos de modelos de simulación en cuanto a su determinismo, al tiempo de simulación y a la dinámica del sistema. Esta clasificación ayuda a ubicar el modelado basado en agentes dentro del marco conceptual que forman los fundamentos de simulación, típicamente dentro de los modelos de eventos discretos.

En el **anexo B** revisamos las principales alternativas software disponibles para la programación computacional de modelos basados en agente.

En el **anexo C** recogemos las diferentes bases de datos y fuentes de información que hemos utilizado para la calibración del modelo para el caso de la Región Metropolitana de Valladolid. En esta parte incluimos también los estudios estadísticos y los principales algoritmos de tratamiento de datos que hemos utilizado en la tesis doctoral.



## **II FUNDAMENTOS**



# 1. Estimación de la demanda doméstica de agua

Fundamentos

*Prediction is very difficult, especially about the future.*

Niels Bohr (1885 - 1962)

## Resumen

*El objetivo principal de este capítulo es analizar las diferentes metodologías que se utilizan en la previsión de la demanda doméstica y urbana de agua. Basándonos en este análisis justificaremos en el desarrollo de esta tesis el uso del modelado basado en agentes como metodología complementaria a las técnicas tradicionales de estimación.*

*A lo largo del capítulo revisamos los procesos de planificación y gestión del agua haciendo especial énfasis en la influencia de aspectos socioeconómicos en la demanda, y su posible uso como alternativa a la tradicional gestión mediante políticas de oferta.*

*Inicialmente repasamos los principales conceptos de demanda de agua y los factores con influencia que recoge la literatura. Hacemos un recorrido por las aproximaciones formales utilizadas en la estimación de la demanda de agua, explicando brevemente su metodología y sus ámbitos de uso. Analizamos las metodologías per cápita y de uso por unidad, los modelos de uso final, los modelos de extrapolación más utilizados en el dominio de aplicación, los modelos causales y estructurales, y otras metodologías que están apareciendo como herramientas de estimación.*

*El capítulo termina con el análisis de escenarios, utilidad que pondremos en práctica para demostrar la aplicabilidad de la simulación y el modelado basado en agentes. La aproximación nos servirá como herramienta para abordar la incertidumbre, más allá de la predicción, elaborando descripciones plausibles de situaciones que sirvan como vehículo de aprendizaje de las relaciones de influencia en el sistema.*





## 1.1 Introducción

Resulta obvio que el agua es uno de los recursos naturales más importantes utilizados por el hombre. Como Alfred Marshall (1879) ya subrayaba hace más de un siglo, el agua juega un papel fundamental en la localización, crecimiento y función de las comunidades; su afirmación sigue estando completamente vigente en la actualidad. Esto ha hecho que la gestión del agua haya sido siempre un aspecto importante en cualquier sociedad.

Históricamente los procesos de planificación de la gestión de agua partían de la proyección de la población a la que se necesitaba satisfacer, estimando un uso *per cápita* de agua, y simplemente multiplicando una proyección por la otra para obtener una estimación del agua futura. A partir de esa estimación, el objetivo de los gestores consistía en identificar aquellas fuentes de oferta disponible en la región, para añadirlas apropiadamente a la oferta ya existente.

Hoy en día y sobre todo a partir de la aparición de restricciones ecológicas, financieras y políticas en las décadas de los 80 y 90, se considera que esta metodología sufre de unas importantes carencias. Existe una importante corriente de pensamiento tanto en España (Arrojo, 2003; Aguilera *et al.*, 2004b), como en el resto del mundo (Beard, 1995), que considera que el problema de la gestión de agua no es simplemente un problema de inadecuación de la oferta. En la actualidad se sabe que existe un amplio abanico de factores que juegan un influyente e importante papel en la planificación de la gestión de recursos de agua en general y específicamente en las aguas urbanas y de uso doméstico. Como consecuencia, surge la necesidad de técnicas y herramientas que capten ese grupo de factores para tenerlos en cuenta en la toma de decisiones.

Este conjunto de aspectos genera un rango mucho más amplio de alternativas para la planificación, la gestión y el establecimiento de políticas. Además de la tradicional respuesta de generación de nueva oferta para satisfacer a la creciente demanda, lo que se conoce como *políticas del lado de la oferta*, hoy los gestores se plantean intentar entender, modificar y controlar la demanda, alternativa

generalmente ignorada, y dejar de considerarla como un valor exógeno e inmodificable del modelo.

Para explicar la fuerza que tradicionalmente han tenido las políticas del lado de la oferta es interesante pararse a reflexionar en las propiedades especiales que tiene el agua como recurso y los mitos (Baumann y Boland, 1998) de los cuales ha estado tradicionalmente rodeada.

Para empezar, es muy habitual encontrar afirmaciones que califican el agua como un bien completamente diferente al resto de los bienes de consumo, puesto que se trata de una sustancia necesaria para la vida. De acuerdo a este argumento, los hábitos de consumo son difícilmente modificables y el bien no podría responder a incentivos económicos o a cualquier otro tipo de política por parte de los gestores. Sin embargo si nos paramos a pensar en los usos domésticos del agua hoy en día (riego, lavavajillas, lavadoras, cisternas...) rápidamente nos daremos cuenta de que la oferta de agua es esencial para la calidad de vida de los usuarios más que para la vida propiamente, a la cual destinamos una pequeña parte del consumo total, y por tanto, en cierto sentido y al menos en parte, puede considerarse como un bien económico<sup>5</sup>.

Otro factor muy influyente en la utilización de políticas de oferta es el uso de proyecciones *per cápita* para la estimación de los consumos. Esta metodología falla a la hora de recoger muchas influencias al tender a homogeneizar a la población y a utilizar agentes representativos para sus cálculos y, aunque desde luego resulta una técnica muy sencilla y directa de utilizar, las hipótesis de simplificación que conlleva no tienen por qué ser realistas y de hecho frecuentemente no son un buen mecanismo de predicción.

Otra justificación para evitar poner énfasis en las políticas del lado de la demanda podría buscarse en la idea de que las políticas de conservación podrían producir efectos de reducción de los ingresos a las agencias de suministro, y por

---

<sup>5</sup> Esta afirmación se sostiene empíricamente por el hecho de que la demanda del agua respecto al precio no se puede considerar perfectamente inelástica aunque sí inelástica (Boland *et al.*, 1984; Nieswiadomy y Molina, 1989; Höglund, 1999; Nauges y Thomas, 2000; Martínez-Espiñeira, 2002; Martínez-Espiñeira, 2004; Martínez-Espiñeira y Nauges, 2004), e incluso esa relativa inelasticidad se podría explicar por la pequeña fracción que supone el gasto en agua en determinadas ocasiones frente a los ingresos totales y por la desinformación de los consumidores frente a las tarifas de pagos.

tanto no tendrían motivos para incentivarlas, si bien hay quien considera que los beneficios generados por la reducción de los costes de operación y el ahorro de los costes de instalaciones de abastecimiento extras superarían con creces el beneficio obtenido por la recaudación sin las medidas de conservación (Baumann y Boland, 1998).

Una vez introducida la posibilidad de utilizar la demanda y los factores socioeconómicos que influyen sobre ella como alternativa de gestión, el resto del capítulo se estructura en tres secciones. En la primera se definen los diferentes conceptos previos relativos a la estimación de la demanda de agua que son necesarios para el entendimiento de las metodologías, subrayando la tendencia actual a considerar el agua como un bien económico. A continuación, en la siguiente sección, se analizan las variables explicativas más importantes, con influencia en los patrones de demanda y consumo, que recoge la diversa literatura sobre el tema. Clasificamos las variables dependiendo de su controlabilidad por parte de los gestores entre herramientas para la elaboración de políticas, y por tanto instrumentos para la gestión de la demanda, y factores de influencia exógenos a los modelos de predicción.

En la última parte del capítulo se recorren las aproximaciones formales utilizadas en la estimación de la demanda de agua, explicando brevemente su metodología y sus ámbitos de uso. Inicialmente se explican las técnicas de aproximación *per cápita* y otros coeficientes de uso por unidad, base de las metodologías de proyección, ampliamente utilizadas históricamente y en la actualidad. A continuación se repasan los principales conceptos de los modelos de uso final, cuya principal característica se fundamenta en la consideración del agua no como un bien final sino como un medio de proporcionar servicios a los consumidores. Su desarrollo implica la utilización de extensas bases de datos desagregados por servicios de consumo, muy infrecuentes, por lo que pese a su interés su uso todavía no está completamente generalizado. Otra familia de modelos muy utilizados históricamente son los modelos de extrapolación. Los modelos de extrapolación basados en técnicas de alisamiento hoy en día tienen una importancia residual frente a los modelos ARIMA, más utilizados. El nexo de unión de todos ellos es la consideración de la variable temporal como la variable explicativa representativa del sistema. La cuarta familia de metodologías de estimación de la

demanda la componen los modelos causales o estructurales, fundamentalmente los modelos de regresión multivariante. Esta metodología es la más extendida dentro del mundo científico, aunque no está exenta de problemas. Fundamentalmente los problemas son heredados de las complejas tarifas por bloques y con parte fija y variable que los suministradores de agua utilizan para hacer frente a dominios multiobjetivo como es el agua. También se analizan otras metodologías más específicas como las redes neuronales artificiales de uso muy intensivo en la predicción de la demanda de agua a corto plazo. También se comenta el método Delphi como la principal técnica de predicción basada en la opinión de expertos, muy útil en contextos con pocos datos históricos o en los que se prevén cambios estructurales poco conocidos en el sistema. Por último, se discuten las metodologías de minimización del riesgo basadas en el análisis de escenarios.

## **1.2 Conceptos previos y definiciones en la previsión de la demanda urbana**

La previsión de las futuras demandas es requisito indispensable para la planificación y gestión de cualquier sistema de abastecimiento. De hecho, en términos generales se puede considerar que inicialmente la estrategia esencial de cualquier sistema de gestión se ha de basar en la continua evaluación integrada de los binomios *recursos disponibles-necesidades* y *oferta-demanda*<sup>6</sup> (Gistau y García-Poveda, 1993; Pedregal, 2004).

En la literatura de la demanda de agua conviene distinguir al menos entre:

- **Uso:** califica cada una de las distintas clases de actividad en la que se emplea el agua. Por ejemplo: regadío, urbano, industrial.
- **Utilización:** es la cantidad de agua extraída del sistema hidrológico para cada uso. Por ejemplo, en España se utilizan cada año unos 25 km<sup>3</sup> de agua para regadíos.

---

<sup>6</sup> En la literatura sobre gestión de la demanda de agua se suele diferenciar entre necesidad y demanda. La definición de necesidad podría referirse a las cantidades suficientes para asegurar, con el grado deseado, los correspondientes a las actividades humanas y económicas que se pretenden cubrir. Se trata de un concepto teórico, ideal y abstracto, de carácter normativo. La demanda se refiere a la expresión de las necesidades sobre el terreno real y se trata por tanto de un concepto positivo que relaciona la cantidad de agua que los agentes económicos están dispuestos a comprar a un precio establecido (Gistau y García-Poveda, 1993).

- Consumo: es la cantidad de agua utilizada que no retorna al sistema hidrológico. Por ejemplo, el uso urbano consume sólo alrededor del 20% del agua que utiliza, y el resto vuelve a los ríos o acuíferos. En las zonas costeras normalmente consumen el 100% pues las aguas residuales van al mar.
- Demanda<sup>7</sup>: es la cantidad de agua que se requiere para un uso determinado en las condiciones económicas en las que es ofrecida. Además la demanda se puede clasificar en:
  - Demanda de suministro o demanda de consumo neto, que hace referencia al agua requerida por los diferentes usuarios finales del abastecimiento de estudio.
  - Demanda de recursos del medio natural o demanda en producción, que añade a la anterior las pérdidas y evapotranspiraciones<sup>8</sup> que se puedan producir en el proceso y resulta muy dependiente del sistema de infraestructuras hidráulicas que esté implantado.
  - Demanda en distribución, demanda solicitada por el agente intermedio entre la producción y el consumo encargado de la distribución.

A modo de ejemplo, la figura 3 muestra cada una de las utilidades relevantes del agua según los diferentes usos en España: agua urbana, industrial, regadío o refrigeración.

---

<sup>7</sup> Las cuatro primeras de definiciones están tomadas de las propuestas por Llamas *et al.* (2001)

<sup>8</sup> La evaporación es el proceso por el cual el agua es transferida desde la superficie terrestre hacia la atmósfera. Incluye tanto la evaporación de agua líquida o sólida directamente desde el suelo o desde las superficies vegetales vivas o muertas (rocío, escarcha, lluvia interceptada por la vegetación), como las pérdidas de agua a través de las superficies vegetales, particularmente las hojas. En este último proceso, denominado transpiración, el agua absorbida por medio de las raíces, se transfiere a la atmósfera fundamentalmente a través de los estomas situados en las hojas. Fue la dificultad de discriminar entre ambos conceptos en condiciones naturales, lo que obligó a introducir el concepto de evapotranspiración.

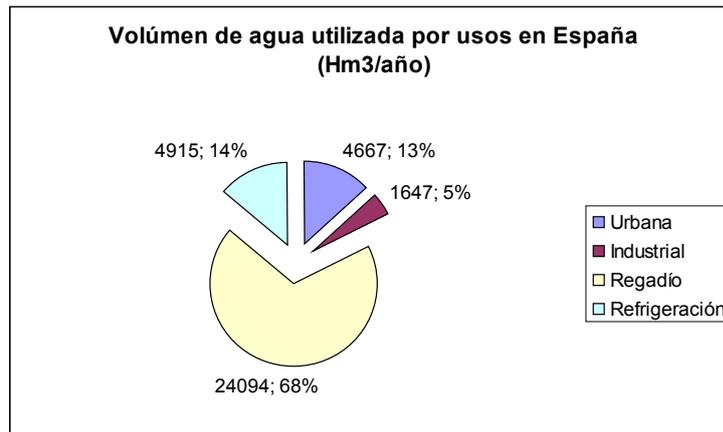


Figura 3. Fuente: MIMAM (2000)<sup>9</sup>

La *demanda urbana de agua* más restringida a los objetivos de esta tesis, consiste típicamente (tabla 1) en el conjunto de usos residenciales, industriales<sup>10</sup>, comerciales y públicos, además de otros propósitos que se pueden considerar de uso menor como el uso para apagar fuegos, limpieza de calles y las pérdidas y fugas en el sistema (Hanemann, 1998).

**Tabla 1.** Tabla que ejemplifica los diferentes usos urbanos del agua. Fuente: Urban Water Use Characteristics in the Metropolitan Water District of Southern California, Metropolitan Water District, Planning División, 1993.

Sector	litros/(per cápita*día)	Porcentaje
Residencial	500,0	66,67%
Comercial e institucional	126,9	16,92%
Industrial	42,3	5,64%
Usos públicos	26,9	3,59%
Bomberos, limpieza de calles y otros	19,2	2,56%
Errores de medidas y pérdidas del sistema	34,6	4,62%

Dentro de la demanda urbana, al consumo del sector residencial también se le denomina demanda doméstica de agua, y comprende las actividades de uso de agua relacionadas con la vivienda, tanto para usos interiores como exteriores (tabla 2). Bajo este concepto se engloban las actividades de beber, cocinar, lavar al perro, ducharse, regar los jardines que pudieran tener las viviendas, etc.

<sup>9</sup> Algunos autores consideran estos datos como irreales y estiman errores de hasta un 25%, pudiendo llegar el uso en regadío hasta el 90% (Llamas, 2004a; Llamas, 2004b).

<sup>10</sup> Dependiendo del autor los usos industriales se consideran uso no urbano. Cuando se considera urbano se suele referir a la parte destinada al consumo final y no como materia prima parte de una función de producción.

**Tabla 2.** Diferentes usos finales de consumos domésticos del agua para familias individuales. Fuente: Urban Water Use Characteristics in the Metropolitan Water District of Southern California, Metropolitan Water District, Planning División, 1993<sup>11</sup>.

Categoría de usos de agua	Consumo litros/(per cápita*día)
Interior	
Inodoro	113,6
Duchas / baños	102,2
Lavado de ropa	79,5
Cocina / Limpieza	49,2
Lavavajillas	22,7
Exterior	
Riego / Jardinería	174,1
Refrigeración	26,5
Piscina / Lavado de coche / Otros usos exteriores	200,6

Una de las particularidades que han caracterizado el abastecimiento urbano es que al tratarse de un bien y un derecho primario de los ciudadanos, su satisfacción, hasta ahora, sólo dependía en una pequeña proporción de su coste económico-financiero (al igual que otros servicios esenciales). Sin embargo, y como viene siendo reflejado desde las organizaciones internacionales, cada vez se tiene más conciencia de su identidad como bien económico y de su progresiva tendencia hacia la correcta valoración:

*"Principio No. 4. El agua tiene un valor económico en todos sus diversos usos en competencia a los que se destina y debería reconocérsele como un bien económico. En virtud de este principio, es esencial reconocer ante todo el derecho fundamental de todo ser humano a tener acceso a un agua pura y al saneamiento por un precio asequible. La ignorancia, en el pasado, del valor económico del agua ha conducido al derroche y a la utilización de este recurso con efectos perjudiciales para el medio ambiente. La gestión del agua, en su condición de bien económico, es un medio importante de conseguir un aprovechamiento eficaz y equitativo y de favorecer la conservación y protección de los recursos hídricos."* Declaración de Dublín sobre el Agua y el Desarrollo Sostenible (1992).

*"El agua debería considerarse un recurso finito que tiene un valor económico del que se derivan consecuencias sociales y económicas considerables, como reflejo de la importancia que tiene satisfacer las necesidades básicas."* Agenda 21, Capítulo 18 (CNUMAD, 1992).

<sup>11</sup> Los consumos *per cápita* en Europa se sitúan muy por debajo de los estándares californianos en 1993. En España se sitúa el consumo doméstico en torno a los 150-175 litros por habitante y día y la OMS considera adecuado para la vida unos 50 litros.

*"Con el fin de gestionar los recursos hídricos de tal manera que refleje sus valores económicos, sociales, medioambientales y culturales para todos sus usos, y avanzar hacia el establecimiento de cuotas para los servicios del agua que reflejen el costo de sus provisión. Este enfoque deberá tomar en cuenta la necesidad de equidad y las necesidades básicas de los pobres y de las personas vulnerables."* Declaración Ministerial del Segundo Foro Mundial del Agua (La Haya, 2000).

*"Se deben recaudar fondos mediante la adopción de criterios de recuperación de costos que se adapten a las condiciones climáticas, medioambientales y sociales del lugar, y al principio del "contaminador paga", prestando debida consideración a los pobres. Todas las fuentes de financiamiento, tanto públicas como privadas, nacionales e internacionales, deben ser movilizadas y utilizadas del modo más eficaz y eficiente posible."* Declaración Ministerial del Tercer Foro Mundial del Agua (Kyoto, 2003).

El abastecimiento urbano, precisamente por su carácter de servicio esencial que comentábamos, requiere un nivel de seguridad muy elevado. Se denomina *garantía anual* de un sistema de abastecimiento al porcentaje de años que es posible satisfacer la demanda *adecuadamente* (Gistau y García-Poveda, 1993). La cuantificación del nivel de servicio aceptable, condiciona la calificación de un período como fallado y por tanto el valor de la garantía. Tradicionalmente el cálculo del nivel de garantía se estima simulando la explotación del sistema durante un período de tiempo determinado, por lo que la necesidad de previsión de la demanda resulta una actividad completamente necesaria para la planificación de cualquier solución.

También resulta interesante distinguir entre *demanda específica de agua*, entendiendo ésta como la cantidad de agua solicitada a un determinado precio, es decir una función que relaciona cantidad y precio, y el *consumo actual de agua* que puede no coincidir con la demanda específica debido a la existencia de determinadas limitaciones en la oferta.

La demanda de agua depende de un gran abanico de factores, como muestra la gran variedad de variables explicativas con influencia (tabla 3)<sup>12</sup>, muchos de los cuales se rigen por leyes de variación que no son conocidas con seguridad. Si pensamos en la cantidad de variables socioeconómicas con influencia en la demanda

---

<sup>12</sup> La tabla no pretende ser exhaustiva, además a los datos expuestos se debería añadir al menos los estudios demográficos disponibles, los planes de urbanismo y los estudios de proyección de la actividad económica en los diferentes sectores.

urbana del agua no es en absoluto extraño considerar ciertos niveles de incertidumbre. Incertidumbre que crecerá a medida que alejamos el horizonte de proyección. Lógicamente a medida que se incrementa el tiempo tenemos mayores índices de variabilidad en cada uno de los factores de influencia en la demanda: los factores socio económicos, la política de ordenación del territorio, el progreso técnico, las medidas normativas, el incremento de precios en puestos o el resultado de las campañas de racionalización de uso de reparación de fugas, por poner uno ejemplos.

**Tabla 3.** Series de datos analizables para estimar su influencia en la demanda de consumo urbano de agua. A partir de (Gistau y García-Poveda, 1993; DWR, 1998).

<b>Datos de producción y distribución</b>
Producción anual, mensual y diaria en captaciones
Agua entregada a redes de distribución en los mismos períodos
Niveles de presión y porcentaje de fugas en redes de distribución
Porcentaje estimado de fugas en las instalaciones privadas de los consumidores
Posibilidad en términos técnicos y económicos de ampliar la oferta por captación de nuevos recursos del medio natural
<b>Datos de consumo netos</b>
Consumo global medido por períodos
Consumos medidos por usos: doméstico, industrial, servicios, municipal y riegos
Consumos medidos en grandes consumidores
Distribución geográfica de consumidores por zonas segundo tipo de actividad y/o nivel de renta
Uso estacional del agua
Desviación existente entre consumos y necesidades
<b>Datos generales</b>
Población abastecida en número de habitantes
Población en establecimientos colectivos
Hábitos y forma de vida de los consumidores
Condiciones socioeconómicas y nivel de renta
Grado de consolidación urbana
Número de viviendas (de primera o segunda residencia) existentes, en curso de realización o con permiso de construcción
Tasa de crecimiento de viviendas por tipo
Grado de hacia el equipamiento de las viviendas
Antigüedad, tipología y nivel de las viviendas
Hábitos de la industria, comercio y servicios: número de empleos y superficies de lo existente y de lo que está en curso de realización o con permiso de construcción.
Hábitos de la actividad turística: número de plazas de hotel y de acampada; (en los casos en que esto sea significativo)
Superficie de zonas verdes cifras y privadas, tipo de plantaciones y formas de riego
Climatología y períodos de sequía con solicitud o imposición de reducción de consumo
Carencia o resistencia el grado de adecuación de sistemas de medida de consumos
Nivel y estructura de precios e impuestos del agua
Capacidad de reducción de pérdidas y fugas

Costeras tecnologías orientadas al ahorro, la reutilización y el reciclaje
Empleo. Año base y proyectado
Nivel de renta, año base y proyectado
Estructura de precios del agua, año base y proyectado
Estrategia de la empresa de abastecimiento y educación de los consumidores más o menos orientadas a la economía

## 1.3 Factores de influencia en la demanda doméstica de agua

### 1.3.1 Controlabilidad de variables y gestión de la demanda

Existe un amplio rango de variables, directas e indirectas, con un impacto significativo sobre la demanda urbana de agua (En la figura 4 y figura 5 se muestran dos ejemplos). Algunas de las variables tienen una influencia mayor que otras, y dependiendo de ésta y de la controlabilidad por parte de los gestores serán utilizadas como herramientas para el establecimiento de políticas. Precisamente, se entiende como *gestión de la demanda* a los métodos utilizados para modificar el nivel o el momento de la demanda de un recurso particular.

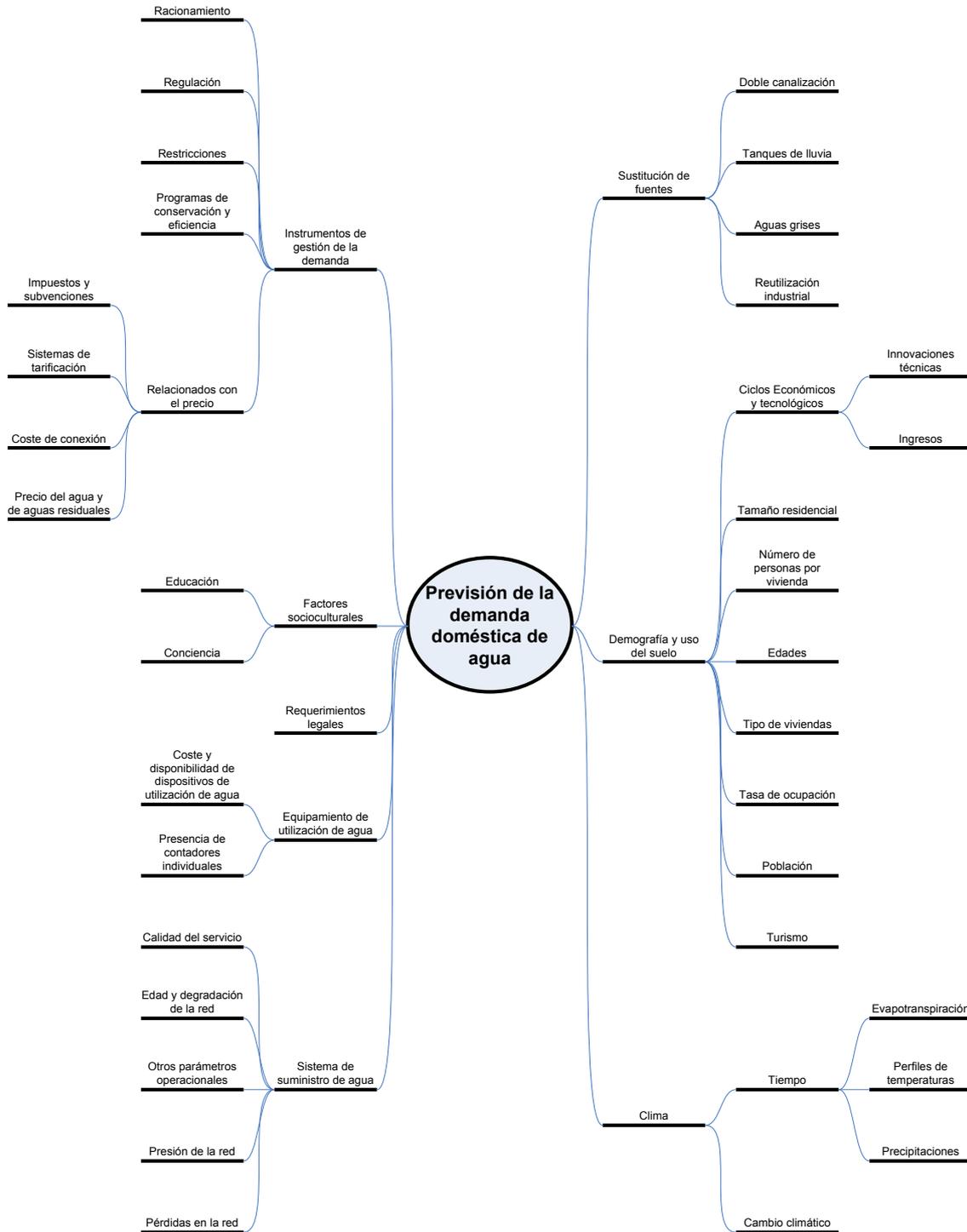
Básicamente los programas de gestión de la demanda se pueden enfocar respecto a la combinación de dos objetivos extremos, la modificación de los cambios de comportamiento de los demandantes o bien mediante un cambio tecnológico que modifique los dispositivos de consumo del recurso provocando un ahorro (o medidas conjuntas). Si mediante un programa de conservación se consigue reducir por ejemplo el tiempo de duración de las duchas, estamos frente a una medida que provoca un *cambio de comportamiento*, si lo que se consigue es la implantación de inodoros de doble descarga se trata de una medida de *cambio tecnológico*.

Conviene diferenciar dentro de los conceptos asociados a la gestión de la demanda entre los que se entiende por *medida*, que representa la disposición o conjunto de disposiciones que se pretende promover, bien sea implantar un proceso tecnológico nuevo o provocar cambios de comportamiento; y lo que se entiende por *instrumento*, que son aquellas acciones emprendidas para asistir en la obtención de la adopción de una medida. Los instrumentos se pueden dividir en reguladores, económicos y comunicativos. Las *opciones* combinan un instrumento con una medida, y los *programas* consisten en un conjunto de opciones (White *et al.*, 2003).

Sin embargo no todos los factores, ni siquiera la mayoría de ellos, son directamente controlables para la elaboración de políticas por parte de los gestores del agua. Así, no existe control sobre aspectos como el clima, el empleo o los flujos migratorios que afectan a una región y que sí que afectan sin embargo a la cantidad demandada de agua. A continuación se enumeran las principales variables con influencia.



**Figura 4.** Diagrama de los principales factores de influencia en otros componentes de la demanda urbana de agua. A partir de ADB (1999)



**Figura 5.** Diagrama de las principales relaciones de influencia en el consumo doméstico de agua. La figura no pretende ser exhaustiva, de hecho muchos de los pares causa/efecto a su vez están interrelacionados entre ellos, aunque se ha evitado explicitar esas relaciones por claridad del diagrama. Elaborado a partir de Opitz *et al.* (1998), ADB (1999), White *et al.* (2003), y Turner y White (2003).

### 1.3.2 Clima y tiempo

Los efectos climáticos y de tiempo<sup>13</sup> pueden influir significativamente en la demanda urbana y doméstica de agua y se han de tener en consideración para desarrollar modelos de predicción. Los factores climáticos se suelen dividir según la dimensión temporal en corto y largo plazo. Los factores de tiempo, a corto plazo, incluyen aspectos como la temperatura máxima diaria y las precipitaciones y la evaporación percibida. Se ha comprobado que los usuarios tienden a responder más a la mera ocurrencia de lluvias que a la cantidad<sup>14</sup>, el efecto es principalmente psicológico (Martínez-Espiñeira, 2002; Arbués *et al.*, 2003).

Los procesos climáticos a largo plazo, representados por la temperatura y las precipitaciones medias, la evapotranspiración, incluso por las potenciales tendencias del efecto climático suelen ser responsables de los comportamientos estacionales de la demanda y ser los aspectos más críticos en la planificación de la capacidad de los sistemas de almacenamiento y tratamiento de agua.

### 1.3.3 Sistema de suministro de agua

El estado físico del sistema de suministro de agua frecuentemente es pasado por alto en la estimación de la demanda y sin embargo puede tener una influencia muy importante debido a las pérdidas en las tuberías. Las pérdidas en la red constituyen típicamente en torno al 50% (Rico, 2004) del agua introducida en la red y no facturada<sup>15</sup>. La cantidad de pérdidas depende de cada área metropolitana en función de la edad y el estado de las infraestructuras y del diseño del sistema, sin embargo las medidas de control de fugas mediante control de presión, sondeo de rutas y otras han demostrado que pueden ser el método más efectivo e inmediato para la reducción de la demanda (White *et al.*, 2003). En las ciudades españolas se estima que las pérdidas en las redes urbanas oscilan entorno al 35% y una red bien gestionada podría considerar niveles aceptables entre un 5-15% de pérdidas (Cabrera, 2000).

---

<sup>13</sup> Nos referimos aquí con la palabra tiempo a la dimensión meteorológica de la palabra y no a la temporal.

<sup>14</sup> Hoy en día existen innovaciones de riego automático con controladores que regulan la cantidad de agua en función de las precipitaciones y la evapotranspiración.

<sup>15</sup> Pensemos la importancia de la magnitud cuando en Madrid se estima que la cantidad de agua no facturada es en torno al 32% y en Barcelona en torno al 22% (Llamas *et al.*, 2001).

### 1.3.4 Demografía y uso del suelo

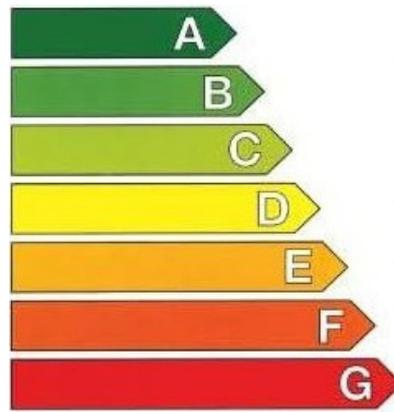
Existen multitud de aspectos demográficos y de uso del suelo que pueden influir en la utilización del agua. Por supuesto la tendencia poblacional tiene probablemente el efecto más importante en el consumo, e indirectamente los aspectos económicos motores de los flujos migratorios. Pero no sólo el aspecto cuantitativo de población resulta relevante, factores como la tasa de ocupación por vivienda tienen influencia. En determinados usos domésticos existen economías de escala relacionados con la densidad por vivienda (Höglund, 1999).

De las dos componentes en las que se divide la demanda residencial típicamente, en el uso interior y exterior, el uso exterior está fuertemente correlado con el uso del suelo y la tipología de vivienda. Se ha encontrado relación entre el consumo residencial exterior y la superficie regable por vivienda, el tamaño del jardín (Nieswiadomy y Molina, 1989; Lyman, 1992; Hewitt y Hanemann, 1995), el sistema de riego (Lyman, 1992) o la posesión de piscina (Dandy *et al.*, 1997).

Influye la edad de los edificios y las tecnologías de ahorro o consumo de agua que incorporan. Influye el crecimiento relativo de las diferentes tipologías urbanas, modelos urbanos difusos o compactos, espacios ajardinados públicos, etc.

### 1.3.5 Equipamiento de utilización de agua

Por supuesto, un factor de influencia en el consumo de agua es la cantidad de dispositivos residenciales que consumen agua, su intensidad de uso del recurso y la frecuencia de utilización. A su vez, la disponibilidad de estos bienes depende de los factores que regulan su mercado, el precio, la existencia de bienes sustitutivos, etc. Actualmente muchos de estos dispositivos se catalogan en función de su eficiencia energética y de consumos de agua, el etiquetado energético (figura 6), información que dependiendo del precio del recurso y los niveles de concienciación puede suponer ahorro y mayores niveles de eficiencia.



**Figura 6.** Etiquetado energético y de consumo de agua. La calificación A y el color verde muestran mayor ahorro del recurso respecto a otros productos equivalentes. En determinados electrodomésticos existen niveles de mayor eficiencia de ahorro A+ y A++.

Un aspecto que se ha demostrado importante en los niveles de demanda agregada es que las viviendas posean contador individual de consumo de agua o no. Aunque hoy en día en las zonas urbanas, la instalación de estos dispositivos por parte de los suministradores está generalizada.

### 1.3.6 Sustitución de fuentes

La sustitución de fuentes consiste en la utilización de otras fuentes de recurso como suplemento al suministro convencional de agua. Dentro de estas medidas se incluyen la recogida de aguas de lluvia o la reutilización para riego, lavado de coches, utilización en descargas de inodoro o con el apropiado tratamiento para otros usos donde se requiera mayor calidad. Se incluyen aquí aquellas opciones en las que se sustituye el uso final considerado por el usuario por otra solución que no implique en absoluto la utilización de agua, como los inodoros secos, proceso de limpieza con aire, etc. Además conviene tener en cuenta el efecto del grado de aceptación de este tipo de opciones (Hills y Birks, 2004).

También están empezando a cobrar importancia las instalaciones para la reutilización de las aguas grises. Estas instalaciones constan de unos depósitos que recolectan las aguas de la ducha y de los grifos del lavabo donde se lleva a cabo un tratamiento de depuración. Gracias a la depuración, el agua se puede reutilizar para alimentar las cisternas de los inodoros o para el riego del jardín o la limpieza de los exteriores. Sin embargo a pesar de que se estima que se podrían ahorrar cantidades

en torno al 30% del consumo doméstico, la utilización de esta tecnología en ocasiones no está exenta de cierto rechazo social (FIRMA, 2003).

### 1.3.7 Algunos instrumentos de gestión de la demanda

#### *Precio*

De la propia definición económica de la demanda como una función que relaciona la cantidad con el precio ya se intuye el precio como una de las principales variables de influencia en el consumo, aunque en este caso sea una variable relativamente inelástica<sup>16</sup>, pero conviene recordarlo, no perfectamente inelástica. Además, la demanda es una función paramétrica de otras muchas variables como todas las citadas en la sección anterior.

El efecto del precio en el recurso tiene importancia tanto a corto como a largo plazo. En el corto plazo un aumento de precio puede provocar cambios de comportamiento en los consumidores. A más largo plazo, estos efectos se pueden diluir por efecto de la inflación, aunque también pueden provocar aumentos en la demanda de dispositivos menos intensivos en el consumo de agua en previsión de futuras subidas. Es decir, los consumidores necesitan tiempo para ajustar su equipamiento al precio del agua, lo que implica diferencias en los niveles de elasticidad a corto y largo plazo.

El establecimiento de precios de agua suele ser más controvertido que el de otros bienes por diversas razones. En primer lugar el precio del agua no sólo supone un mecanismo de información que permite la distribución eficiente del bien. Toda la literatura enfatiza la necesidad de establecimiento de precios del agua basados en la *eficiencia económica y ambiental*, pero también en objetivos de “*eficiencia social, salud pública, equidad, transparencia, simplicidad y estabilidad*” (OECD, 1987; 1999). Esta doble dimensión que se atribuye al agua y la necesidad de un sistema de tarificación que haga frente a un contexto multiobjetivo provoca tarifas relativamente complejas con combinaciones de los siguientes elementos:

- Una cantidad de conexión.

---

<sup>16</sup> Además, la elasticidad es una función del punto por lo que a lo largo de la función de la demanda varía típicamente aumentando en valores más altos en cantidad.

- Un pago fijo.
- Una tasa volumétrica combinada con tarificación por bloques crecientes o decrecientes dependiendo de los objetivos del gestor. En general se piensa que tarifas decrecientes son preferibles desde el punto de vista de la eficiencia<sup>17</sup>, sin embargo pueden provocar sobreutilización del agua. Tarifas con bloques crecientes se consideran más equitativas y explícitamente redistributivas aunque esto no sea siempre cierto<sup>18</sup> (Arbués *et al.*, 2003).
- Un pago mínimo, generalmente para cubrir riesgos financieros.
- Tasas estacionales.
- Tasas de emergencia.
- Tasas de descuento para grupos de bajos ingresos.

Sistemas de tarificación tan complejos de los cuales normalmente no es consciente el consumidor (Nieswiadomy y Molina, 1991), unido a que normalmente el agua representa un porcentaje pequeño de los ingresos de una vivienda, hacen que el precio resulte una variable difícil de utilizar (por ejemplo, ¿qué precio de todos?).

### *Regulación*

La regulación y las medidas reguladoras hacen referencia al control de la edificación y la legislación sobre estándares de instalación de dispositivos en los edificios nuevos. También se puede considerar como una medida reguladora la obligación al etiquetado energético que comentábamos con anterioridad.

Ejemplos de este tipo de medidas los podemos encontrar en los *Planes de Control de Desarrollo Residencial*<sup>19</sup> puestos en práctica en Australia (Turner y White, 2003). En ellos se establece que en las nuevas edificaciones será necesario la instalación de medidas de consumo eficiente de agua como inodoros de doble descarga, reguladores de flujo en los grifos y cabezas de ducha de flujo reducido. Además los jardines han de ser planificados y diseñados de acuerdo a los siete principios de la xerijardinería (*xeriscape*) que incluyen planificación y diseño,

---

<sup>17</sup> Cabe pensar que los consumidores valoran más las primeras unidades que consumen que las últimas, es decir, que la elasticidad del agua va aumentando con el consumo. Para obtener mayor excedente del consumidor sería mejor una estructura de precios marginales equivalente.

<sup>18</sup> Esto no se cumple por ejemplo en países en desarrollo con una muy alta densidad de población por vivienda.

<sup>19</sup> Residential Development Control Plans (DCPs).

análisis del suelo, selección apropiada de plantas, zonas de césped prácticas, riego eficiente, utilización de elementos que reduzcan la evapotranspiración y mantenimiento apropiado.

### *Restricciones*

Las restricciones de agua incluyen la adopción voluntaria o la regulación obligatoria de determinadas prácticas por parte de los consumidores. Dentro de este concepto se incluyen las restricciones a corto plazo que se producen durante períodos de sequía. En general se trata de medidas de muy alta influencia, sobre todo en el uso exterior, aunque como apunta White *et al.* (2003) bastante costosas de cumplir.

Otras estrategias de respuesta que se utilizan frente a la sequía son:

- Racionamiento.
- Utilización de tarifas de escasez.
- Educación y Comunicación.
- Mitigación.
- Mejoras operacionales.
- Opciones del lado de la oferta.

### *Programas de conservación y eficiencia, educación y concienciación*

Los programas de conservación y eficiencia de agua típicamente se estructuran mediante una campaña de concienciación cívica con una campaña de información de cómo consumir menos agua (Billings y Jones, 1996). Aparte de utilizar campañas de información como instrumento se pueden utilizar incentivos económicos o medidas reguladoras. Aquellos programas diseñados para cambiar el comportamiento individual pueden provocar reducciones a largo plazo, especialmente en los programas destinados a cambios estructurales. Las campañas de educación y comunicación también se utilizan para influenciar en los patrones de demanda, aunque suelen estar orientados a más largo plazo. Aunque se cree que estas medidas tienen efectos en el ahorro, lo cierto es que existen pocos estudios que valoren su impacto dada la dificultad de aislarlos del resto de las medidas que suelen compartir los programas en los que se enmarcan.

### 1.3.8 Otros factores

La lista anterior de factores con influencia no pretende ser en absoluto completa, simplemente enumera aquellos que la literatura convencional sobre estimación resalta como de mayor relevancia. Sin embargo existen otros muchos factores que se han probado relacionados bien directa o indirectamente.

El nivel de ingresos<sup>20</sup>, por ejemplo, se ha demostrado que tiene un doble efecto en el consumo. Por un lado se relaciona directamente con el número de dispositivos de consumo pero inversamente con la intensidad de uso del recurso de cada uno, además de forma no lineal en ambos casos. Por otro, a mayor nivel de ingresos menor percepción del precio del agua y generalmente menor elasticidad, puesto que el porcentaje de gasto total en agua representa una fracción menor del consumo total (Agthe y Billings, 1987; 1997).

Se ha demostrado que la edad de las personas también influye en el uso de agua (Lyman, 1992; Nauges y Thomas, 2000). Niños y adolescentes tienden a consumir mayores niveles de agua en lavado y duchas, mientras que a las personas jubiladas se les atribuye mayores consumos en jardinería. También el número de viviendas que corresponden a primera o segunda residencia tiene influencia en la estacionalidad de la demanda (Arbués *et al.*, 2003).

Otro factor relacionado con la tarificación y que podría tener influencia en la demanda de agua es la frecuencia de cobro de las tarifas. Como postula Arbués *et al.* (2003), los consumidores con una frecuencia mayor podrían llegar a entender mejor la estructura de las tarifas y la relación uso-gasto total; sin embargo, períodos más largos pueden provocar efectos psicológicos orientados al ahorro debido a encontrarse con gastos mayores. A pesar de todo, los estudios realizados hasta la fecha sobre este efecto no son muy concluyentes (Kulshreshtha, 1996)

Otros factores a tener en cuenta son todos aquellos socioculturales que pueden explicar diferencias en resultados de políticas de ahorro en diferentes regiones. No es infrecuente encontrarse con diferente disponibilidad a adoptar

---

<sup>20</sup> Es muy frecuente utilizar el nivel de ingresos como variable explicativa en los sistemas econométricos de predicción de la demanda, no así cuando los modelos de predicción son de uso final en los que se considera que el efecto ingreso ya está capturado por el número de dispositivos disponibles para el consumidor.

equipamiento eficiente de agua o simplemente el comportamiento respecto al problema (White *et al.*, 2003).

## **1.4 Métodos de predicción de la demanda doméstica de agua**

### **1.4.1 Introducción**

Existen muchísimas razones para hacer predicciones sobre la evolución futura del agua. De hecho, se podría afirmar que todas las decisiones se basan en predicciones, más o menos explícitas, del futuro. La manera más sencilla de predecir, y que además muchas veces da un buen resultado, es hacer la hipótesis de que en el futuro el sistema se comportará igual que como se ha comportado en el pasado. A pesar de los buenos resultados que en determinadas situaciones, sobre todo a corto plazo, este método pudiera tener, acabamos de ver que existe un importante conjunto de variables influyentes en el consumo de agua y es probable que si se tiene en cuenta su evolución se pueda mejorar la estimación.

Existe toda una variedad de métodos que se han utilizado para hacer predicciones sobre el futuro. La elección de unos u otros se fundamenta en diferentes factores, principalmente tres: el objetivo de la predicción, la dimensión temporal de la predicción, a largo, a medio o a corto plazo, y el conjunto de datos disponibles para hacerla.

La palabra predicción no implica nada sobre el método para hacerla, ésta podría realizarse simplemente sobre una intuición del analista. Sin embargo, la fundamentación de una predicción en métodos de estimación, proyección, extrapolación o cualquier otro sistema formal, presenta una importante ventaja respecto a métodos informales: obliga a la persona encargada de hacer la predicción a explicitar las hipótesis en las que se basa. Esto permite que puedan ser examinadas y por tanto establecer algún método de validación estructural al modelo de predicción.

La literatura clásica (Billings y Jones, 1996; Baumann *et al.*, 1998) sobre estimación formal de demanda de agua se basa en la evaluación estadística de las tasas de consumo *per cápita*, para luego multiplicar ese valor por otra predicción de la evolución futura de la población. Las diferencias entre unos métodos y otros

estriban entonces en el método utilizado para obtener cada una de esas dos predicciones y los niveles de desagregación por cada tipo de cliente.

Las diferentes metodologías se pueden agrupar en:

1. Aproximaciones *per cápita* y otros coeficientes de uso por unidad.
2. Modelos de uso final.
3. Modelos de extrapolación.
4. Modelos causales o estructurales.

### 1.4.2 Aproximaciones *per cápita* y otros coeficientes de uso por unidad

Los modelos de coeficientes de uso por unidad están ampliamente extendidos. La mayoría de los sistemas urbanos de agua realizan sus predicciones basadas en extrapolaciones de demanda *per cápita* (Billings y Jones, 1996), normalmente con un refinamiento de ajuste de tendencia. La principal ventaja de esta aproximación es su simplicidad.

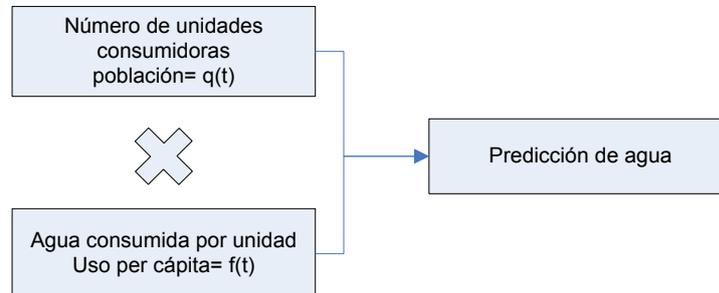
El primer paso es partir de los datos históricos de ventas totales de agua y de los datos de población. El ratio se calcula sin más que dividir la cantidad total por la población<sup>21</sup>. El ajuste de tendencia se refiere al establecimiento de una relación entre el tiempo y la variable de estudio, en este caso el consumo *per cápita*. Incluir una tendencia se basa en la hipótesis de que en el futuro el sistema funcionará con la misma estructura que en el pasado. Este hecho conviene tenerlo en cuenta cuando se introducen nuevas medidas en el sistema.

El ajuste se puede llevar a cabo con diferentes tipos de relaciones entre la variable y el tiempo, normalmente mediante mínimos cuadrados. El ajuste más sencillo es el lineal (**1**), estimar el término independiente y la pendiente, aunque también son frecuentes ajustes suavizados mediante curvas logarítmicas, exponenciales o potenciales.

---

<sup>21</sup> En situaciones de muy alta volatilidad de la serie se puede intentar normalizar los datos en función de los datos climáticos.

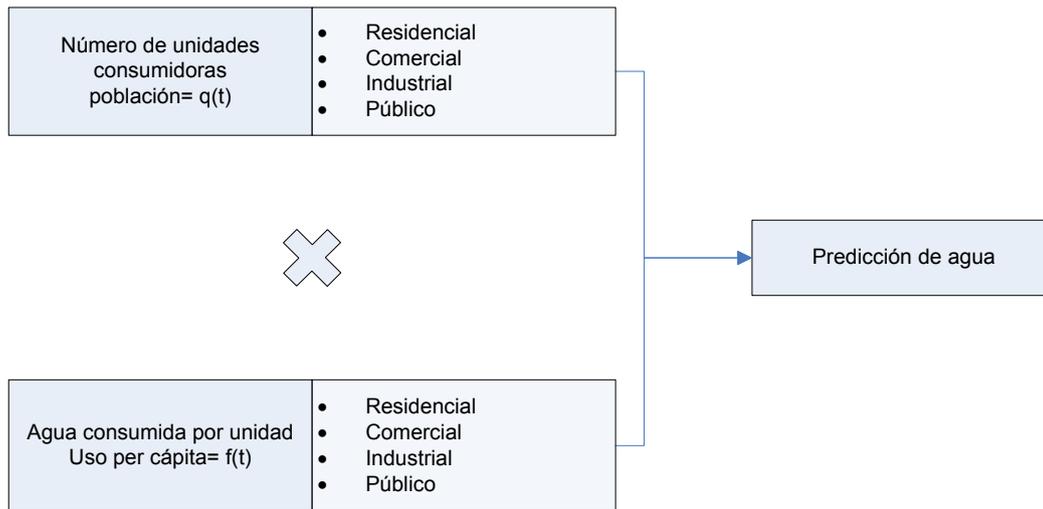
$$Uso_{PerCápita} = \hat{\alpha} + \hat{\beta} \cdot t \quad (1)$$



**Figura 7.** Proyección *per cápita* con tendencia simple

Aquellos sistemas que buscan mayor nivel de precisión calculan coeficientes de uso desagregados por grupos homogéneos de clientes, típicamente por unidad residencial, comercial, industrial y uso público. El proceso es análogo. La ventaja de esta segunda metodología es que la desagregación por grupos de clientes puede permitir identificar y proyectar subtendencias que de otro modo quedarían enmascaradas en el uso *per cápita*. Cuando existen tendencias contrapuestas en cada grupo y con tasas de crecimiento diferentes, en las predicciones a corto plazo ambos métodos darán soluciones similares, pero a medida que crece el horizonte temporal el sistema de desagregación toma ventaja. Además, la desagregación permite no sólo una mejor predicción, sino también un mejor entendimiento del funcionamiento de los mecanismos de consumo del sistema.

Una variante también bastante utilizada de los cálculos por coeficiente unidad consiste en el cálculo de consumo por unidad de área respecto al uso del suelo en lugar de por persona. De esta forma, en aquellas zonas donde se conocen con precisión los planes de ordenación urbana, esta variante puede resultar de utilidad.



**Figura 8.** Proyección *per cápita* por grupos desagregados de consumidores

### 1.4.3 Modelos de uso final

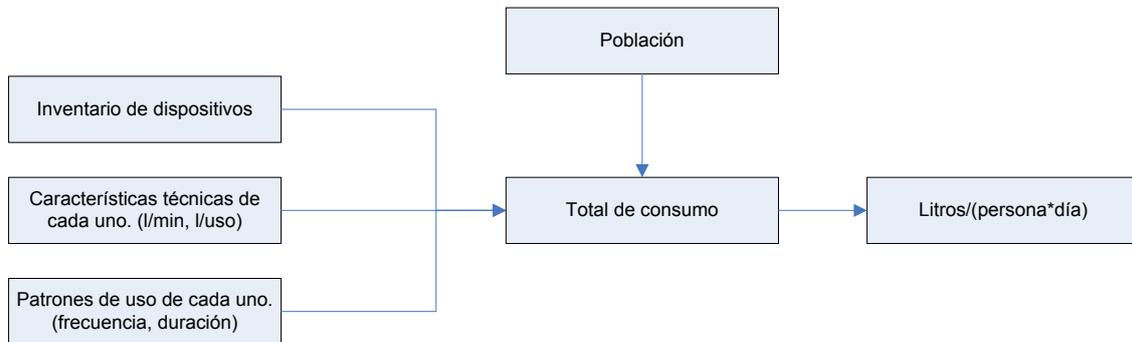
Los modelos de uso final son otra de las técnicas disponibles para la predicción de demanda de agua. Este tipo de modelado se centra principalmente en los factores y tecnologías que afectan a los usos del agua, apoyándose menos en el análisis de tendencias.

Básicamente la metodología consiste en desagregar la demanda en los “servicios” que proporciona el agua a los consumidores; es decir, se fundamenta en la perspectiva de proporcionar un servicio más que en la de considerar el agua como un bien final. Implica recoger de forma extensiva información detallada sobre el comportamiento de los consumidores. Se trata de hacer un inventario de todas las instalaciones, dispositivos de consumo de agua y los patrones de comportamiento típicos de cada vivienda en su uso. Por ejemplo, para el uso residencial se subdivide el consumo inicialmente en interno y externo, y después cada uno de estos en los consumos específicos de agua destinados a cada servicio, por ejemplo en uso de inodoro, duchas, lavados de ropa, etc<sup>22</sup>. Típicamente el consumo de cada unidad se modela contabilizando el número y tipo de dispositivos de los que dispone el consumidor (o de los que dispondrá en un futuro), sus características técnicas y sus patrones de utilización en cantidad y tiempo de uso, (ver la ecuación (2)).

<sup>22</sup> Ver en la tabla 2 de este mismo capítulo un ejemplo de diferentes categorías de usos finales.

$$Uso_{PorUnidad} = \sum_i^{Inventario} Dispositivo_i \cdot Tecnología_i \cdot Uso_i \quad (2)$$

El consumo total se halla sumando los consumos individuales de cada unidad tenida en cuenta por las proyecciones de población estimadas (figura 9).



**Figura 9.** Esquema de un modelo residencial de uso final. Fuente: White *et al.* (2004)

El análisis de usos finales proporciona un mecanismo para entender cómo y dónde se utiliza el agua. Este mecanismo se considera esencial a la hora de tomar medidas de gestión de la demanda y poder estimar los ahorros que éstas podrían tener. De hecho, los modelos de uso final se consideran el primer paso en los sistemas de planificación integrada de recursos<sup>23</sup>, planificación de coste mínimo<sup>24</sup> (Beecher, 1995; Howe y White, 1999) y de gran utilidad en *backcasting* (White *et al.*, 2004).

Presenta sin embargo una importante limitación que ha provocado que su utilización no esté completamente generalizada y su uso se restrinja a casos eventuales (Loh y Coghlan, 2003; Jacobs y Haarhoff, 2004a; Jacobs y Haarhoff, 2004b; Turner *et al.*, 2005) más que a la corriente dominante en predicción residencial, y es la necesidad de una gran cantidad de datos desagregados, generalmente difíciles de obtener. Mientras que con frecuencia los datos por vivienda están registrados por las empresas suministradoras y no son tan difíciles de conseguir, la desagregación de esos datos requiere de un estudio y seguimiento específico de una muestra representativa. Este seguimiento requiere de cierto nivel

<sup>23</sup> Integrated Resource Planning, IRS.

<sup>24</sup> Least Cost Planning, LCP.

técnico (ver por ejemplo el estudio de Loh y Coghlan (2003)). E incluso como argumentan White *et al.* (2004), en esos casos resulta difícil caracterizar el uso exterior, o los usos comerciales, industriales o institucionales.

#### 1.4.4 Modelos de extrapolación

Bajo el epígrafe de modelos de extrapolación se hace referencia a todo un conjunto de técnicas estadísticas: los modelos de ajuste de tendencias que se comentaron como refinamiento de los análisis *per cápita*, los modelos de alisado exponencial o los modelos de Box-Jenkins, por poner unos ejemplos, que tienen como nexo de unión la proyección histórica de tendencias hacia el futuro. La principal hipótesis de estos modelos, que en algunos casos en los que no se producen cambios estructurales traumáticos en el sistema puede ser perfectamente asumible, es que los cambios en el futuro pueden ser predichos simplemente fundamentándose en la variable temporal, ignorando otras posibles influencias, o haciendo la hipótesis de que esta variable ya incluye los efectos de todas las demás. En este conjunto de modelos se puede realizar un refinamiento análogo al de otras metodologías desagregando los análisis por tipo de cliente o, si es el caso, por consideraciones geográficas (Billings y Jones, 1996).

El principal requisito para realizar un análisis de este tipo es la disponibilidad de series temporales de datos de consumo de agua. De las opciones que aporta esta familia de técnicas para la predicción no todas ellas tienen la misma acogida ni se utilizan con la misma frecuencia. La principal ventaja de las técnicas de medias móviles es su simplicidad computacional, pero hoy en día no representa un grave problema. Otro conjunto de técnicas que se utilizan mucho más son las de alisado exponencial. Diferentes técnicas de alisado exponencial ofrecen la posibilidad de captar diferentes componentes de la serie, la componente ciclo-tendencia, o componentes estacionales. Tanto las técnicas de medias móviles como el alisado exponencial simple no presentan buenas soluciones frente a series con componentes ciclotendenciales o estacionales, típicas en la demanda de agua, por lo que las técnicas más utilizadas mediante alisado son el alisado exponencial doble de Holt y el alisado exponencial de Holt-Winters

### *Alisado exponencial de Holt*

El objetivo del modelo de Holt es la identificación de tendencias lineales mediante doble alisado, no contempla otras componentes de la serie. Pretende identificar la tendencia de una serie de tal modo que permita que esa tendencia pueda variar a lo largo del tiempo, produciéndose un ajuste automático del modelo.

La expresión para obtener la predicción es:

$$x_{t+m} = S_t + m \cdot b_t \quad (3)$$

donde  $x_{t+m}$  es la previsión obtenida para el instante  $m$  cuando esta se hace en el instante  $t$ ,  $S_t$  es la observación  $t$  de la serie alisada y  $b_t$  es la tendencia que presenta la serie en el instante  $t$ . Representa el crecimiento de la serie cuando el tiempo se incrementa en una unidad. Conviene notar que el valor tendencial se adapta en cada iteración, es dependiente de  $t$  como muestra el subíndice.

El cálculo de ambos componentes, nivel  $S_t$  y tendencia  $b_t$  se hace mediante las siguientes expresiones recurrentes:

$$S_t = \alpha \cdot z_t + (1 - \alpha) \cdot (S_{t-1} + b_{t-1}) \quad (4)$$

$$0 < \alpha < 1$$

$$b_t = \beta \cdot (S_t - S_{t-1}) + (1 - \beta) \cdot b_{t-1} \quad (5)$$

$$0 < \beta < 1$$

donde  $z_t$  es la observación  $t$  de la serie de tiempo en estudio,  $\alpha$  es la primera constante de alisado, relacionada con la componente aleatoria, y  $\beta$  es la segunda componente de alisado, relacionada con la tendencia. Ambos parámetros,  $\alpha$  y  $\beta$ , dependen de la serie en cuestión para obtener mejores o peores resultados<sup>25</sup>.

### *Alisado exponencial de Holt-Winters*

El método de Holt-Winters es una generalización del método de Holt para tratar con datos que presenten variaciones estacionales. Como el método de Holt, este de Holt- Winters está pensado para series que presenten una tendencia aproximadamente lineal es su evolución.

<sup>25</sup> Típicamente con valores en el intervalo [0.1, 0.3].

La expresión de obtención de las previsiones tiene dos formas, la forma multiplicativa (6) y la forma aditiva:

$$x_{t+m} = T_{t+m} \cdot E_{t+m-L} \quad (6)$$

en la que

$$T_{t+m} = S_t + m \cdot b_t \quad (7)$$

donde  $x_{t+m}$  es la previsión para el período  $t+m$  realizada en el momento  $t$ ,  $T_{t+m}$  es la previsión sin estacionalidad, la previsión de la tendencia,  $L$  es el número de observaciones por ciclo, la longitud estacional<sup>26</sup>,  $E_{t+m-L}$  es el factor estacional correspondiente al mismo período que se desea prever ( $t+m$ ), pero en el ciclo anterior,  $S_t$  es el nivel de la serie y  $b_t$  es el factor de tendencia.

La expresión general del modelo multiplicativo de Winters, al sustituir (7) en (6) muestra claramente su estructura multiplicativa

$$x_{t+m} = (S_t + m \cdot b_t) \cdot E_{t+m-L} \quad (8)$$

Las expresiones que definen cada uno de los elementos de la previsión, análogamente al método de Holt se hallan mediante ecuaciones de alisado individual simple

$$S_t = \alpha \cdot \frac{z_t}{E_{t-L}} + (1-\alpha) \cdot (S_{t-1} + b_{t-1}) \quad (9)$$

$$0 < \alpha < 1$$

$$b_t = \beta \cdot (S_t - S_{t-1}) + (1-\beta) \cdot b_{t-1} \quad (10)$$

$$0 < \beta < 1$$

$$E_t = \gamma \frac{z_t}{S_t} + (1-\gamma) \cdot E_{t-L} \quad (11)$$

$$0 < \gamma < 1$$

donde  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  son las constantes de alisado, a estimar en cada caso para obtener los mejores resultados<sup>27</sup>.

<sup>26</sup> Para valores mensuales de demanda el parámetro  $L$  suele tomar el valor 12 representando los meses de cada año.

<sup>27</sup> Los valores óptimos de estos parámetros suelen encontrarse en el intervalo [0.05, 0.40].

La forma aditiva del modelo de Holt-Winters, es completamente análoga a la anterior ecuación (6):

$$x_{t+m} = T_{t+m} + E_{t+m-L} \quad (12)$$

### Modelos ARIMA

Box y Jenkins (1976) desarrollaron en los años 70 una influyente estrategia de modelado para la predicción de series temporales. La principal ventaja de la metodología de Box-Jenkins frente a los métodos de extrapolación que acabamos de ver, es que en mientras que en los métodos de alisado por ejemplo se impone un modelo y una estructura de predicción relativamente arbitraria respecto a los datos, son modelos *ad hoc*, en la metodología de Box-Jenkins se da un gran peso a encontrar una representación estadística válida a los datos (Hall, 1994).

Box y Jenkins basan su metodología a partir de una familia de modelos estadísticos que se conocen con el nombre genérico ARIMA (*AutoRegressive Integrated Moving Average*) cuyo nombre deriva de sus tres componentes: autoregresivo (AR), integrado (I) y de medias móviles (MA).

Si se intenta representar la influencia que hechos pasados tienen sobre el presente de un proceso estocástico, podemos considerar diferentes expresiones alternativas que constituyen parte de los componentes del modelo ARIMA. Una de ellas, la autoregresiva, consiste en colocar el valor actual del proceso como dependiente de modo lineal de valores pasados del propio proceso más una perturbación aleatoria:

$$z_t = \Phi_1 z_{t-1} + \Phi_2 z_{t-2} + \dots + \Phi_p z_{t-p} + a_t \quad (13)$$

La otra opción de representación consiste en considerar el valor actual como el resultado de una serie de factores aleatorios independientes entre sí modelados como un ruido blando.

$$z_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (14)$$

Existe dualidad en la representación de un proceso, es decir, un proceso puede ser representado como autoregresivo o de medias móviles, la adecuación de

una u otra representación dependerá del número de parámetros necesarios para la representación, cuantos menos mejor. Existen modelos que encuentran su representación más escueta mediante una combinación de términos autoregresivos y de medias móviles, a tales modelos se les denomina ARMA.

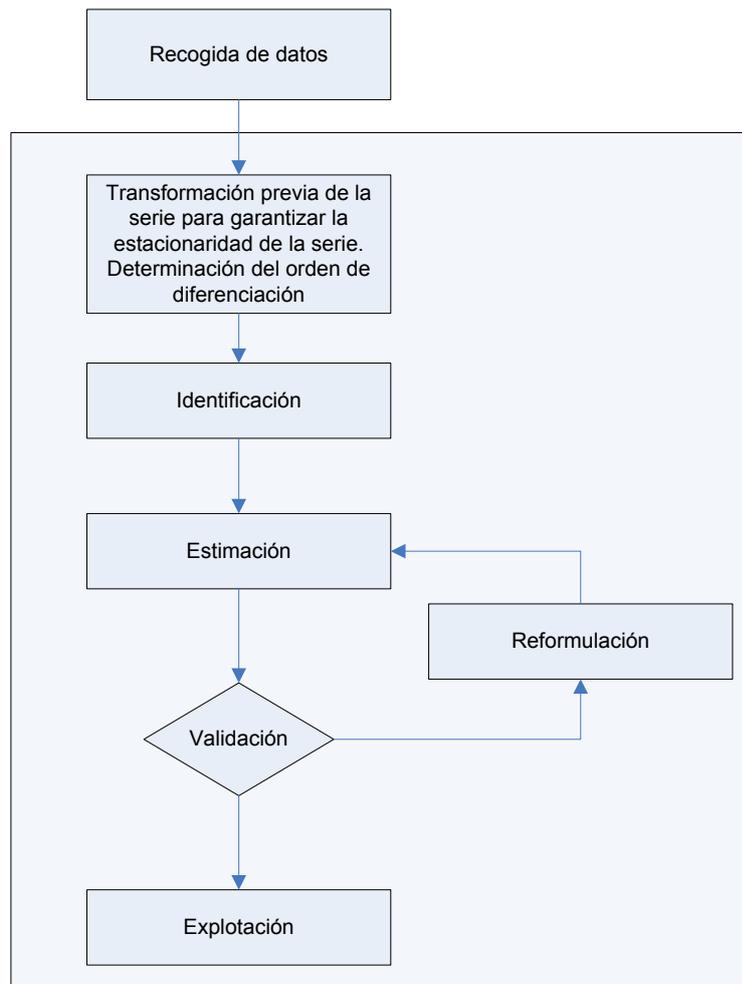
La necesidad del término de integración surge de las hipótesis necesarias para modelar un proceso como un modelo ARMA, que exigen estacionariedad<sup>28</sup>. Un proceso estocástico no estacionario lineal es homogéneo cuando al diferenciar el proceso original, el proceso transformado resultante es estacionario; el número de veces que debe diferenciarse el proceso original para transformarse en estacionario constituye el grado de homogeneidad (González, 1998). Tras transformar los procesos en estacionarios se pueden modelar como ARMA, pero teniendo en mente que si la serie a predecir fue primeramente diferenciada, posteriormente habrá que realizar el proceso inverso mediante integración. El número de veces que se realiza la diferenciación marca el componente I de los modelos ARIMA.

Modelar una serie temporal mediante la metodología Box-Jenkins consiste pues en encontrar el modelo ARIMA que mejor se ajuste al conjunto de datos dado mediante un proceso iterativo (figura 10). En él, como primer paso, se ha de determinar el orden apropiado de integración para el modelo<sup>29</sup>. Posteriormente se ha de *identificar* el modelo ARMA apropiado, es decir, se ha de determinar el orden de los procesos autoregresivos y de medias móviles de las componentes regular y estacional. Normalmente este proceso se realiza basándose en los correlogramas simple y parcial. Después de la identificación, la *estimación* y el *contraste de validez* del modelo son procesos casi directos, en los que se utilizarán los estadísticos apropiados.

---

<sup>28</sup> Para las hipótesis del modelo es suficiente la estacionariedad débil que se caracteriza porque las esperanzas matemáticas de las variables aleatorias no dependen del tiempo, las varianzas tampoco dependen del tiempo y son finitas, y las covarianzas entre dos períodos de tiempo distintos solamente dependen del lapso de tiempo transcurrido entre estos dos períodos (Peña, 1994).

<sup>29</sup> Si además de tendencia, el modelo presenta heterocedasticidad, para garantizar la estacionariedad previamente se suelen tomar logaritmos.



**Figura 10.** Proceso iterativo de la metodología Box-Jenkins. A partir de Pérez-López (2005).

### 1.4.5 Modelos causales o estructurales

Los modelos causales o estructurales surgen principalmente como alternativa a los modelos de proyección y a los modelos de extrapolación. Pese a que los modelos anteriores presentan ciertas ventajas como puede ser la sencillez o la no necesidad de enormes cantidades de datos desagregados, precisamente por eso presentan una importante carencia: estos tipos de modelos suelen ignorar muchos factores socioeconómicos.

Los modelos causales, típicamente estimados mediante regresión múltiple, ofrecen sin embargo la oportunidad de explorar y valorar el impacto, no sólo del precio, sino también de hipótesis alternativas y de factores como el cambio en las condiciones económicas de la zona, cambios climáticos, etc.

Desde el punto de vista científico esta aproximación es la predominante en los últimos años. Mediante esta metodología se han elaborado múltiples modelos para intentar valorar el efecto de los factores que se mencionaban en el apartado anterior de este mismo capítulo. De hecho, los modelos causales son la principal herramienta utilizada en la literatura de la demanda de agua. La razón de la nomenclatura se debe a que todos los modelos incluyen el precio como variable explicativa y la cantidad como variable dependiente, por lo que aunque se estudie también el efecto de otros factores, se puede considerar que se está estudiando el comportamiento paramétrico de la función de la demanda.

Modelos de este tipo han sido muy estudiados desde los años 70 hasta la actualidad, principalmente en los Estados Unidos (Billings, 1982; Chicoine y Ramamurthy, 1986; Nieswiadomy y Molina, 1989; Billings y Day, 1989; Renwick y Archibald, 1998), aunque más recientemente también se está generalizando su uso en países europeos (Höglund, 1999; Nauges y Thomas, 2000; Martínez-Espiñeira, 2002; Nauges y Thomas, 2003; Martínez-Espiñeira, 2003b).

Aunque en todos los modelos multivariantes de estimación de la demanda existe unanimidad en la importancia de la inclusión del precio, esta unanimidad se transforma en un importante debate (Martínez-Espiñeira, 2003a) cuando lo que se dirime es elegir que variable precio es la relevante, si el precio medio, el precio marginal, ambas medidas u otro precio o combinación de precios relevantes. Este debate cobra importancia debido a las complejas tarifas por bloque que se aplican normalmente en la tarificación del agua residencial.

La tarificación por bloques incorpora dos importantes problemas en la estimación de la demanda. El primero es la simultaneidad; una condición necesaria para la estimación de parámetros insesgados y consistentes bajo la hipótesis de mínimos cuadrados ordinarios (OLS) es que no exista correlación entre el término de error y ninguna de las variables explicativas. Esta hipótesis no se cumple con tarifas por bloques, puesto que los precios están endógenamente determinados por el consumidor junto con la cantidad demandada (Jaramillo-Mosqueira, 2005). Para intentar solventar ese problema se han sugerido diferentes soluciones econométricas como la utilización de variables instrumentales en las técnicas de estimación por mínimos cuadrados en dos etapas, la utilización de aproximaciones lineales al total

de la facturación y derivar a partir de ellas mediante variables instrumentales el precio marginal o bien, considerando que no hay base económica para que aparezcan problemas de simultaneidad, hacer simplemente la hipótesis de no simultaneidad (Martínez-Espiñeira, 2002; Arbués *et al.*, 2003).

El segundo problema es la elección de variables. Con tarifas multibloque no resulta obvio tener en cuenta el efecto de modificaciones en las tarifas intramarginales (Bachrach y Vaughan, 1994), es decir ¿qué ocurre cuando se producen cambios en las tasas que no corresponden al nivel actual de consumo?. Además es necesario decidir si utilizar como medida representativa del consumo el precio medio o el marginal. La respuesta a la pregunta planteada reside en que es teóricamente equivalente a un efecto renta en la demanda (Taylor, 1975), por lo que la solución propuesta por Nordin (1976) parece resolver la cuestión: incluir una variable explicativa que represente la diferencia entre lo que el consumidor paga y lo que pagaría si toda la demanda la pagase a la tasa marginal.

Puesto que esta variable representa un efecto renta, entonces los coeficientes de los ingresos y la variable intramarginal de Nordin deberían tener el mismo valor absoluto aunque signos opuestos. Sin embargo en los estudios empíricos llevados al efecto muy pocos casos sostienen esta deducción y generalmente tienen valores significativamente diferentes (Bachrach y Vaughan, 1994; Arbués *et al.*, 2003). Una primera explicación a este hecho, es la falta de información de los consumidores sobre la estructura de la tarifa y la pequeña fracción que supone frente a la renta total (Nieswiadomy y Molina, 1989). Consecuentemente los consumidores no tienen una respuesta sistemática a los cambios en las tarifas intramarginales. Otra argumentación es que el efecto intramarginal no se estima correctamente, por lo que se sesgan los resultados, y otros opinan que el efecto intramarginal es tan pequeño que se pierde por las influencias aleatorias del comportamiento de los consumidores.

De hecho, el efecto del coste intramarginal anima a muchos investigadores a cuestionar las bases de la teoría de la demanda aplicada al agua y al hacerlo responden al segundo problema de elección de variables que se había planteado: la hipótesis de un consumidor perfectamente informado que reacciona al precio marginal y no al precio medio se vuelve excesivamente restrictiva y en su lugar plantean un consumidor que exhibe un comportamiento que no se ajusta

estrictamente a la teoría económica y basa sus decisiones en la regla del pulgar<sup>30</sup>. Otra consideración alternativa compartida por muchos para la justificación de la paradoja del coste intramarginal es la consideración de que la utilización de datos agregados es la principal causa de que no se produzca el efecto (Schefter y Davis, 1985). Estos autores, demostraron que hipótesis más realistas de distribución de los usuarios por bloques, en sustitución de la hipótesis normalmente adoptada de que todos los usuarios consumen en el mismo bloque (la utilización de un consumidor representativo), producía unos valores acordes con la especificación de Nordin.

Aparte del precio también se han utilizado muchísimas otras variables como explicativas (ver Arbués *et al.* (2003) para un análisis exhaustivo), prácticamente todas las que se comentaron en el apartado de factores con influencia de la demanda. Se utilizan frecuentemente variables relacionadas con por supuesto los ingresos<sup>31</sup>, como los propios ingresos medios, el valor medio de la vivienda o el nivel educacional, todo tipo de variables climáticas, densidad poblacional, tipología de viviendas etc<sup>32</sup>.

#### 1.4.6 Otras metodologías en la estimación de la demanda

##### *Modelos de redes neuronales*

En los últimos años una de las técnicas que más utilizadas para la predicción de demanda de agua, sobre todo a corto plazo, son los modelos de redes neuronales artificiales (Wang y Heller, 1996; Hittle *et al.*, 1996; Jain *et al.*, 2001; Mukhopadhyay *et al.*, 2001; Joo *et al.*, 2002; Jain y Ormsbee, 2002; Caridad y Moreno, 2002; Mainardi, 2003; Liu *et al.*, 2003; Aydinalp *et al.*, 2004; Bougadis *et al.*, 2005).

Una red neuronal artificial es un sistema computacional inspirado biológicamente que se fundamenta en el comportamiento colectivo y paralelo de un

---

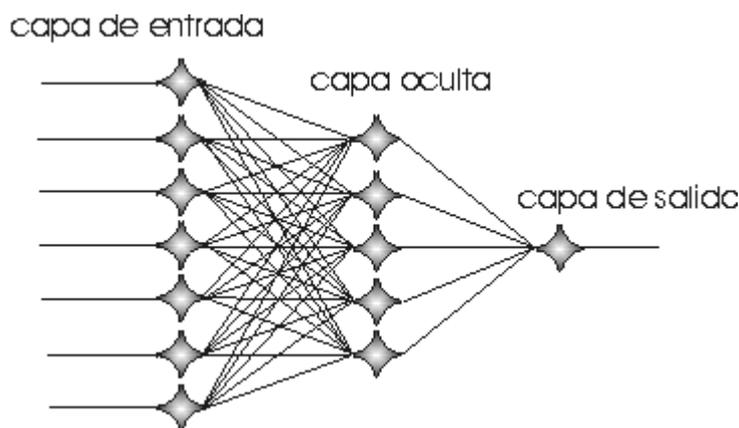
<sup>30</sup> Desde el otro extremo de línea del pensamiento, el de un consumidor perfectamente racional, también se justifica la utilización del precio medio. El consumidor perfectamente racional no tendría porque estar perfectamente informado de las tarifas de precios y responder al precio marginal si se tienen en cuenta los costes de adquisición de la información sobre las tarifas y los niveles de consumo propios, que podrían ser superiores al efecto de responder sistemáticamente a los cambios de las tarifas que se pudiesen producir.

<sup>31</sup> De otra forma no se hubiese podido valorar el efecto del coste intramarginal.

<sup>32</sup> Existe algún ejemplo de utilización de modelos causales de cointegración, de datos de panel, etc., pero su uso es de momento anecdótico.

gran número de elementos procesadores llamados neuronas, que se interconectan para la transmisión y procesamiento de información. A pesar de que generalmente se conciben como una técnica muy diferente a los modelos econométricos, hoy en día existen trabajos que subrayan la relación que existe entre la estadística tradicional clásica y la teoría de redes neuronales (White, 1989; Cheng y Titterington, 1994).

Básicamente una red neuronal es una función que convierte un conjunto de variables de entrada, un vector de entrada, en un conjunto de variables de salida, vector de salida. Lo que caracteriza a una red neuronal es la manera mediante la cual se construye la función. Para generarla se establecen un conjunto de variables no observadas, llamadas capas ocultas. Cada una de esas capas se conecta con la demás y con las variables que forman parte tanto del vector de entrada como el de salida mediante un conjunto de funciones sencillas (figura 11), típicamente no lineales como una función sigmoidea o una función con umbral de activación. La interconexión de tal cantidad de funciones permite cubrir un amplio espectro de formas funcionales a las que su funcionamiento se puede adaptar. De hecho, se demuestra que con suficiente número de capas ocultas, una red neuronal se puede aproximar a cualquier función con cualquier nivel de precisión deseado (Hornik *et al.*, 1990). Como argumenta Hall (1994), resulta interesante pensar en una red como una herramienta de aproximación para formas funcionales no lineales desconocidas.



**Figura 11.** Arquitectura clásica de una red neuronal artificial con una capa oculta

El valor de salida de cada uno de los nodos sigue típicamente una estructura formal como la siguiente:

$$Y_i = f\left(\sum_{j=1}^n \gamma_j X_j\right) \quad (15)$$

donde  $Y_i$  representa la salida de un nodo  $i$  conectado con  $j$  nodos,  $\gamma_j$  representa cada uno de los pesos de cada conexión y  $f$  representa la función que caracteriza la neurona.

Un aspecto fundamental en la literatura de la metodología es establecer el modo de estimación de los valores de los pesos, el aprendizaje, supervisado o no-supervisado.

En nuestra opinión, la estimación de la demanda de agua utilizando este tipo de aproximación presenta diversos problemas. Dos de los más importantes son consecuencia de la propia metodología más allá del contexto de aplicación. El primero es el resultado de su poder como *aproximador universal* (Hall, 1994). Hemos dicho que una red suficientemente compleja es capaz de ajustarse a cualquier conjunto de datos; es decir, si el conjunto de datos tiene un componente estocástico podemos encontrar una red que se ajuste perfectamente a todos ellos incluso encontrando ajustes y estructuras espurias<sup>33</sup>. Un segundo problema de la metodología de redes neuronales es la dificultad de interpretación de un modelo de este tipo. Aunque se consiga un modelo capaz de generar predicciones acertadas, suele resultar muy oscuro desentrañar estructuras más sencillas, si existen, que subyagan a la combinación de muchísimas funciones no lineales.

Además, junto a estos problemas estructurales propios de la metodología, las redes neuronales presentan un problema añadido en la estimación de la demanda de agua, sobre todo a largo y medio plazo<sup>34</sup>. Esto es debido a que las series de datos para esos casos suelen ser mensuales y por tanto insuficientes para entrenar correctamente a la red y estimar correctamente los pesos sinópticos.

### *Método Delphi y otras técnicas de opinión de expertos*

Los métodos de expertos son los métodos más conocidos dentro del grupo de metodologías de predicción intuitiva y no formal. Utilizan como fuente de información un grupo de personas a las que se supone un conocimiento elevado de la

<sup>33</sup> En la literatura relacionada este problema se llama sobreajuste u *overfitting*.

<sup>34</sup> Esto no ocurre cuando los datos son diarios u horarios y el horizonte de predicción es del mismo orden. En esos casos la aproximación esta siendo muy utilizada en la actualidad.

materia que se va a tratar. Esta aproximación se suele utilizar en el contexto de gestión de la demanda de agua cuando se considera que no existen datos históricos que puedan reflejar el mecanismo que se pretende estudiar, o bien cuando se considera que el impacto de perturbaciones o factores externos al sistema van a tener más influencia que la evolución de los factores internos. La ventaja de esta metodología es la incorporación cualificada de opiniones consensuadas en equipo para la realización de modelos, aunque sean informales.

Entre todas las técnicas de opinión de expertos el método Delphi es el más conocido (Rowe *et al.*, 1991; Linstone y Turoff, 2002). Consiste inicialmente en la delimitación del contexto y objetivos del estudio que se pretende realizar. En función de este primer paso, se selecciona un grupo de expertos de entre un rango variado de disciplinas relacionadas con el objetivo, típicamente el consumo de agua, como ingenieros civiles, sociólogos, economistas, políticos, organizaciones ecologistas, empresas suministradoras, etc. El último paso de esta fase de preparación es explicar a los expertos en qué consiste el método.

A partir de aquí, el método tiene cuatro etapas sucesivas de envíos de cuestionarios<sup>35</sup>, de los que se sintetizan las respuestas para elaborar la siguiente consulta, hasta llegar a un resultado de consenso.

1. La primera fase es un test anónimo de aproximación completamente desestructurado en el que se pide a los expertos que establezcan cuáles son los eventos y tendencias más importantes que van a suceder en el futuro referentes al área en estudio.
2. En la segunda consulta los expertos deben volver a responder viendo los resultados de la primera y justificar sus divergencias con el grupo.
3. En la tercera consulta el moderador confecciona un cuestionario que comprende una lista de eventos y estadísticos calculados para cada evento, y a partir de él se pide a cada experto comentar los argumentos que disienten de la mayoría. A partir de estas respuestas se realiza un nuevo análisis estadístico y se distribuye un resumen de los argumentos que disienten de las opiniones mayoritarias.

---

<sup>35</sup> Circulaciones en la nomenclatura típica de la metodología.

4. En la última fase se reclama la opinión sobre el consenso final. Se solicita a todos los expertos que hagan nuevas previsiones, teniendo en cuenta las listas de argumentos anteriores. Cuando el facilitador recibe los cuestionarios, realiza un nuevo análisis y sintetiza los argumentos utilizados por los expertos y el proceso habría acabado.

Al ser los encuestados anónimos entre sí, esta técnica presenta la ventaja de eliminar el efecto líder de otros métodos de expertos. A veces se puede combinar con interacción personal para acelerar el proceso de consenso, pero a costa de perder la ventaja anterior.

### *Análisis de escenarios*

Una manera clásica de combatir la incertidumbre por la variación de los factores es evaluar la demanda mediante el estudio de situaciones múltiples, valorando la adecuación de cada una de las hipótesis de evolución futura e intentando adivinar las más plausibles. Es lo que se denomina análisis de escenarios<sup>36</sup>. En este contexto, un escenario es una historia que describe un posible futuro en el que se definen los eventos significativos, los principales actores y sus motivaciones, y la forma en la que se relacionan y evolucionan los eventos (SHELL, 2003).

La construcción de escenarios como metodología para la planificación bajo incertidumbre es relativamente común, no sólo en el análisis de la demanda de agua, sino en otros muchos contextos. Frente a la deseable (y normalmente imposible) evaluación completa del rango de alternativas de una acción, generalmente con parámetros de rangos de valores continuos, surge la alternativa de especificar casos particulares que se considere que capturan las propiedades clave de un determinado rango, los escenarios.

El objetivo de los escenarios entonces se convierte en el análisis de las tendencias y las historias que emergen bajo un determinado espacio de hipótesis. Los decisores de un determinado sistema pueden a partir de ellos pensar sobre la influencia de determinados aspectos que consideran relevantes o las diferentes alternativas a las que puedan dar lugar. Resulta habitual crear conjuntos de escenarios en los que se evalúa una misma pregunta manteniendo fijos determinados

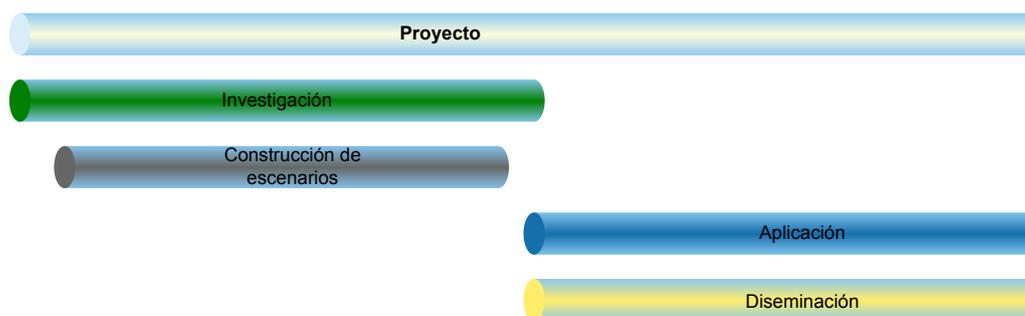
---

<sup>36</sup> El término se le atribuye a Herman Kahn en los años 50.

aspectos del futuro que se consideran persistentes, pero asumiendo hipótesis diferentes que recojan un rango apropiado de casos que evalúen los aspectos inciertos del futuro.

Una de las ventajas de la utilización de escenarios radica en que a pesar de que se basan en la intuición, se desarrollan sobre estructuras analíticas (SHELL, 2003). La utilización de escenarios ayuda a reconocer los grados de incertidumbre. Esto se consigue empezando por decidir qué se requiere explorar y el horizonte temporal que se aplicará, dando un peso a cada una de las eventualidades mediante visiones típicamente interdisciplinarias y consiguiendo descripciones plausibles y sintéticas del futuro en un rango de fenómenos e ideas tan amplio como se desee.

Más formalmente, las etapas metodológicas más importantes en la construcción de escenarios según Fahey y Randall (1998), son inicialmente la definición del aspecto a ser analizado, la definición del horizonte temporal y el ámbito del análisis, la identificación de los actores implicados en el proceso, las principales fuentes de incertidumbre, la definición de escenarios y de extremos, y la valoración de los escenarios. Desde un punto de vista de gestión de proyectos todo el proceso se puede estructurar en las etapas que se muestran en la figura 12.



**Figura 12.** Desde un punto de vista de dirección de proyectos, el proceso de elaboración de escenarios consta de cuatro etapas. La etapa de investigación, la etapa de construcción de escenarios, de aplicación y de diseminación de resultados. A partir de SHELL (2003).

Existen diversas razones para la utilización de escenarios en el análisis de la demanda de agua. La primera es que más allá de su utilización como herramienta de

estimación, es un vehículo formal para iniciar procesos de entendimiento y aprendizaje de las implicaciones que las diferentes variables o políticas pueden tener en el sistema. Otro motivo es precisamente su uso como alternativa a la problemática que presentan los métodos estadísticos estándar. Los principios en los que se basan con frecuencia exigen tamaños muestrales de determinado tamaño que si no son posibles de obtener pueden invalidar los resultados del método, u otras veces no aprovechan completamente información de diferente naturaleza en los modelos. De hecho, se ha probado que muchos de los estudios basados en modelos econométricos en predicción de agua son muy específicos del período para el que se han calculado. Herrington (1996) demuestra que los modelos que mejores estimaciones obtenían en determinados períodos son los peores en períodos donde cambian las condiciones y el contexto del dominio, como por ejemplo la ausencia de restricciones de oferta.

La aplicación de estudio de escenarios junto con modelos basados en agentes resulta una técnica de extraordinario interés para la estimación de la demanda de agua porque permite complementar las metodologías mencionadas en este capítulo y evitar alguna de las limitaciones que presentan (ver por ejemplo Saurí *et al.* (2003)). De hecho, demostrarlo es uno de los objetivos de esta tesis. Profundizaremos en esta cuestión en capítulos posteriores, pero una de las ventajas de la metodología radica precisamente en que no presenta limitaciones de expresividad. Se pueden representar tanto sistemas cuantitativos como cualitativos e integrar información de diferente naturaleza, tanto sean relaciones basadas en sistemas de ecuaciones deterministas, hipótesis probabilísticas o hipótesis subjetivas explícitas.



## 2. Modelado basado en agentes

*As far as the laws of mathematics refer to reality, they are not certain; and as far as they are certain, they do not refer to reality.*

Albert Einstein (1879 - 1955), "Geometry and Experience",  
January 27, 1921

### Resumen

Consideramos necesario justificar la elección del modelado basado en agentes como marco general para el estudio del problema abordado en esta tesis doctoral. Para ello, hacemos un estudio crítico de la metodología, estableciendo el marco general de modelado y analizando las ventajas e inconvenientes que presenta.

Hemos estructurado el capítulo en cinco secciones. Comenzamos por describir los antecedentes que permiten el desarrollo tecnológico de la metodología, analizando el concepto de agente desde el punto de vista computacional. Para ello revisamos las definiciones más ampliamente aceptadas y las ventajas que supone la tecnología de agentes. Resumimos sus principales fundamentos y aplicaciones para situar el modelado basado en agentes dentro de la tecnología. Este hecho es relativamente difícil debido a la creciente, heterogénea y a veces terminológicamente confusa literatura sobre el tema.

A continuación presentamos el estado del arte del modelado en las Ciencias Sociales, que argumenta que frente a los tradicionales sistemas simbólicos de modelado, el matemático y el puramente verbal, se encuentra la simulación como tercera vía entre las anteriores.

La tercera sección es el nexo que integra las dos anteriores, la idea de modelado con la tecnología de agentes. Definimos qué entendemos por modelado basado en agentes (y los diferentes términos afines), una metodología que permite establecer una correspondencia directa entre las entidades que se identifican como participantes en un sistema observado y los agentes que constituyen el modelo abstraído. También resaltamos la dificultad de estudiar este tipo de modelos, generalmente complejos, mediante análisis puramente matemático y la necesidad de recurrir a construcciones computacionales, aprovechando la tecnología de agentes, y al análisis del modelo mediante simulación. En esta sección argumentamos que, bajo nuestro punto de vista, este tipo de modelado no es formalmente menos riguroso que el modelado matemático. Argumentaremos que se trata precisamente de un caso particular de éste, en el que las ecuaciones que gobiernan el sistema no son expresables de manera compacta y concisa dificultando el análisis. A cambio se ofrece una mayor riqueza descriptiva que facilita el proceso de abstracción.

Establecemos el marco general metodológico bajo nuestro punto de vista, y repasamos las etapas que conlleva el proceso de creación, análisis y publicación de un modelo basado en agentes, desde la programación de un modelo hasta sus etapas de verificación y validación.

Por último, y a modo de resumen, hacemos un análisis de aquellas fortalezas y debilidades que presenta la metodología hasta la fecha actual. De las ventajas que justifican su adopción en esta tesis cabe destacar la posibilidad de describir de forma más natural los sistemas, la posibilidad de capturar fenómenos emergentes e incluir en las etapas de modelado y validación procesos de participación. Sin embargo, el precio que se paga a cambio es la menor robustez de las soluciones.





## 2.1 Antecedentes al modelado basado en agentes

La evolución de la ciencia computacional hasta la fecha se caracteriza por cinco tendencias: ubicuidad, inteconexión, inteligencia, delegación y orientación humana (Wooldridge, 2002). Si nos paramos a pensar en el significado de estas tendencias, *delegación e inteligencia* implica construir sistemas computacionales que sean capaces de actuar en sustitución de nosotros, es decir, la posibilidad de, por un lado, actuar *independientemente* y, por otro, la capacidad de representar nuestros intereses de la mejor manera posible cuando *interactúan* con otros humanos o sistemas.

Además, la tendencia hacia la *interconexión y distribución* de los sistemas software, acoplada con la necesidad de sistemas que busquen unos objetivos, conlleva el diseño de sistemas con capacidad para *cooperar, negociar* y llegar a acuerdos (o *competir*) con sistemas o personas con intereses que pueden ser completamente diferentes a los nuestros.

Para desarrollar un cuerpo científico suficientemente robusto capaz de abordar estos requisitos, a mediados de los años 80 empezó a tomar fuerza el estudio de los Sistemas Multiagente (MAS, *Multi-Agent Systems*) como subdisciplina dentro de la Ciencia Computacional.

Históricamente los Sistemas Multiagente han sido considerados una de las sub-áreas de la Inteligencia Artificial Distribuida (DAI, *Distributed Artificial Intelligence*) junto con la Resolución Distribuida de Problemas (DPS, *Distributed Problem Solving*) y la Inteligencia Artificial Paralela, (PAI, *Parallel Artificial Intelligence*) (Nwana, 1996; López-Paredes, 2001).

Hoy en día los sistemas basados en agentes (ABS, *Agent Based Systems*) y los MAS son una de las áreas más importantes de investigación y desarrollo dentro de las tecnologías de la información y son considerados un nuevo paradigma en el desarrollo de aplicaciones software.

### 2.1.1 Agentes

Pero antes de seguir conviene definir que entendemos por los términos “*agente*”, “*sistema basado en agentes*” o “*sistema multiagente*”. Sin más nos encontramos con la primera dificultad. No existe ninguna definición universalmente aceptada del término “*agente*” (ver por ejemplo Franklin y Graesser (1997) para una primera discusión acerca de diferentes acepciones del término u otra posterior incluyendo aún más acepciones del término en López-Paredes (2004)). A pesar de ello, y teniendo en cuenta que para diferentes escuelas de computación las definiciones pueden tener matices que lo diferencian, consideramos importante conocer algunas de las definiciones con mayor aceptación que existen en la comunidad.

Jennings *et al.* (1998), definen un *agente* como un *dispositivo hardware o un sistema software que, situado en un determinado entorno, es capaz de exhibir un comportamiento autónomo flexible, con el propósito de conseguir los objetivos para los que fue diseñado.*

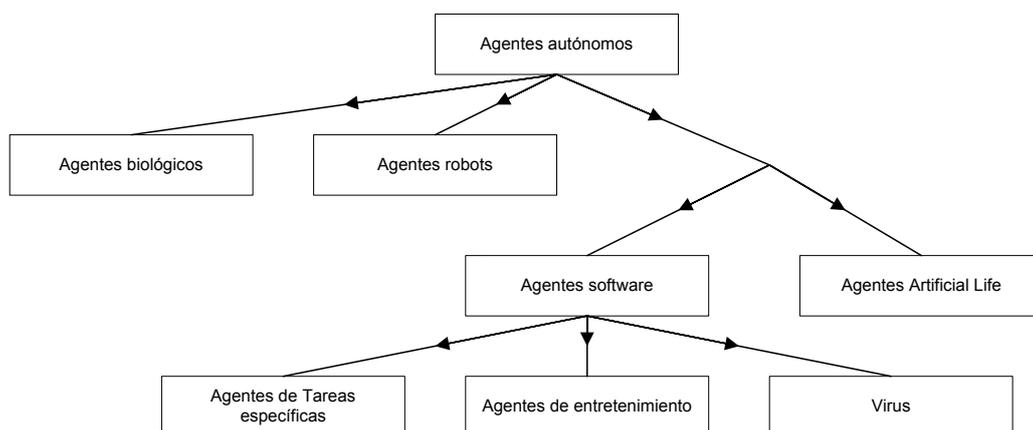
Dando un paso más y siendo más restrictivos, un *agente inteligente* se define como un hardware o (más frecuentemente) una *entidad software que, situada en un entorno, es capaz de exhibir un comportamiento autónomo flexible, con el propósito de conseguir unos objetivos propios* (Wooldridge y Jennings, 1995). Bajo esta definición un agente debe satisfacer las siguientes propiedades:

- *Autonomía*: los agentes operan sin la intervención directa de humanos u otros, y tienen algún tipo de control sobre sus acciones y estados internos
- *Habilidad social*: los agentes interactúan con otros agentes (y posiblemente humanos) a través de lenguaje de comunicación de agentes
- *Reactividad*: los agentes perciben su entorno, (que puede ser el mundo físico, un usuario mediante un interfaz gráfico, una colección de otros agentes, Internet, o quizá una combinación de todos ellos), y responden en el tiempo a los cambios que ocurren en él.

- *Proactividad*: los agentes no simplemente actúan en respuesta del entorno, sino que son capaces de exhibir comportamiento dirigido a objetivos tomando la iniciativa.

Luck *et al.* (2003; 2004a) consideran que *agente* se puede definir como *entidades computacionales autónomas, solucionadoras de problemas, capaces de operaciones efectivas y dinámicas en entornos abiertos*. Los agentes con frecuencia se sitúan en entornos en los que interactúan (y quizá cooperan) con otros agentes (incluyendo en esta definición tanto software como humanos) con los que es posible que tengan conflictos de intereses. Tales entornos son conocidos como *sistemas multiagente*.

Incluso algunos autores tienen aún definiciones más débiles de lo que es un agente autónomo; según Franklin y Graesser (1997) un *agente autónomo* es *cualquier sistema parte de un entorno y situado en él que siente el entorno y actúa sobre él, a lo largo del tiempo, en persecución de sus propios objetivos que dependerán de lo que sienta en el futuro*. Si reflexionamos sobre la definición, prácticamente cualquiera cosa entraría en la categoría de agente. De hecho, ellos proponen una clasificación taxonómica de los agentes autónomos en los que tienen cabida incluso los agentes biológicos (figura 13).



**Figura 13.** Clasificación taxonómica de los agentes autónomos (Franklin y Graesser, 1997).

Para Luck *et al.* (2003; 2004a), la diferencia (en sentido computacional) entre los objetos y los agentes es que los agentes son entidades *autónomas* capaces de

tomar decisiones sobre sus acciones y sus interacciones, a pesar de que con frecuencia son implementados con tecnología basada en *programación orientada a objetos* (OOP, *Object Oriented Programming*). Jennings y otros (1998) inciden precisamente en la diferencia entre objeto y agente en la posesión del *locus de control* respecto a la decisión. En el caso de los objetos la decisión recae en quien invoca el método, mientras que en el caso de los agentes la decisión recae en quien recibe la petición, como ellos mismos resumen en su famoso eslogan “*Objects do it for free. Agents do it for money*”.

Finalmente, definiremos *sistemas multiagente* como todos aquellos que se caracterizan por comprender un número de agentes autónomos y heterogéneos, independientes, interaccionando entre sí y con el entorno, cada uno con sus propias metas y objetivos (Torsun, 1995).

El motivo del enorme desarrollo que han tenido los sistemas multiagente en los últimos años se encuentra en su especial aptitud para abordar problemas inherentemente complejos y problemas inherentemente distribuidos (Hopgood, 2000). Los MAS heredan de la DAI la capacidad modular, la eficiencia y la velocidad consecuencia del paralelismo, la confiabilidad y robustez de los sistemas redundantes y la posibilidad de escalabilidad. Todo ello permite desarrollar agentes con el apropiado nivel de detalle ajustado a la aplicación para la que se les esté utilizando, lo que se conoce como *granularidad*<sup>37</sup>. Permite aplicaciones con (potencialmente) menor coste que enormes sistemas centralizados y, a la vez, aprovechar la posibilidad de trabajar a nivel de conocimiento, con fácil mantenimiento, reutilización e independencia de la plataforma.

### 2.1.2 Investigar para hacer mejores agentes y hacer mejores agentes para investigar

El carácter horizontal de la tecnología de agentes hace que la investigación en este campo sea muy heterogénea y multidisciplinar. Es más, la existencia de múltiples definiciones de “agente” y el sobre-uso, por razones de moda, del término

---

<sup>37</sup> Se puede utilizar agentes *fine-grained* (de grano fino) para los sistemas en los que se necesite ese nivel de minuciosidad, dejando agentes *coarse-grained* (de grano grueso) dedicados a la resolución de problemas más estratégicos y concentrados por ejemplo.

provoca<sup>38</sup> que bajo la misma bandera convivan múltiples líneas de investigación muy diferentes.

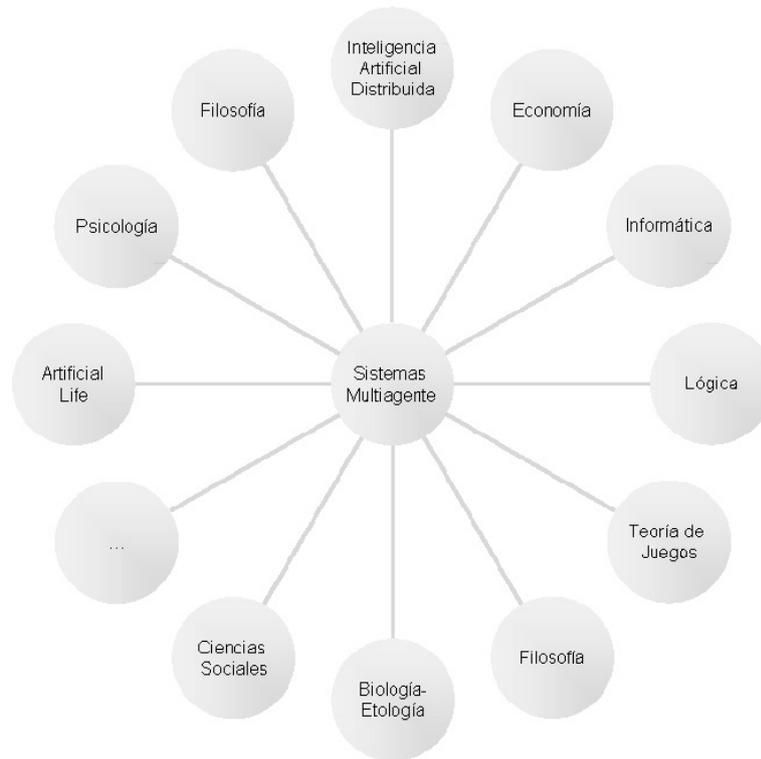
Incluso si nos preguntamos quién investiga en esta tecnología, nos encontramos desde pequeñas empresas, organizaciones medias como los grandes centros de investigación internacionales (p.e. M.I.T. o Carnegie Mellon University) y las más potentes multinacionales (p.e. Alcatel, Apple, AT&T, BT, Daimler-Benz, DEC, HP, IBM, Lotus, Microsoft, Oracle, Sharp) (Nwana, 1996).

Una de las razones de la heterogeneidad de líneas de investigación se puede buscar en la multitud de ciencias en las que los Sistemas Multiagente se pueden apoyar para avanzar, ver por ejemplo Parsons y Woolridge (2002), Bergman y Tennenholtz (2002), Bredin *et al.* (2003), Fisher (2004), Fátima *et al.* (2005) o Hales (2005). Si nos fijamos en la figura 14 podemos ver algunos ejemplos directos de investigación relacionada y que permiten el avance conjunto de los sistemas multiagente. Este hecho se puede interpretar como una debilidad debida a la multitud de puntos de vista diversos sobre el tema, pero también como una fortaleza pues los sistemas multiagente se apoyan, con frecuencia, en bases bien fundadas de otras disciplinas.

Para resumir brevemente las líneas de investigación principales en computación basada en agentes que se están desarrollando en la actualidad, conviene hacer una distinción. Se puede considerar que el diseño o estudio de los sistemas multiagente tiene una doble dimensión, el diseño o estudio de cada una de las unidades atómicas que componen el sistema, los agentes, y el estudio de los mecanismos de interacción entre las unidades atómicas que provoca un comportamiento global del sistema. Este doble punto de vista clasifica dos grandes bloques de investigación en MAS, el *microdiseño* enfocado al diseño del agente, y el *macrodiseño*, enfocado en el diseño de la sociedad.

---

<sup>38</sup> No podemos olvidar que la investigación en sistemas multiagente despertó a principios de los años 90 y sigue despertando unas enormes expectativas y es considerado por muchos más allá de un paradigma del desarrollo del software, “*the next significant breakthrough in software development*” o “*the new revolution in software*” (Sargent 1992 y Ovum 1994 citados en Jennings y Wooldridge (1995)).



**Figura 14.** Principales áreas con aportación directa en los sistemas multiagente. Fuente: elaboración propia.

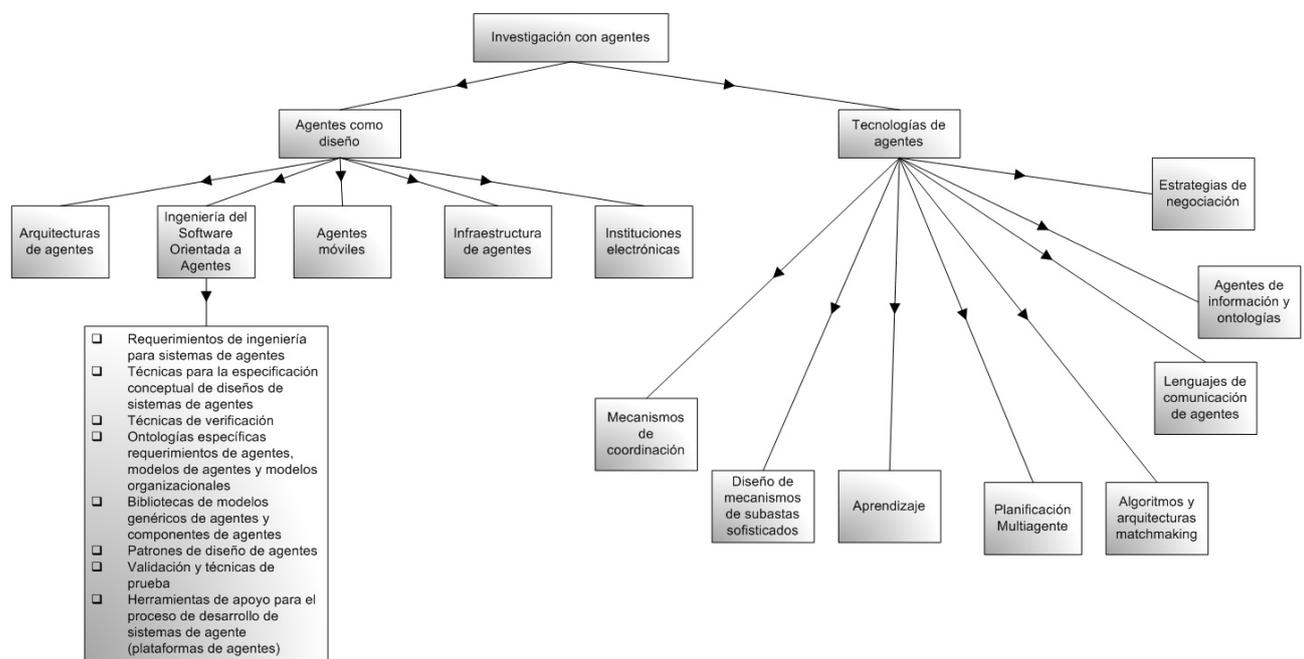
Aparte de la clasificación previa, en la actualidad la investigación en agentes se puede dividir en dos grandes bloques (clasificación adaptada de Luck *et al.* (2003; 2004b)), los *agentes como diseño* y las *tecnologías de agentes*, como se recoge en la figura 15.

La utilización de los agentes como diseño, como herramienta de abstracción, como metáfora, para el diseño y la construcción de sistemas ha sido una de sus primeras aplicaciones. Los agentes son especialmente apropiados para descomponer sistemas complejos en componentes distintos e independientes que se relacionan entres sí. Pero también, aportan muchísimas posibilidades para agregar las funcionalidades y poner en común, y como un todo, las unidades en las que se descompone el sistema, mediante comunicación, aprendizaje social, coordinación, etc.

Estas capacidades proporcionan un conjunto de tecnologías que permiten establecer relaciones micro-macro. Relaciones que parten del diseño de agentes individuales y que concluyen en el diseño del macronivel social en el que esos

agentes interactúan. Las áreas dentro de MAS que se consideran hoy en día enfocadas a este trabajo son: ingeniería del software orientada a agentes, arquitecturas de agentes, sistemas de agentes móviles, infraestructura de agentes e instituciones electrónicas.

Las aproximaciones basadas en agentes son una fuente de tecnologías para un extenso número de áreas, tanto teóricas como aplicadas, *las tecnologías de agentes*. Entre ellas podríamos considerar la planificación y toma de decisiones, mecanismos de coordinación, arquitecturas *matchmaking* y algoritmos, ontologías y agentes de información, mecanismos de negociación y aprendizaje.



**Figura 15.** Clasificación de la investigación en MAS. A partir de Luck, McBurney y Priest (2003).

Del mismo modo que la investigación en agentes hereda conceptos útiles de multitud de campos, es justo decir que en la actualidad está devolviendo aplicaciones reales también en multitud de dominios. Desde luego que no es nuestro objetivo aquí realizar un estado del arte de las aplicaciones que existen en la actualidad<sup>39</sup>, pero sí enumerar, a modo de ejemplo, los principales dominios en los que se está aplicando

<sup>39</sup> En Jennings y Woolridge (1998), Parunak (1998a; 1998b; 2000) o Ana Mas (2004) se pueden encontrar extensas revisiones.

para ubicar el modelado basado en agentes que, al fin y al cabo, es la metodología utilizada en el desarrollo de esta tesis.

Uno de los primeros dominios de aplicación de la tecnología de agentes fue la industria. En la actualidad se pueden encontrar aplicaciones que van desde la integración de empresas de fabricación y la gestión de la cadena de suministros, a aplicaciones en el control de ejecución, en la planificación y asignación de tareas y recursos (*scheduling*), en la gestión de materiales, de inventario o el control aéreo por poner unos ejemplos (Giret *et al.*, 2005).

Otro ámbito donde los sistemas multiagente han encontrado aplicación ha sido en medicina. Existen aplicaciones de planificación de actividades sobre pacientes, en gestión de trasplantes de órganos y tejidos, en la gestión de la salud dentro de una comunidad, en el acceso a la comunidad médica, en sistemas de ayuda a la decisión, formación o atención a los ciudadanos mayores (Moreno, 2005).

Debido a la influencia de Internet, los métodos de gestión y organización de la información han cobrado muchísima importancia. Hoy en día resulta muy habitual que en un proceso de recuperación de información por parte de un usuario en Internet, éste se sienta desbordado por la cantidad de información recuperada. En la actualidad existen aplicaciones<sup>40</sup> de recuperación de información con el objetivo de facilitar la labor de localización de información de calidad basadas en agentes (Julián *et al.*, 2005).

Uno de los entornos más naturales para el desarrollo de aplicaciones de la tecnología de agentes son las redes de telecomunicaciones. Las aplicaciones en este campo son muy variadas (Albayrak y Garijo, 1998), y van desde la gestión de redes y sus servicios, estudiando el comportamiento de distintas arquitecturas de red por ejemplo, al desarrollo de nuevos servicios para clientes, servicios conversacionales con tecnología de agentes y tecnología del habla, o mejora de los procesos de negocio (Garijo, 2005).

---

<sup>40</sup> Ver por ejemplo las aplicaciones *CiteSeer* (Bollacker *et al.*, 1998) o *Research Index* y como facilitan la búsqueda de información mediante la creación de índices de citas de la literatura científica en formato electrónico.

Además de este pequeño recorrido de las aplicaciones más notables, los agentes hoy en día se utilizan en comercio electrónico (Doorenbos *et al.*, 1997), aplicaciones militares, en la industria de los juegos de ordenador y las videoconsolas (Wavish y Graham, 1996), como asistentes expertos o agentes de interfaz (Maes, 1994; Negroponte, 1995) *pero también como herramientas de modelado y simulación* (Gilbert y Doran, 1995; Aguilera y López-Paredes, 2001; López-Paredes, 2001; Moss y Davidsson, 2001).

## **2.2 El arte de modelar y los modelos de simulación**

Se ha visto en el apartado anterior que una gran parte del trabajo con agentes en los últimos años se ha orientado a fines comerciales e industriales, sin embargo hoy en día existe una línea de investigación muy activa que aplica la tecnología de agentes al modelado y simulación de sistemas reales.

De hecho, en los últimos años esta técnica de modelado ha pasado de ser una técnica heterodoxa a convertirse en una herramienta de investigación muy reconocida, e incluso en algunos casos una de las principales corrientes, en un amplio rango de disciplinas científicas, por ejemplo, Economía (Arthur, 1991; Arthur *et al.*, 1997a; Luna y Stefansson, 2000; Tesfatsion, 2001; López-Paredes *et al.*, 2002; Tesfatsion, 2002; Tesfatsion, 2003), Finanzas (Abu-Mostafa *et al.*, 1999; LeBaron, 2000; Luna y Perrone, 2001; Hommes, 2002; Wan *et al.*, 2002), Gestión de Recursos y Ecología (Booth, 1997; Janssen, 2002; Bousquet y Le Page, 2004), Ciencias Políticas (Axelrod, 1997a; Johnson, 1999; Cederman, 2002), Antropología (Kohler y Gumerman, 2000; Lansing, 2003), Sociología (Gilbert y Conte, 1995; Conte *et al.*, 1997; Suleiman *et al.*, 2000; Macy y Willer, 2002; Terano *et al.*, 2003), o Biología (Resnick, 1995; Kreft *et al.*, 1998; Walker *et al.*, 2004).

Pero antes de explicar cómo se utiliza la tecnología de agentes en el modelado de sistemas, y en concreto en sistemas sociales, empecemos por el principio y expliquemos qué entendemos por un modelo, qué es modelar y dónde, en nuestra opinión, se sitúa conceptual y metodológicamente esta aproximación.

### 2.2.1 Hacer modelos

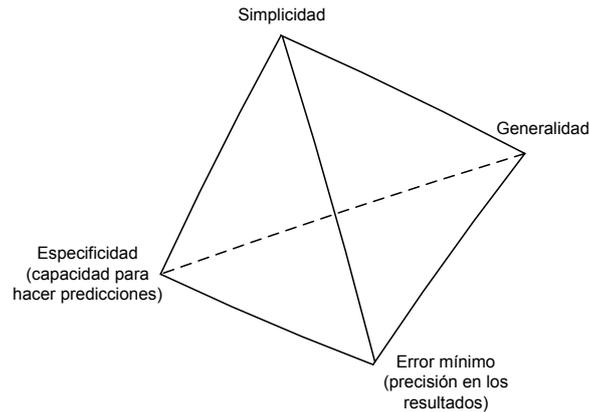
Modelar no es más (ni menos) que el arte de construir modelos. Un modelo, en sentido amplio, se puede definir como una abstracción de un sistema observado que permite establecer algún proceso de inferencia sobre como funciona el sistema o algunos aspectos de él.

Probablemente modelar es una de las actividades inherentes a todo ser humano. Así, muchos de los modelos con los que se trabaja en las Ciencias “duras” suelen ser formales, utilizando análisis matemático, regresión estadística o ecuaciones diferenciales por ejemplo. Pero también es posible, y perfectamente aceptable, hacer modelado más informal dentro de la Academia, intentando explicar en lenguaje natural la caída del Imperio Romano ó los factores que influyen en la formación de “tribus” urbanas en las grandes ciudades. E incluso personas que en absoluto se dedican a la Ciencia, constantemente desarrollan modelos mentales, más o menos explícitos, sobre ciertos aspectos de su vida cotidiana. Todo el mundo está de acuerdo en que si un profesor en una clase suelta un bolígrafo, éste se caerá, incluso si no se ha estudiado la ley de la gravedad en detalle, o que si una tarde llueve probablemente habrá más tráfico en la ciudad, a pesar de que nadie se lo ha dicho.

La bondad de un modelo depende del propósito para el que ha sido construido, sin embargo existe un conjunto de criterios generales que son aceptados como deseables en la construcción de un modelo. Varios de esos criterios están inversamente relacionados, por lo que su importancia relativa y por tanto la solución de compromiso alcanzada entre ellos dependerá del modelo y la intención específica. Como muestra el ejemplo de la figura 16, algunos de estos criterios son la mayor precisión del modelo, su mayor generalidad o simplicidad o su menor coste<sup>41</sup> (Edmonds, 2005).

---

<sup>41</sup> La relación para alcanzar el equilibrio entre los diferentes criterios de bondad de un modelo depende de cada caso particular. Se puede decir que no existen reglas generales que relaciones estos criterios, ni siquiera de forma cualitativa.



**Figura 16.** Posibles relaciones de equilibrio entre criterios de un modelo particular (Edmonds, 2005).

### 2.2.2 Tres sistemas simbólicos para modelos sociales

Diversos autores (Ostrom, 1988; Holland y Miller, 1991; Gilbert, 1999a) consideran que el abanico de técnicas disponibles para el modelado de sistemas en los que interviene la dimensión social puede ser clasificado en tres *sistemas simbólicos*<sup>42</sup>.

Una manera de representar y estudiar los fenómenos sociales es a través de la argumentación verbal en lenguaje natural. Este es el tradicional sistema simbólico que se utiliza en el análisis histórico, el cual, después de un proceso de abstracción y simplificación, describe eventos pasados enfatizando ciertos aspectos, procesos y relaciones a costa de otros. El principal problema con este tipo de representación es su falta intrínseca de precisión (debido a la ambigüedad del lenguaje natural) y la dificultad asociada de descubrir las implicaciones exactas de las ideas puestas en consideración en el modelo. En particular, utilizando este sistema simbólico con frecuencia es muy difícil determinar, en un nivel de detalle razonable, el rango completo de inferencias que se pueden obtener a partir de las hipótesis incluidas en el modelo; por tanto muchas veces resulta imposible valorar la consistencia lógica, su alcance y el grado de generalización que pueda tener.

Un segundo sistema simbólico utilizado a veces en las Ciencias Sociales, sobre todo en el ámbito de la Economía, se basa en acudir a representaciones mucho

<sup>42</sup> Veremos en la siguiente sección que desde una perspectiva más amplia estos modelos corresponden a los llamados modelos simbólicos.

más formales, acudiendo a modelos expresados mediante ecuaciones matemáticas o estadísticas. La ventaja de este sistema simbólico se debe a la potencia de las herramientas de análisis matemático que nos permiten valorar la consistencia o la generabilidad de las tesis expuestas (formalizadas mediante un conjunto de hipótesis claramente especificadas), hacer análisis de sensibilidad de las hipótesis del modelo, valorar su generalidad y otras muchas propiedades muy deseables de las que carece la representación verbal.

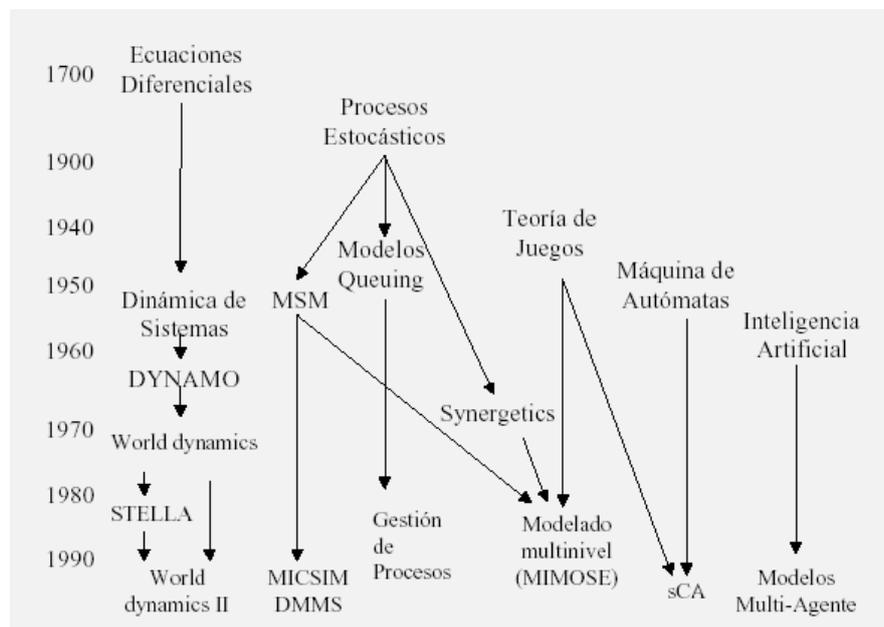
Sin embargo, la formalización matemática no está exenta de desventajas. Los sistemas sociales pueden ser enormemente complejos, por lo que si se abstraen utilizando un lenguaje formal (por ejemplo mediante ecuaciones matemáticas), se corre el riesgo de perder demasiada descriptividad. Además, en aquellos casos en los que parece que resulta posible conseguir un modelo formal satisfactorio del sistema investigado, las ecuaciones resultantes pueden ser tan complejas que el modelo formal puede ser matemáticamente intratable, y por tanto no proporcionará la mayoría de los beneficios que motivaron el proceso de formalización. Este hecho es particularmente frecuente en los modelos sociales, donde los sistemas que se tratan suelen incluir relaciones no-lineales (Axtell, 2000). La solución habitual es recurrir a hipótesis simplificadoras cada vez más restrictivas y más alejadas de la realidad hasta que se consiga un modelo tratable al cual aplicar las herramientas de análisis. Ejemplos muy habituales de este tipo los encontramos en las Ciencias Económicas; las hipótesis de racionalidad instrumental, información perfecta, agentes homogéneos y representativos, etc, no se incluyen porque los economistas piensen que el mundo en la realidad se comporte bajo estas hipótesis sino para hacer los modelos tratables (ver por ejemplo Conlisk (1996), Axelrod (1997b), Hernández (2004), Moss (2001; 2002b)).

Pero entonces, sabiendo que muchas de las hipótesis que estamos obligados a asumir pueden no ser ciertas y llevar a teorías y conclusiones erróneas, y que conseguir tratabilidad se convierte en un coste para la correcta abstracción y representación de los modelos, ¿sigue manteniendo sus ventajas este tipo de

representación para estos modelos? Parafraseando a Keynes<sup>43</sup>, a veces puede ser mejor estar *vagamente en lo correcto que de forma muy precisa en el error*.

Una solución intermedia, a medio camino entre la expresividad lingüística de la representación verbal y la potencia analítica de las herramientas matemáticas, es la simulación computacional o el modelado computacional, el tercer sistema simbólico. Este tipo de representación se caracteriza por representar un modelo mediante un programa de ordenador. Según Gilbert y Troitzsch (1999) las ventajas que a grandes rasgos aporta este tipo de modelado sobre las técnicas matemáticas se pueden resumir en la posibilidad de combinar la apariencia intuitiva de las teorías verbales con el rigor del modelado analítico formal.

La utilización de la simulación computacional como técnica de modelado en las ciencias sociales se debe a la conjunción de diversas aproximaciones y técnicas (figura 17), pero no es hasta los últimos quince años cuando se está empezando a utilizar masivamente y de forma dispersa (Axelrod, 2005a).



**Figura 17.** Desarrollo histórico de las metodologías utilizadas en la simulación social (Troitzsch, 1997).

En opinión de Axelrod (1997b), la simulación computacional es la tercera vía de hacer ciencia, complementando la inducción, la búsqueda de patrones a partir de

<sup>43</sup> “*It is better to be vaguely right than precisely wrong*” citado en López-Paredes (2004).

datos, y la deducción, la prueba de determinados teoremas a partir de unos axiomas fijados. En su opinión la simulación, como la deducción, parte con un conjunto explícito de hipótesis, pero en lugar de generar teoremas genera datos que pueden ser analizados inductivamente.

A pesar de que las líneas expuestas constituyen la división principalmente aceptada de las técnicas de modelado en la comunidad de simulación social, y ciertamente resultan útiles, nosotros no la compartimos completamente. En nuestra opinión la simulación computacional no constituye en sí un nuevo sistema simbólico, sino simplemente una (extremadamente útil) herramienta para estudiar y analizar modelos formales. Un modelo computacional no es más que un modelo matemático bien definido, expresable en un conjunto de ecuaciones deterministas o estocásticas aunque es muy posible que ese conjunto no sea conciso y compacto. Para nosotros, los computadores son motores de inferencia capaces de conducir procesos algorítmicos a muy alta velocidad. La inferencia resultante de un modelo computacional en general es: *los resultados obtenidos de ejecutar una simulación computacional son la consecuencia (con consistencia lógica) de aplicar unas reglas algorítmicas que definen el modelo bajo unos parámetros e inputs dados*<sup>44</sup>.

De esta forma, la simulación nos permite explorar las propiedades de ciertos modelos formales que son intratables utilizando análisis formal tradicional, y que fundamentalmente son capaces de proporcionar nuevo conocimiento, nuevos *insights*, incluso cuando el análisis matemático formal es posible. Para nosotros, al igual que Gotts *et al.* (2003a), el análisis matemático y la simulación no se deben considerar como aproximaciones opuestas al estudio de los sistemas formales, sino complementarias. Ambas resultan extremadamente útiles para analizar modelos formales, y se complementan en el sentido de que son capaces de ofrecer aspectos diferentes de los modelos analizados.

Como argumentaremos con más rigor en secciones posteriores de esta tesis, un modelo computacional es un modelo formal (y que por tanto podría ser expresado en lenguaje matemático, por ejemplo, mediante ecuaciones estocásticas o deterministas), y la simulación computacional es la herramienta que permite

---

<sup>44</sup> En esta frase nos referimos mediante *input* a todo aquello que pueda afectar a la salida del modelo, por ejemplo la semilla, el generador de números aleatorios, o todo aquello que pudiese ser una diferencia.

estudiarlo más allá de la tratabilidad matemática. De esta forma, podemos obtener como resultado un modelo potencialmente más realista –y todavía formal – para estudiar los sistemas sociales.

## 2.3 Modelado basado en agentes

Como se ha comentado en los apartados anteriores, modelar no es más que construir una abstracción de un sistema observado para un propósito determinado (ver Edmonds (2001) para una lista de posibles aplicaciones). Lo que diferencia a unos paradigmas de modelado de otros es la manera de construir esas abstracciones.

### 2.3.1 Concepto

El modelado basado en agentes se caracteriza porque trata de establecer una correspondencia directa entre las entidades que se identifican como participantes en el sistema observado y los agentes que constituyen el modelo abstraído. Esto contrasta con otros tipos de modelado como los que hemos visto en apartados anteriores, en los que se representan las entidades mediante valores promedio, agentes representativos o no se representan entidades en absoluto, y simplemente se representan los procesos o la evolución de determinadas variables agregadas del sistema en estudio<sup>45</sup>.

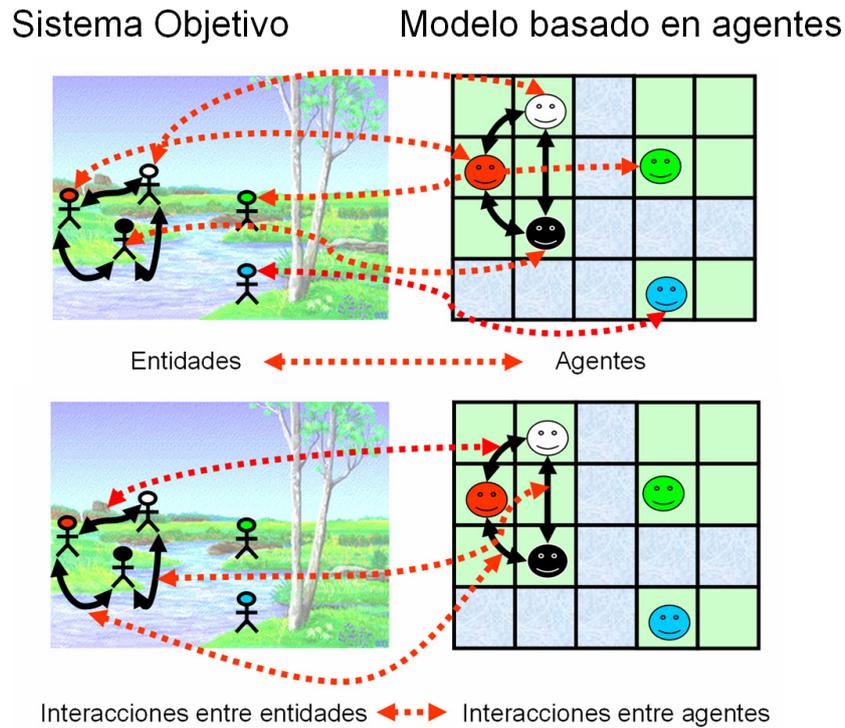
Pero no sólo se busca la identificación y correspondencia de las entidades, sino que exista también una correspondencia directa entre las interacciones del sistema objetivo y los agentes del modelo (figura 18).

Este tipo de abstracción es atractiva debido a diferentes razones que estudiaremos en profundidad en apartados posteriores. Por ejemplo, conduce a descripciones formales potencialmente más naturales del sistema observado, permite modelar heterogeneidad, facilita la representación explícita del entorno y la forma en que las entidades interactúan con él y entre ellas, permite estudiar la relación bidireccional entre individuos y grupos, etc. (Epstein (1999), Axtell (2000), Bonabeau (2002)). Sin embargo, pese a que resulta evidente que esta aproximación lleva hacia una mayor precisión descriptiva, transparencia y rigor, frecuentemente no

---

<sup>45</sup> Ver un interesante análisis comparativo entre la aproximación basada en agentes y el modelado basado en ecuaciones en Parunak *et al.* (1998).

todo son ventajas, y su uso conlleva un precio asociado: la mayoría de los modelos construidos de esta forma suelen ser intratables matemáticamente, por lo que se ha de recurrir a la simulación computacional para su estudio. Es por eso por lo que en la literatura científica encontramos los términos modelado basado en agentes y simulación basada en agentes como sinónimos utilizados indistintamente<sup>46</sup>.



**Figura 18.** En el modelado basado en agentes las entidades del sistema objetivo se representan explícita e individualmente en el modelo. Los límites de las entidades en el sistema objetivo corresponden a los límites de los agentes en el modelo, y las interacciones entre las entidades corresponden a las interacciones de los agentes en el modelo.

Esta idea contrasta sutilmente con la clasificación de modelos para las Ciencias Sociales de los apartados anteriores en la que la simulación computacional constituye un modo de modelar en sí mismo, mientras que en nuestra opinión, lo que constituye la esencia del modelado basado en agentes es la representación individual y explícita de las entidades, la simulación es la herramienta a la que hemos de acudir para estudiar las implicaciones de los modelos.

<sup>46</sup> A partir de aquí utilizaremos ambas nomenclaturas indistintamente salvo que se quiera hacer notar el matiz.

Uno de los conceptos más importantes asociados a este tipo de modelado es el concepto de *emergencia*<sup>47</sup>. Formalmente se puede definir que un fenómeno es emergente si requiere para ser descrito de nuevas categorías que no se requieren para describir el comportamiento de los componentes que lo subyacen<sup>48</sup> (Gilbert y Terna, 2000). La idea que encierra esta definición es la posibilidad que ofrecen los sistemas basados en agentes de estudiar las macro-propiedades *que emergen* en el sistema a partir de la micro-definición de los comportamientos de los agentes que lo componen, es decir, de estudiar las relaciones micro-macro. Se trata de buscar qué patrones de comportamiento surgen a nivel de sistema y que no son evidentes a partir de la consideración de las propiedades de los agentes individuales<sup>49</sup>.

Una de las visiones más extendidas que existen sobre el modelado basado en agentes es su consideración como vía para la realización de experimentos generativos y su carácter constructivista. Así, no es infrecuente considerarlos como laboratorios computacionales en los que experimentar con una *sociedad artificial* de agentes. De esta forma, dado un fenómeno a nivel de sistema que se quiera explicar, el experimento canónico con un ABM es:

*“Situación una población inicial de agentes autónomos heterogéneos en un entorno espacial relevante; permitirlos interactuar de acuerdo a reglas locales simples, y generar – o “hacer crecer” – la regularidad macroscópica [observada] de arriba a bajo [bottom-up]” (Epstein y Axtell, 1996)<sup>50</sup>*

En realidad, un ABM nos proporciona *una demostración computacional de que una micro-especificación dada es condición suficiente para generar un determinado comportamiento global*. Quizá otro error heredado de la división de los tipos de modelado en los tres sistemas simbólicos sea considerar los ABM como algo diferente a un modelo matemático. Es cierto que normalmente no es posible expresar un modelo de este tipo como un conjunto compacto y conciso de ecuaciones

---

<sup>47</sup> Ver extensas revisiones del concepto en diversos campos científicos en Holland (1998) y Johnson (2001).

<sup>48</sup> En el caso de modelos basados en agentes, los propios agentes.

<sup>49</sup> Cuando se utiliza la simulación basada en agentes para modelar fenómenos sociales hay que tener en cuenta que surge una dificultad añadida frente a los procesos naturales. Como apunta Gilbert (1995), en los fenómenos naturales los componentes afectan al sistema, sin embargo en los fenómenos sociales resulta muy frecuente encontrarnos con componentes que constituyen un sistema, y que por tanto determinan su comportamiento, pero que a su vez su comportamiento individual está condicionado por la dinámica del sistema global, es lo que se llama *emergencia de segundo orden*.

<sup>50</sup> Traducción propia.

fácilmente interpretables y generalizables, pero lo cierto es que un ABM consiste en un conjunto de funciones, estocásticas o deterministas, bien definidas.

De hecho no resulta difícil caracterizar formalmente y de forma general un modelo basado en agentes (Leombruni y Richiardi, 2005):

Asumamos<sup>51</sup> que en cada instante  $t$  un individuo  $i$ , ( $i \in 1, \dots, n$ ) puede ser descrito por una variable de estado  $x_{i,t} \in \mathbb{R}^k$ . Sea la evolución de su variable de estado especificada por la siguiente ecuación en diferencias:

$$x_{i,t+1} = f_i(x_{i,t}, x_{-i,t}; \alpha_i) \quad (16)$$

donde asumimos que las reglas de cada individuo pueden ser específicas de cada individuo tanto en la función  $f_i(\cdot)$  como en los parámetros  $\alpha_i$ , y que pueden depender del estado de  $x_{-i}$  del resto de individuos distintos de  $i$ . En un modelo de simulación típico, una vez especificado el comportamiento de cada individuo mediante (16), resultará de interés el estudio de alguna macropropiedad del sistema completo, que se podrá representar como un estadístico  $Y$  definido sobre la población de la sociedad artificial:

$$Y_t = s(x_{1,t}, \dots, x_{n,t}) \quad (17)$$

Es fácilmente demostrable que la ecuación (17) para cada  $t$  puede ser resuelta independientemente de la especificación adoptada para  $f_i(\cdot)$ . Para ello sólo hay que darse cuenta de que la solución puede ser encontrada iterativamente solucionando cada término  $x_{i,t}$  en (17) utilizando (16):

$$\begin{aligned} Y_0 &= s(x_{1,0}, \dots, x_{n,0}) \\ Y_1 &= s(x_{1,1}, \dots, x_{n,1}) \\ &= s(f_1(x_{1,0}, x_{-1,0}; \alpha_1), \dots, f_n(x_{n,0}, x_{-n,0}; \alpha_n)) \\ &\equiv g_1(x_{1,0}, \dots, x_{n,0}; \alpha_1, \dots, \alpha_n) \\ &\vdots \\ Y_t &= g_t(x_{1,0}, \dots, x_{n,0}; \alpha_1, \dots, \alpha_n) \end{aligned} \quad (18)$$

<sup>51</sup> La formalización está referida para el caso determinista, sin embargo en el caso estocástico es prácticamente equivalente. También se ha hecho la hipótesis implícita de considerar los modelos basados en agentes como modelos de simulación de eventos discretos. Aunque a nivel teórico podrían implementarse mediante otros mecanismos, a nivel práctico prácticamente todos los modelos implementados en la realidad se pueden considerar como tales.

La ley de comportamiento de la variable  $Y$  únicamente se relaciona en cualquier instante de tiempo  $t$  con la condiciones iniciales del sistema y con los valores de los parámetros  $\alpha_i$ . Es posible que en determinadas ocasiones,  $g_t$  pueda converger a una función no dependiente de  $t$ , en cuyo caso podríamos obtener el valor de equilibrio para  $Y$  mediante (19):

$$Y^e = \lim_{t \rightarrow \infty} Y_t \equiv g(x_{1,0}, \dots, x_{n,0}; \alpha_1, \dots, \alpha_n) \quad (19)$$

A pesar de que las diferentes funciones  $f_i(\cdot)$  pueden ser relativamente sencillas<sup>52</sup>, la complejidad de las funciones que gobiernan el comportamiento de las variables agregadas que rigen la macrodinámica del sistema crece rápidamente, haciéndolas muy difíciles de manejar algebraicamente. Mediante la ejecución de simulaciones con diferentes parámetros y condiciones iniciales, formalmente lo que se realiza es un estudio experimental del comportamiento local de la función alrededor de los valores donde se está simulando. De hecho, esta función incluso podría ser estadísticamente estimada  $\hat{g}_t(x_{1,0}, \dots, x_{n,0}; \alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta)$  como aquella función que mejor ajusta a los datos generados artificialmente, donde  $\beta$  son los coeficientes de  $\hat{g}_t(\cdot)$ .

### 2.3.2 Terminología y diferentes usos de ABM

Dejando a un lado la formalización del problema, un aspecto importante muy relacionado con el propio concepto del modelado basado en agentes, y que puede llegar a confundir al lector no iniciado en la metodología es la terminología utilizada. Ya hemos visto que es frecuente utilizar como sinónimos *modelado basado en agentes* y *simulación basada en agentes*, excepto por el diferente matiz que comentamos anteriormente, pero lo cierto es que existe todo un glosario complementario que hace referencia a conceptos parecidos o similares que conviene aclarar para que puedan servir de guía por la literatura.

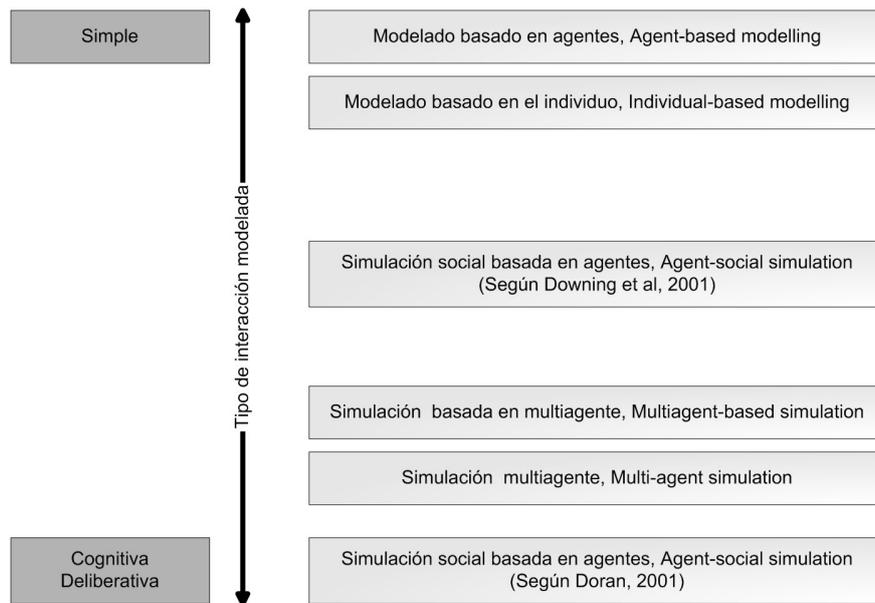
---

<sup>52</sup> En cuanto a cómo deberían ser especificados los comportamientos de los agentes para la construcción de los modelos la respuesta obvia es depende del objeto del modelo. A pesar de ello, existe una línea de pensamiento marcada por la busca de la simplicidad con el lema KISS, “*keep it simple stupid*” (Axelrod, 1997a), mientras que existe otra que pone el acento en la precisión descriptiva del comportamiento de los agentes con el lema KIDS “*keep it descriptive stupid*” (Edmonds y Moss, 2005). El principio KISS se corresponde con el conocido *principio de Occam* (*Occam's razor*) o *principio de parsimonia* que establece que no se deben hacer más hipótesis de las necesarias y entre dos modelos equivalentes conviene quedarse con aquel que sea más sencillo.

Entre estos términos nos encontramos el mencionado modelado basado en agentes (*agent-based modelling*) (Dean *et al.*, 2000; Axelrod y Tesfatsion, 2005), simulación y modelado basado en agentes (*agent-based simulation modelling*) (Polhill *et al.*, 2001), simulación multi-agente (*multi-agent simulation*) (Ferber, 1999; Dal Forno y Merlone, 2002), simulación basada en multi-agente (*multi-agent based simulation*) (Davidsson, 2001; Drogoul *et al.*, 2003), simulación social basada en agentes (*agent-based social simulation*) (Downing *et al.*, 2001; Doran, 2001; Davidsson, 2002) ó modelado basado en el individuo (*individual-based modelling*) (Grimm, 1999; Edwards *et al.*, 2003).

Un interesante intento de clarificación de estos términos es el llevado a cabo por Hare y Deadman (2004) estableciendo dos aproximaciones límites para la metodología. Por un lado, en un extremo se enfatiza el fenómeno a modelar por encima del agente individual. En estos casos los agentes suelen ser muy simples buscando entender qué micromecanismos provocan determinadas macroestructuras. Por otro lado y como alternativa, se pone el acento en la capacidad social cognitiva y deliberativa del agente. En este último caso las interacciones se generan a partir de la capacidad de deliberación del agente por lo que se suelen implementar agentes bastante o muy sofisticados. Entre estos dos valores límites que identifican el primer caso con *modelado basado en agentes* y el segundo con *simulación social basada en agentes* (según Doran (2001)), se sitúan de acuerdo a la sofisticación de la interacción de los agentes, los términos utilizados en la literatura (figura 19).

Llamemos la metodología como la llamemos, las clasificaciones de los usos pueden ser diversas, desde las fundamentadas en su dominio de aplicación (Axelrod, 1997b; Edmonds, 2001), hasta ya dentro de su aplicación en un contexto social, las basadas en los objetivos de la investigación, bien empíricos, normativos, heurísticos o metodológicos (Axelrod y Tesfatsion, 2005); la clasificación de Gilbert (2005) de los modelos en función de 5 dimensiones: abstractos o descriptivos, artificiales o realistas, positivos o normativos, espaciales o de redes, con agentes complejos o simples, o bien clasificaciones también multidimensionales desde por el dominio de aplicación hasta por el tipo de modelo como en David *et al.* (2004).



**Figura 19.** Diferentes términos de la metodología de acuerdo a la diferente sofisticación de la interacción modelada por Hare y Deadman (2004).

Una de las clasificaciones más interesantes y que será la que comentaremos aquí es la de Axtell (2000) y que se basa en el uso de la computación basada en agentes en relación a la posibilidad de aplicación del análisis matemático conciso como herramienta de estudio de un sistema. Axtell identifica tres motivos por los que emplear la computación basada en agentes:

1. Cuando los modelos pueden ser completamente formulados y resueltos, es el uso del modelado basado en agentes como simulación clásica. Esta utilización corresponde a situaciones en las que el análisis matemático formal expuesto en el apartado anterior puede ser, primero, formulado y además resuelto, idealmente de forma simbólica, o bien si no es posible, numérica. La pregunta inmediata que surge en este uso es – *y entonces ¿para qué necesitamos un modelo computacional y simulaciones si podemos resolver el problema algebraicamente?* – La respuesta que Axtell da es múltiple:
  - a. una primera justificación podría obtenerse en casos en los cuales sólo se pudiese hallar la solución de forma numérica. En estos casos se podría utilizar un modelo basado en agentes como método de verificación; obviamente, la solución numérica debería ser consecuente con los resultados que emergen en el modelo, aunque lo

cierto es que utilizar modelos para esta tarea es una práctica poco común<sup>53</sup>.

- b. Un segundo uso de los agentes como simulación clásica surge cuando se utilizan los modelos basados en agentes como un tipo de simulación de Monte Carlo. Imaginemos que un determinado *output* de un modelo estocástico es dado por  $Y=f(X)$ , donde  $f$  es una función determinista y  $X$  una variable aleatoria. Una manera de construir la respuesta del sistema  $Y$  de forma progresiva podría ser a partir de la ejecución de múltiples instancias de  $X=x$  y para cada una de ellas obtener un  $y=f(x)$ , aunque viéndolo con perspectiva no se trata de mucho más que resolver numéricamente el problema.
  - c. La tercera aplicación de la computación con agentes dentro de los modelos resolubles surge de su capacidad para representar de manera visual resultados matemáticos. Este uso resulta especialmente interesante para demostrar determinados patrones y facilitar el entendimiento de comportamientos del sistema a gente que pueda tener interés en el modelo, pero una con una modesta base teórica en matemáticas o estadística<sup>54</sup>.
2. El segundo uso de ABM según Axtell, y de aún mayor interés que el primero, cuando se trata con modelos parcialmente solubles, es la utilización de agentes artificiales para complementar la teoría matemática cuando ésta no es capaz de solucionar analíticamente y de forma completa un modelo. Este tipo de utilización resulta especialmente interesante debido a que son muchas las razones por las cuales puede no ser posible solucionar completamente un modelo. De hecho, la solución analítica en general es la excepción cuando se trata con modelos complejos. Es aquí cuando cobra vigencia la utilización de ABM, entre otras razones que analizaremos a continuación, para relajar las hipótesis generalmente fortísimas e indeseables<sup>55</sup> que se introducen para

---

<sup>53</sup> Aunque sí que existe algún caso (Carpenter, 2002).

<sup>54</sup> Esta es uno de las utilidades del modelado basado en agentes que quedó demostrada empíricamente durante los procesos de participación en las fases de diseño y validación del modelo FIRMABAR con una plataforma de *stakeholders* (López-Paredes *et al.*, 2005).

<sup>55</sup> Por no ser excesivamente realistas.

hacer los modelos solucionables. Es más, sobre todo en el ámbito de la Economía (Leombruni y Richiardi, 2005), es bastante común utilizar como argumento contra la metodología su falta de generalidad; al final, sostienen los defensores de este argumento, las ejecuciones llevadas a cabo con un modelo son realizaciones individuales de un modelo y a partir de ellas no es posible sacar conclusiones excesivamente fuertes del sistema de estudio. Sin embargo, y puesto que, como hemos argumentado ya con anterioridad, las ejecuciones de simulaciones son teoremas de suficiencia del modelo, uno de los posibles roles de ABM puede ser evaluar mediante la generación de contraejemplos la robustez de las conclusiones de modelos matemáticos<sup>56</sup> cuando se relajan sus hipótesis. La ventaja que aquí aporta ABM es que no sólo nos da un aspecto parcial de la solución, el equilibrio o la zona de estabilidad, sino que al crear un modelo de este tipo encapsulamos completamente todas las soluciones y trayectorias del modelo, desde las dinámicas fuera del equilibrio a las cuencas de atracción, la dependencia de los parámetros, etc. Esta característica permite profundizar y completar la exploración de las soluciones matemáticas en los modelos de diversas formas, que siguiendo de nuevo a Axtell, se pueden categorizar en:

- a. Modelos en los que el equilibrio existe pero no es computable en la práctica, o existen diferentes equilibrios pero no es fácil decidir hacia cual de ellos convergerá el sistema, o bien se producen fenómenos de dependencia histórica débil en los que la historia particular de las interacciones y capacidades de los agentes individuales tiene alta importancia para los individuos en sí, pero no para el sistema en general.
- b. Modelos en los que no se obtiene el equilibrio cuando se implementan agentes de racionalidad limitada. En estos casos caracterizar los fenómenos de no-equilibrio analíticamente suele ser bastante complejo, mientras que resulta uno de los puntos fuertes de ABM<sup>57</sup>.

---

<sup>56</sup> Nótese que aquí estamos haciendo referencia a modelos matemáticos compactos, puesto que como ya se ha argumentado un modelo computacional es estrictamente también un modelo matemático.

<sup>57</sup> Ver por ejemplo el famoso caso de los diferentes regimenes de estructuras de precios y volúmenes del *Artificial Stock Market* (Arthur *et al.*, 1997b).

- c. Modelos en los que se obtiene el equilibrio asintóticamente pero no se alcanza durante mucho tiempo, como por ejemplo en modelos ergódicos en los que todos los estados pueden ser visitados con probabilidad positiva. En estos casos el concepto de equilibrio asintótico recae en los estados en los que el sistema está la mayor parte del tiempo. Un ejemplo de este tipo de análisis, en el que los modelos basados en agentes son herramientas efectivas para explicar la estructura de estos modelos, es el juego de normas de Axelrod (1986) y el análisis mediante experimentos computacionales y desarrollo analítico del *estado evolutivamente estable*<sup>58</sup> del juego (Galán y Izquierdo, 2005).
- d. Modelos en los que el equilibrio existe pero es inestable o existen varios equilibrios todos ellos inestables. En ese tipo de situaciones se han aplicado modelos basados en agentes para llegar a entender el comportamiento de tales modelos (Axtell, 1999).
- e. Modelos en los que existe dependencia de hipótesis y/o parámetros desconocidos como demuestra (Axelrod, 1997c) para entender la dependencia de los parámetros en su modelo y valorar la importancia de las hipótesis.
- f. Modelos en los que solamente se conoce la configuración de equilibrio en interacciones en redes muy simples. Es bastante habitual el caso de muchos modelos con influencia espacial en los que añadir dimensiones complica el análisis, de tal manera que es necesario recurrir a análisis computacionales basados en agentes para estudiar los modelos (ver por ejemplo las extensiones de los modelos de Schelling (1971; 1978) por Zhang (2004)).
- g. Modelos en los que el equilibrio es menos importante que las fluctuaciones y los eventos extremos. Existen multitud de modelos en los que puede resultar tan interesante o más que conocer los puntos de equilibrio, conocer la dinámica y el comportamiento del modelo

---

<sup>58</sup> En el caso del juego de normas es único.

cuando éste no se encuentra en equilibrio. Esto puede ocurrir por diferentes razones, quizá porque se trate de un modelo dinámico en el que los puntos de equilibrio puedan variar más rápido que los mecanismos de convergencia hacia los estados o cualquier otra razón. En estos casos puede resultar interesante estudiar propiedades tales como el tiempo de tránsito entre equilibrios, la esperanza de tiempo en un estado de equilibrio particular, la dependencia de los niveles de ruido, etc. En estas situaciones el modelado basado en agentes es una herramienta muy interesante para estudiar estas mecánicas. Por ejemplo, ver los trabajos de Nagel y Rasmussen (1994) para el estudio de las propiedades dinámicas de modelos de tráfico urbano.

3. El tercer uso general en el que se pueden utilizar los modelos basados en agentes es cuando se trata con modelos intratables o modelos formalmente insolubles, es lo que Axtell (2000) considera computación basada en agentes como *sustituto* del análisis matemático. En estos casos, en los que la manipulación simbólica tiene poca utilidad, los modelos en agentes pueden suponer una de las pocas herramientas disponibles para el científico. Sin embargo lo cierto es que la literatura científica en la que se utilizan los agentes en esta aplicación es menos extensa que en los anteriores usos, aunque sí que existen contribuciones relevantes (ver Hamilton *et al.* (1990)).

## 2.4 Metodología en ABM

### 2.4.1 Marco general

Drogoul *et al.* (2003) identifican tres roles en el diseño, implementación y uso de un modelo basado en agentes típico<sup>59</sup>: el *thematician*, el *modeller* y el *computer scientist*<sup>60</sup>. En nuestra opinión estos tres roles se ajustan razonablemente bien en el marco propuesto por Edmonds (2001) para describir el proceso de modelado con abstracción intermedia. En este apartado de la tesis unificamos las visiones de la metodología de modelado propuestas por Drogoul *et al.*, y por

---

<sup>59</sup> Resulta muy habitual en la especialidad que una misma persona se encargue de varios e incluso todos los roles.

<sup>60</sup> Hemos considerado no traducir estos términos puesto que todavía no existe una traducción aceptada en castellano.

Edmonds, mediante la disección de unos de los roles propuestos por Drogoul y mediante una ligera expansión del marco de Edmonds (figura 20). El objetivo de este marco es identificar no sólo las etapas de modelado sino también para definir con precisión los errores y artefactos que pueden tener lugar durante el desarrollo (Galán *et al.*, 2006). Empezaremos explicando los tres diferentes roles propuestos por Drogoul *et al.* (2003).

El rol de *thematician* se lleva a cabo por los expertos en el dominio. Son aquellos que mejor entienden el sistema objetivo, y por tanto quienes se encargan del proceso de producir la primera conceptualización del sistema estudiado. Su trabajo comprende definir los objetivos y el propósito del ejercicio de modelado, identificando los componentes críticos del sistema y las interrelaciones entre ellos, y también la descripción de las relaciones causales más relevantes. El *output* de esta primera etapa del proceso, en la mayoría de las ocasiones, es un modelo no-formal expresado en lenguaje natural apoyado eventualmente con diagramas conceptuales sencillos, por ejemplo de bloques. El modelo no-formal resultante de este proceso puede describir el sistema utilizando términos ambiguos (tales como aprendizaje o imitación, sin especificar completamente como tienen lugar efectivamente esos procesos).

La siguiente etapa en el proceso de modelado es responsabilidad del rol de *modeller*. La tarea del *modeller* consiste en transformar el modelo no-formal que el *thematician* quiere explorar en las especificaciones de los requerimientos (formales) que el *computer scientist* –el tercer rol – necesita para formular el modelo ejecutable (formal). Su trabajo implica al menos tres desafíos fundamentales. El primero consiste en actuar como puente de enlace entre dos dominios que con frecuencia son fundamentalmente muy diferentes (como puede ser la Sociología y la Informática). El segundo desafío se deriva del hecho de que en la mayoría de los casos el modelo propuesto por el *thematician* no está completamente especificado, por ejemplo, existen muchos modelos formales conformes a la especificación del modelo del *thematician*<sup>61</sup>. En otras palabras, el modelo formal creado por el *modeller* es una de las muchas particularizaciones del modelo del *thematician* (más general). Por último, el tercer desafío aparece cuando el modelo del *thematician* no es consistente, lo cual

---

<sup>61</sup> Nótese que el *thematician* se enfrenta al mismo problema, existen infinitos modelos que se pueden definir para un dominio específico.

puede ser perfectamente posible puesto que normalmente se formula en lenguaje natural. Descubrir inconsistencias en modelo expresados en lenguaje natural no es una tarea trivial. Autores como Christley *et al.* (2004), Pignotti *et al.* (2005), y Polhill y Gotts (2006), consideran las ontologías particularmente útiles en esta etapa, especialmente en el dominio de la simulación social basada en agentes.

Así, el *modeller* tiene la difícil –potencialmente inviable– tarea de encontrar un conjunto de especificaciones de requisitos (formales y consistentes) en la que cada uno de ellos sea un caso particular legítimo del modelo propuesto por el *thematician*, y que además sea representativo de las especificaciones del *thematician* (el conjunto es suficiente para caracterizar completamente el modelo del *thematician* de forma satisfactoria).

El tercer rol propuesto por Drogoul *et al.* es el *computer scientist*. Aquí nosotros dividimos este rol entre *computer scientist* y *programmer*. A menudo se da el caso de que el *modeller* crea un modelo formal que es imposible de implementar en un ordenador. Esto puede ocurrir, por ejemplo, porque el modelo utiliza ciertos conceptos con los que un ordenador actual no puede operar hoy en día (p.e. con número reales en lugar de con número en punto flotante), o porque la ejecución del modelo demande tanta capacidad computacional que no esté disponible (p.e. en términos de memoria o capacidad computacional). La función del *computer scientist* consiste entonces en encontrar un modelo apropiado del modelo formal del *modeller* que pueda ser ejecutado en un computador (o en varios) dados los recursos disponibles. Para conseguir esto, el *computer scientist* puede aproximar o simplificar ciertos aspectos del modelo formal del *modeller*.

Las ecuaciones de Navier-Stokes de dinámica de fluidos son un caso paradigmático de esta tarea. Se trata de un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales que describen el movimiento de un fluido. A pesar de que estas ecuaciones están consideradas como un muy buen modelo (formal y completamente especificado), su complejidad es tal que sólo se obtienen soluciones analíticas para los casos más sencillos. En situaciones más complejas, las soluciones de las ecuaciones de Navier-Stokes se estiman mediante aproximaciones y computación numérica (Heywood, 1990; Salvi, 2002). De forma similar, en el dominio de la simulación social basada en agentes, lo que realmente encontramos en los artículos

publicados es la descripción del modelo formar del *modeller*, expresados típicamente mediante ecuaciones en aritmética real. Sin embargo, resulta importante darse cuenta de que en realidad no es el modelo del *modeller*, sino el modelo del *computer scientist* (otro modelo por tanto) el que realmente se ejecuta en el ordenador.

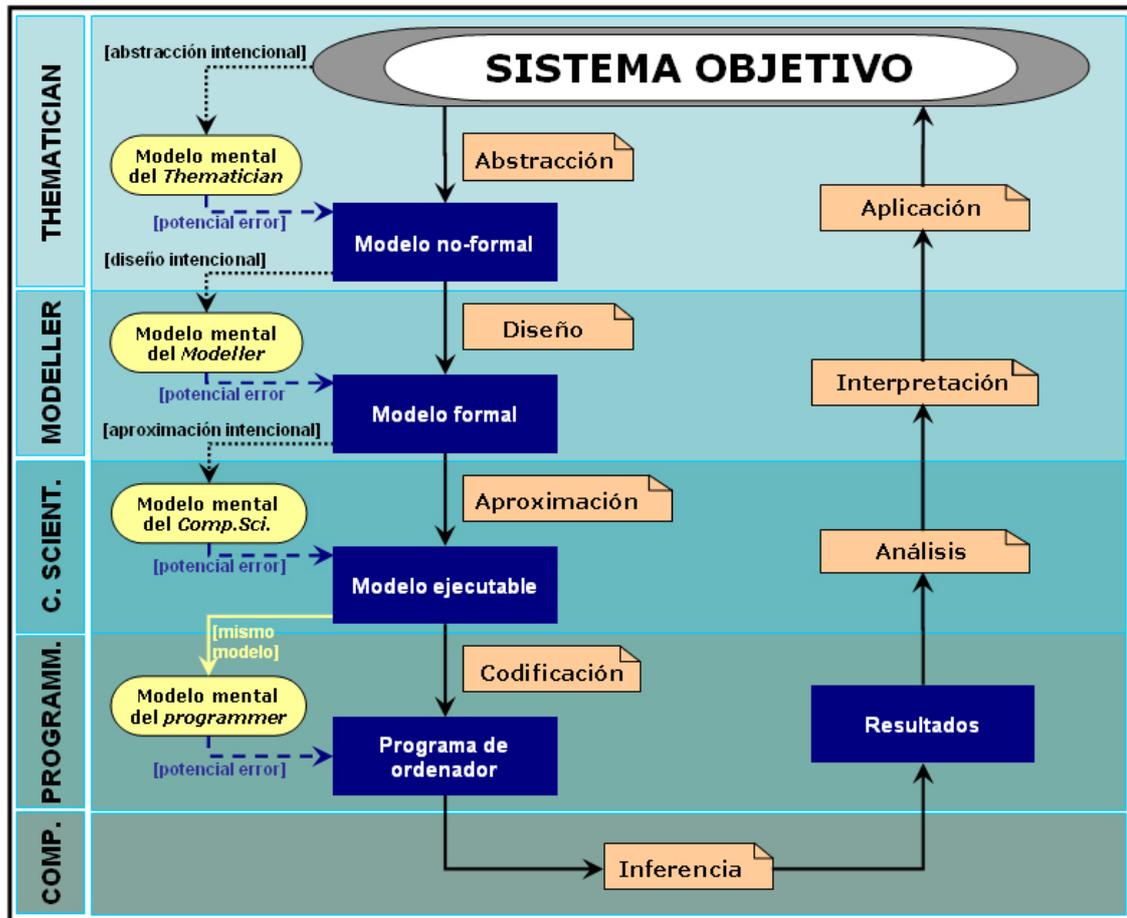
Finalmente, el rol del *programmer* es implementar el modelo ejecutable del *computer scientist*. En nuestro marco, por definición del rol del *computer scientist*, el modelo ejecutable que produce ha de estar completamente especificado, ha de incluir toda la información necesaria para que dado un cierto *input*, el modelo genere siempre el mismo *output*. Así, el modelo ejecutable debería especificar en su definición del modelo todo aquello que pueda suponer una diferencia, desde el sistema operativo si tuviese influencia al generador de números aleatorios utilizado. Esto implica que la tarea del *programmer* no entabla ningún proceso de abstracción o simplificación, el modelo ejecutable y el modelo mental del *programmer* son por definición el mismo (figura 20)<sup>62</sup>. El trabajo del *programmer* consiste en “solamente” transcribir el modelo ejecutable en un lenguaje de programación<sup>63</sup>. Si no comete ningún error, el modelo implementado y el ejecutable serán el mismo.

Cualquier diferencia entre el modelo mental de cualquiera de los roles y el modelo actual se considera un error. La distinción entre los roles del *computer scientist* y el *programmer* se hacen para distinguir entre errores de implementación de un modelo completamente especificado (cometidos por el *programmer*) de los errores derivados de una falta de comprensión completa del funcionamiento del programa de computador (cometidos por el *computer scientist*). El nombre de estos roles se debe a que, como ya hemos comentado, la mayoría de los modelos basados en agentes se implementan como programas de ordenador y posteriormente se exploran mediante simulación. Sin embargo, uno podría pensar en un matemático llevando a cabo ambos roles, especialmente si el modelo propuesto por el *modeller* fuese resoluble matemáticamente.

---

<sup>62</sup> Consideramos que dos modelos formales son el mismo modelo si y sólo si producen los mismos *outputs* para los mismos *inputs*.

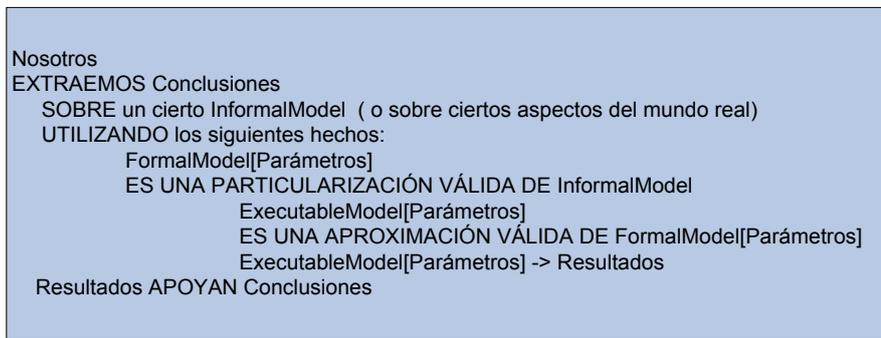
<sup>63</sup> Existen algunos intentos muy interesantes con INGENIAS (Pavón y Gómez-Sanz, 2003) para utilizar lenguajes visuales y de modelado como lenguajes de programación en lugar de cómo simplemente lenguajes de modelado (Sansores y Pavón, 2005a; Sansores *et al.*, 2006). Estos esfuerzos ayudan a sistematizar el paso desde el modelo ejecutable hacia la implementación (además en diferentes plataformas de simulación).



**Figura 20.** Diferentes fases en el proceso de diseño, implementación y uso del modelado basado en agentes. Fuente: Galán *et al.* (2006).

Una vez que el modelo computacional es implementado, se ejecuta, y los resultados generados se analizan. El análisis de los resultados del modelo computacional conduce a las conclusiones sobre el comportamiento del modelo del *computer scientist* y, hasta el punto en el que el modelo del *computer scientist* es una aproximación válida del modelo formal del *modeller*, esas conclusiones pueden ser también aplicadas al modelo formal del *modeller*. De nuevo, hasta el punto en que pueda considerarse que el modelo formal es una particularización legítima del modelo no-formal, se podrá interpretar en los términos utilizados en el modelo no-formal. Es más, si el modelo formal del *modeller* es representativo del modelo del *thematician*, entonces será lícito establecer afirmaciones generales sobre el comportamiento del modelo del *thematician*. Finalmente, si el modelo del *thematician* es satisfactorio capturando la realidad social, entonces el conocimiento

inferido en el proceso completo puede ser aplicado significativamente en el sistema objetivo (figura 21).



**Figura 21.** Esquema lógico del proceso de inferencia a través del marco de modelado propuesto.

Todo este proceso de modelado, diseño, implementación, análisis y uso de los modelos computacionales es paralelo a diferentes aspectos específicos y prácticos en el proceso de investigación. Algunos de estos aspectos en nuestra opinión merecen una consideración individual aunque sea de forma breve. En las siguientes secciones analizaremos específicamente cuatro etapas. Las tres primeras contemplan el proceso de programación del modelo, el análisis de los datos y compartir los resultados. La cuarta engloba los aspectos de replicación, validación y verificación de modelos. Todos ellos se sitúan a lo largo de los roles teóricos que acabamos de identificar.

## 2.4.2 Programar un modelo y analizar los resultados

Cuando se entra en el aspecto práctico de programación de un modelo basado en agentes, y una vez que la etapa de diseño abstracto del modelo ha concluido, una de las primeras preguntas que alguien se hace es ¿qué lenguaje o plataforma debo utilizar para implementar un modelo? Puesto que la Teoría de la Computación nos dice que la mayoría de los lenguajes de programación de propósito general a efectos prácticos pueden funcionar como una máquina de Turing, cualquier programa desarrollado en un lenguaje de este tipo podría también desarrollarse en cualquier otro, por lo que en principio y a nivel teórico, el implementar un modelo en uno u otro lenguaje no debería tener excesiva influencia. Lo que ocurre es que a nivel práctico, el esfuerzo necesario para desarrollar modelos en uno u otro lenguaje, dependiendo del modelo y sus propósitos puede variar enormemente, por lo que el

problema sí cobra importancia. Mucho más si en lugar de utilizar lenguajes de propósito general utilizamos alguna de las plataformas específicas para este tipo de desarrollo que existen y que analizaremos más adelante en esta tesis, con las que aprovechando las características de reutilización y modularidad de la programación orientada a objetos se puede reducir enormemente el esfuerzo.

Axelrod (1997b) en el desarrollo de un modelo de simulación aconseja que el programa desarrollado cumpla tres requisitos: validez, usabilidad y extendibilidad. La validez a la que hace referencia Axelrod corresponde a que el programa ha de implementar correctamente el modelo conceptual. El segundo objetivo que marca Axelrod, el de la usabilidad, hace referencia a que el programa debe permitir tanto al investigador como a cualquier otro que desee ejecutar el software interpretar los resultados y entender como funciona fácilmente. Por último, la extendibilidad busca que al desarrollar un programa conviene tener en mente la posibilidad de adaptar el programa para nuevos usos.

Teniendo estos principios en cuenta, en el desarrollo de un modelo la primera decisión que se ha de tomar, incluso antes de elegir la plataforma o lenguaje de desarrollo, es el paradigma de modelado que resulta más interesante para los objetivos del modelo, posteriormente dentro del paradigma, declarativo o procedural, elegiremos la plataforma que más nos interese.

Generalmente el paradigma viene determinado por la información disponible y el conocimiento sobre el modelo que se desea implementar. Mientras que en la aproximación procedural los procesos determinan los estados, en la aproximación declarativa, son los estados los que condicionan los procesos (Edmonds *et al.* (1996)). En ambos casos la forma típica de trabajar es describir el problema que está siendo estudiado, y a partir de ahí deducir las consecuencias a través de la ejecución del programa. En los lenguajes procedurales (tipo *Swarm*, *RePast*, *Mason*) lo que se ha de especificar de antemano son los procesos, mientras que en los lenguajes declarativos (tipo *SDML*) los procesos emergen y lo que se especifica inicialmente es un conjunto de hechos ciertos tanto del entorno como de las creencias de los agentes. En los lenguajes procedurales el comportamiento de los agentes se implementa mediante algoritmos incluidos en los métodos de las clases que los instancian, mientras que los lenguajes declarativos el comportamiento de los agentes se

especifica mediante implicaciones lógicas, que durante el desarrollo de la ejecución del programa, un motor de inferencia lógica evaluará iterativamente. Dependiendo del conocimiento disponible y del que se desee extraer del problema convendrá elegir un paradigma u otro. En el anexo B de esta memoria se analizan con más detalle, y ya dentro de cada plataforma específica, los métodos clásicos de implementación de programas en ambos casos, pero resulta interesante decir que en general la inmensa mayoría de los modelos que existen hoy en día en la literatura científica actual poseen una estructura procedural.

Una vez que el modelo ha sido creado, se diseñan los experimentos y se ejecutan las simulaciones. Una de las ventajas que posee la simulación es que puede generar tantos datos como se desee, datos que es necesario analizar. Típicamente en los modelos de simulación social basada en agentes aparecen fenómenos de dependencia histórica (ver por ejemplo, Pajares *et al.* (2003a; 2004)), el famoso *path dependence*, es decir, en el desarrollo de muchas simulaciones nos damos cuenta de que la historia específica importa. Esto abre todo un abanico de posibilidades para analizar los resultados del modelo desde diferentes puntos de vista, al menos tres (Axelrod, 1997b): desde un punto de vista cronológico, desde el punto de vista de un actor específico o desde un punto de vista global. En cualquiera de los casos, y puesto que en general este tipo de modelos incluyen procesos estocásticos, es necesario realizar suficientes ejecuciones de los modelos para poder llegar a conclusiones de cómo se comporta el modelo *normalmente*, y no sólo a conclusiones de cómo *se puede comportar* (Cioffi-Revilla, 2002; Galán y Izquierdo, 2005).

### 2.4.3 Compartir los resultados

Uno de los últimos pasos en el proceso de investigación a través de un modelo basado en agentes es compartir los resultados con la comunidad científica. Este paso, a pesar de lo que pueda parecer, puede presentar diferentes problemas debido a diversas razones. Una primera es que es difícil presentar los resultados de forma breve. Como Axelrod (1997b) indica, las simulaciones suelen ser muy sensibles a los detalles del modelo, por lo que es necesario describirlo con mucho detalle. Además, el análisis de los resultados incluye a menudo la descripción narrativa de historias de una o más ejecuciones, lo que suele ocupar bastante espacio también. Si a eso unimos que normalmente la audiencia de los modelos de

simulación suele ser interdisciplinar –y por tanto heterogénea – y que muchas veces se requieren conocimientos computacionales, aunque sean básicos, el problema de compartir los resultados no resulta trivial.

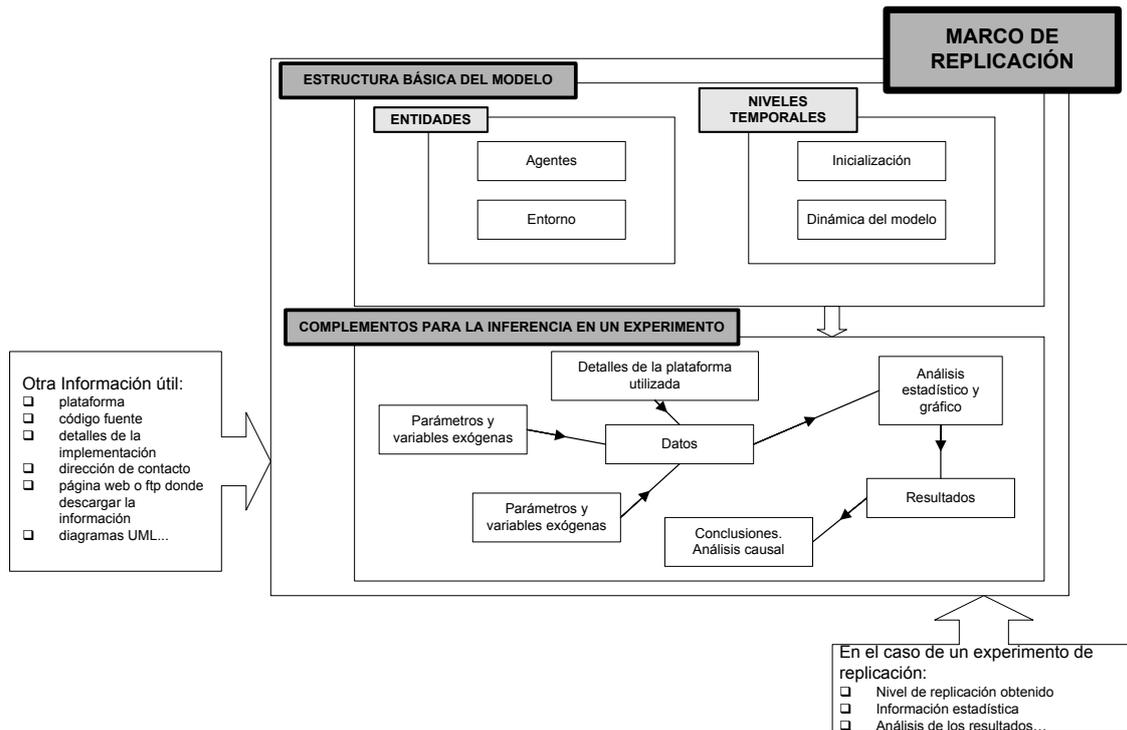
Esto se agrava enormemente por dos hechos: primero por la torre de Babel que existe hoy en día de plataformas de simulación, y segundo y más importante, sobre todo por la falta de un metamodelo que permita al modelador describir la abstracción de un sistema real para el desarrollo de un software sin ambigüedad (Wagner y Tulba, 2003).

En nuestra opinión, el proceso de descripción de unos resultados para conseguir un nivel de descripción con suficiente detalle como para poder ser replicado por otro investigador<sup>64</sup> debería contener información de al menos dos etapas (figura 22):

1. La descripción de la estructura básica de ejecución del modelo.
2. La descripción de todos los detalles que complementan a la estructura y que son necesarios para conseguir un modelo formal y por tanto realizar inferencia.

---

<sup>64</sup> En el siguiente apartado justificaremos la necesidad de la replicación independiente de experimentos y modelos en la metodología.



**Figura 22.** Perspectiva general de la estructura de descripción de un modelo para su replicación. Elaborado a partir de Galán *et al.* (2003b).

En la descripción de la estructura básica de un modelo basado en agentes clásico, se puede distinguir entre:

- Las entidades:
  - El entorno y objetos del modelo.
  - Los agentes que interactúan en él.
- Los niveles temporales:
  - Inicialización.
  - La dinámica del modelo.

En nuestra opinión (Galán *et al.*, 2003a), la descripción mínima que debería poseer un modelo para que pudiese ser replicado debería ser la siguiente:

1. Parámetros del modelo.

2. El entorno. Caracterización de manera completa y precisa.
  - 2.1. Tipo de entorno. Caracterización morfológica.
    - 2.1.1. Entorno centralizado. Si los agentes tienen acceso a la misma estructura (por ejemplo un mercado).
    - 2.1.2. Entorno distribuido. Mediante redes o *grids*. Aquí es necesario especificar claramente el tipo de grid, su número de dimensiones, si es toroidal o queremos estudiar los “efectos esquina”, si es multicapa, el número de agentes que admite por celda, si contiene recursos, la forma geométrica de la celda (hexagonal, triangular, cuadrada, etc.).
    - 2.1.3. Entorno híbrido. Combinación de los anteriores.
  - 2.2. Acciones autónomas del entorno. Qué acciones realiza el entorno como respuesta al paso del tiempo (suponiendo el entorno dinámico), con independencia del efecto de las acciones de los agentes sobre él. Por ejemplo, la regeneración automática de recursos en el modelo de Sugarscape (Epstein y Axtell, 1996). Caracterización exhaustiva en lenguaje natural y en el caso de algoritmos, especificación completa normalizada.
  - 2.3. Posibles reacciones del entorno como respuesta a las acciones de los agentes. En general estas reacciones posiblemente pueden ser consideradas como la descripción de las acciones de los agentes y sus consecuencias en el entorno.
  - 2.4. Otras consideraciones.
    - 2.4.1. Si el entorno es un SIG, especificación de sus características.
    - 2.4.2. Especificación de los posibles sistemas de resolución de incompatibilidades de actuación de agentes simultáneamente en el entorno.
  - 2.5. Clasificación del entorno. Según Russell y Norvig (1996) el entorno se podrá clasificar en:

- 2.5.1. Accesible frente a inaccesible. Un entorno se define accesible si un agente puede obtener de él completa, precisa y actualizada información sobre su estado. Bajo esta definición la mayoría de los entornos no son accesibles.
- 2.5.2. Determinista frente a no-determinista. Un entorno es determinista si cualquier acción conlleva siempre un mismo efecto asociado, es decir, no existe incerteza en el agente del resultado de sus acciones sobre el entorno.
- 2.5.3. Estático frente a dinámico. Un entorno se define estático si no se produce sobre él ningún cambio a no ser como consecuencia de la acción de un agente sobre él. En cambio, un entorno se llamará dinámico si existen procesos actuando sobre él y que modifican sus estados más allá del control de los agentes.
- 2.5.4. Discreto frente a continuo. Un entorno es discreto si existe un conjunto fijo, finito de acciones y percepciones sobre él.
- 2.5.5. Centralizado o distribuido. Un entorno es centralizado como aquel en el que los agentes tienen acceso a una misma estructura, a un mismo bloque. Un entorno se define como distribuido si puede ser modelado mediante una red para formar un autómata celular (Ferber, 1999).

### 3. Los agentes. Caracterización de manera completa y precisa<sup>65</sup>.

---

<sup>65</sup> Aunque se trata de un criterio de clasificación de agentes más aceptado en la comunidad computacional que en la social, resulta bastante interesante y pedagógico el criterio de las vocales (AEIOU) de Demazeau (2001) citado en (Mas, 2004)). Este criterio se basa en la observación de los agentes desde distintas perspectivas. La A (de Agente) define sus rasgos individuales: arquitectura, funcionamiento interno, etc. Suelen dividirse en dos categorías, *agentes reactivos* y *agentes cognitivos*. Los *agentes reactivos* son aquellos que se caracterizan por la ejecución de procedimientos sencillos según el estado interno. Su modelo computacional está basado en un ciclo *recepción de eventos externos/reacción*. Los *agentes cognitivos* se caracterizan por la realización de tareas más complejas mediante la representación explícita del conocimiento. Se diferencian de los anteriores en que para realizar tareas necesitan llevar a cabo procesos de razonamiento tales como aprendizaje o planificación. Su modelo computacional se basa en un *ciclo percepción-asimilación-razonamiento-actuación*. La E (de Entorno) caracteriza los requisitos computacionales para que el agente funcione adecuadamente y en los que se ejecutan en las plataformas computacionales existentes. La I (de Interacción) considera las capacidades de comunicación y el intercambio de información entre un agente y otras entidades. Se distinguen tres tipos, agente-agente, agente-entorno, agente-persona, cada uno con sus tecnologías, protocolos y lenguajes diferentes. La O (de Organización) considera el papel

3.1. Variables y constates que los caracterizan.

3.2. Arquitectura. En general un agente dentro de un ABSS puede ser considerado como una estructura del tipo perceptores/sensores-mecanismo de razonamiento-efectores/actuadores. Los efectores son aquellas acciones que realiza el agente para captar información exterior a él; los efectores/actuadores son aquellas acciones que realizan los agentes con efecto en el exterior, bien sea la comunicación de un mensaje, un movimiento en el entorno (consideramos como actuadores las funciones motoras del agente) o una acción sobre otro agente. El mecanismo de razonamiento es la arquitectura propia del agente que le permite a partir de los perceptores y de su “conocimiento”<sup>66</sup> adquirido determinar que acción tomar.

3.2.1. Perceptores/sensores (si los agentes los poseen explícitamente).

3.2.1.1. Accesibilidad. Especificación de qué partes del entorno son accesibles al apartado sensorial del agente y qué partes no.

3.2.2. Actuadores.

3.2.2.1. Accesibilidad. Especificación de qué partes del entorno son accesibles al mecanismo actuador de los agentes.

3.2.3. Arquitectura interna. La arquitectura interna de los agentes determina su funcionamiento en gran medida y, por tanto, es una parte esencial en la descripción de la estructura de los modelos. Con frecuencia requiere el esfuerzo principal de descripción, ya que existen infinidad de posibilidades. Resulta difícil especificar aspectos relevantes de descripción generales para la multitud de arquitecturas posibles, tan distintas como arquitecturas conectivistas mediante una red neuronal o

---

del agente en el conjunto del sistema. En una primera clasificación se pueden dividir en agentes individualistas, aquellos que realizan las tareas solos, y agentes cooperantes, que pueden realizar tareas solos o colaborando con otros agentes. La U (de Utilidad) se clasifica según la aplicación de la que forma parte el agente.

<sup>66</sup> Aquí tomamos la palabra “conocimiento” en sentido amplio para referirnos con ella a cualquier mecanismo interno del agente que le permita tomar una decisión, incluyendo desde un sistema complejo con memoria, mecanismo de aprendizaje y sistema de decisión complejo hasta sistemas puramente probabilísticos de decisión.

sistemas basados en clasificadores o sistemas de producción (Ferber, 1999). Además estos sistemas pueden estar dotados de mecanismos de aprendizaje y de memoria, en cuyo caso deben ser descritos igualmente. En cada caso el sistema debe quedar completamente definido sin ambigüedad con los sistemas de representación que le sean propios. La experiencia sugiere un esfuerzo extra en la definición completa de los algoritmos implementados en general y los algoritmos genéticos en particular, puesto que han sido fuente de los *bugs* más importantes detectados en trabajos de replicación (Ehrentreich (2002) y Edmonds y Hales (2003). Otro aspecto esencial es la resolución de desempates y conflictos dentro de todos los procesos internos del agente (externos también), puesto que pueden tener una influencia crítica en los resultados.

- 3.2.4. Relación e intercambio de mensajes con otros agentes. Aquí resulta interesante la utilización de diagramas de secuencia de UML, especificando si la transmisión es síncrona o asíncrona.

Para la descripción de los niveles temporales proponemos el siguiente esquema:

4. Inicialización del proceso.
  - 4.1. Creación del entorno. Especificación detallada de los algoritmos de generación del entorno, tanto si corresponden a un proceso estocástico o determinista.
  - 4.2. Creación de los agentes. Especificación detallada de los algoritmos de inicialización de los agentes. Situación inicial de los agentes en el entorno.
  - 4.3. Creación de una historia previa artificial. (Por ejemplo el *Warm up process* en el *Artificial Stock Market* de Arthur *et al.* (1997b) en Santa Fe o de Pascual *et al.* (2006) en la versión de INSISOC).
5. Dinámica de funcionamiento del modelo.
  - 5.1. Descripción de la secuencia de acciones planificada y el mecanismo motor de la simulación.

## 5.2. Comunicación entre los agentes.

### Descripción del experimento

## 6. Experimento.

6.1. Parámetros y variables exógenas utilizadas. Generador de números aleatorios. Tipo de variables (precisión).

6.2. Resultados.

6.3. Análisis estadístico.

6.4. Análisis gráfico.

6.5. Causalidad. Explicación del mecanismo por el cual el modelo produce los resultados (internos y externos) encontrados.

6.6. Plataforma utilizada, código fuente y detalles de la implementación. Dirección de contacto con el autor, dirección URL donde encontrar esta información, etc.

Además consideramos que si la descripción del trabajo es específica de la replicación de un modelo se incluya la siguiente información relevante:

## 7. En el caso de ser un artículo de replicación.

7.1. Nivel de replicación alcanzado, de acuerdo a Axelrod (1997b) ordenados de condiciones más a menos restrictivas:

7.1.1. Identidad numérica, cuando se reproducen los resultados exactamente.

Obviamente si el modelo posee, como es habitual, algún proceso estocástico, para probar este nivel de replicación ambos modelos deben utilizar el mismo generador de números pseudo-aleatorios y la misma semilla, (aparte de tratar de la misma forma con los redondeos, truncamientos, etc.)

7.1.2. Equivalencia distribucional, conseguida cuando los resultados no se pueden distinguir estadísticamente. Generalmente mediante los tests de

Kolmogorov-Smirnov, el estadístico Mann-Whitney-Wilcoxon u otro método no-paramétrico para estudiar la igualdad de dos distribuciones independientes (Hogg y Craig, 1978).

7.1.3. Equivalencia relacional, en la cual los modelos presentan las mismas relaciones internas entre los resultados.

7.2. Test de hipótesis utilizado, número de simulaciones realizadas, estadístico, nivel de rechazo, potencia del test, etc.

7.3. Análisis causal de la simulación, tanto para comprobar la equivalencia, como para analizar las razones por la que no se ha producido.

#### 2.4.4 Replicación, verificación y validación de modelos

No es infrecuente que la dinámica de los modelos basados en agentes pueda llegar a ser tan compleja que los propios desarrolladores de los modelos no lleguen a entender en detalle y de forma exhaustiva como funcionan. No sabiendo exactamente que se espera de ellos, hace que resulte imposible decir si unos resultados no anticipados se derivan exclusivamente de lo que el investigador cree que son hipótesis cruciales en su diseño, o si simplemente son la consecuencia de errores o artefactos en el código (Galán y Izquierdo, 2005). Por todo esto los procesos de incremento de confiabilidad en ABM resultan tan importantes.

Los términos asociados a los procesos de confianza en los modelos: validación, verificación, error y artefacto no están unánimemente definidos en la literatura, por lo que empezaremos estableciendo que entendemos *nosotros* por cada uno de ellos.

Para nosotros un modelo es válido hasta el punto que proporcione un rango de precisión satisfactorio, consistente con el objetivo de aplicación del modelo (Kleijnen, 1995; Sargent, 2003)<sup>67</sup>. Es importante notar que bajo esta definición

---

<sup>67</sup> La validación de un modelo de simulación de un sistema complejo se puede decir que constituye una de las tareas más difíciles en el desarrollo del proceso de modelado. Tradicionalmente los métodos utilizados en la validación de modelos están basados en la comparación de las salidas del modelo con el sistema real, con otros modelos, con resultados del modelo en situaciones degeneradas y conocidas, etc. Sin embargo, cuando se modelan sistemas complejos, la utilización de estos métodos no está ampliamente aceptada (Brown y Kulasiri, 1996). En tales casos, es posible tratar con el proceso de validación bajo dos puntos de vista diferentes, a partir de la validación conceptual del

estamos adoptando un concepto de validación *instrumentalista*, pero que existen multitud de definiciones y conceptos de validación en simulación, prácticamente una por cada línea de pensamiento en Filosofía de la Ciencia, y que difieren de ésta<sup>68</sup>.

Verificación, algunas veces llamada *validación interna*<sup>69</sup>, es el proceso de asegurar que el modelo funciona de la manera pretendida por sus diseñadores y desarrolladores (Moss *et al.*, 1997). Diremos que un modelo es *correcto* si y sólo si es capaz de pasar un ejercicio de verificación y, utilizando la terminología que hemos definido el marco metodológico (figura 20), diremos que la expresión de un modelo en un lenguaje es correcto si y sólo si es el *mismo* modelo que el modelo mental de su desarrollador<sup>70</sup>.

Nosotros distinguimos entre errores y artefactos (Galán *et al.*, 2006). *Errores* aparecen cuando un modelo no se ajusta a los requisitos de especificación autoimpuestos por su propio desarrollador. Un error no es más que una diferencia entre lo que el desarrollador piensa que es el modelo y lo que realmente es. Así, nosotros entendemos verificación como el proceso de buscar errores.

En contraste con los errores, los *artefactos* se establecen en situaciones en las que no hay diferencias entre lo que el desarrollador piensa que es un modelo y lo que el modelo realmente es. Aquí el desajuste se encuentra entre el conjunto de hipótesis en el modelo que el desarrollador piensa que está produciendo un determinado fenómeno, y las hipótesis que son la verdadera causa del fenómeno. Nosotros implícitamente estamos distinguiendo entre hipótesis centrales, cruciales o básicas e hipótesis auxiliares en el modelo. Las hipótesis básicas son aquellas cuya presencia se considera importante para el propósito del modelo. Idealmente serían las únicas

---

modelo y a través de la validación de los *outputs* generados por el modelo (Moss y Edmonds, 2005). La validación del modelo conceptual (o validación estructural) es el proceso de verificación de si los fundamentos teóricos de las hipótesis que subyacen a un modelo son correctos y razonables en el contexto de los objetivos del modelo de simulación y su intención de uso. La validación estructural en sistemas adaptativos complejos, y por tanto inherentemente impredecibles (Bradbury, 2002; Lempert, 2002), puede conseguirse en base de una correcta representación de los agentes y las relaciones entre ellos. Precisamente la ventaja de ABM como herramienta en estos sistemas estriba en que es capaz de proporcionar un amplio rango de soluciones, a priori fundadas en la caracterización y la representación de los agentes y que en principio facilitan el proceso de abstracción.

<sup>68</sup> El lector interesado puede encontrar una completa revisión epistémica del problema de validación en Kleindorfer *et al.* (1998).

<sup>69</sup> Ver por ejemplo Taylor (1983), Drogoul *et al.* (2003), Sansores y Pavón (2005a).

<sup>70</sup> Así, podría darse el caso de que un modelo no correcto pudiese ser válido para un determinado objetivo y viceversa, que un modelo correcto pudiese no ser válido para un propósito.

hipótesis que estarían presentes en un modelo. Sin embargo, al generar un modelo formal es frecuente el caso en el que el desarrollador se ve obligado a incluir hipótesis adicionales para poder conseguir un modelo completo. Nosotros llamamos hipótesis auxiliares a estas últimas. No se consideran cruciales pero son necesarias para poder *ejecutar* el modelo. Por otro lado también distinguimos entre hipótesis significativas y no-significativas. Una hipótesis significativa es aquella que causa algún tipo de resultado significativo al ejecutar el modelo. Utilizando esta terminología, definimos artefactos como fenómenos significativos causados por hipótesis auxiliares en el modelo y que son consideradas (equivocadamente) como no significativas. Es decir, un artefacto aparece cuando una hipótesis auxiliar considerada no significativa por el desarrollador resulta ser significativa<sup>71</sup>.

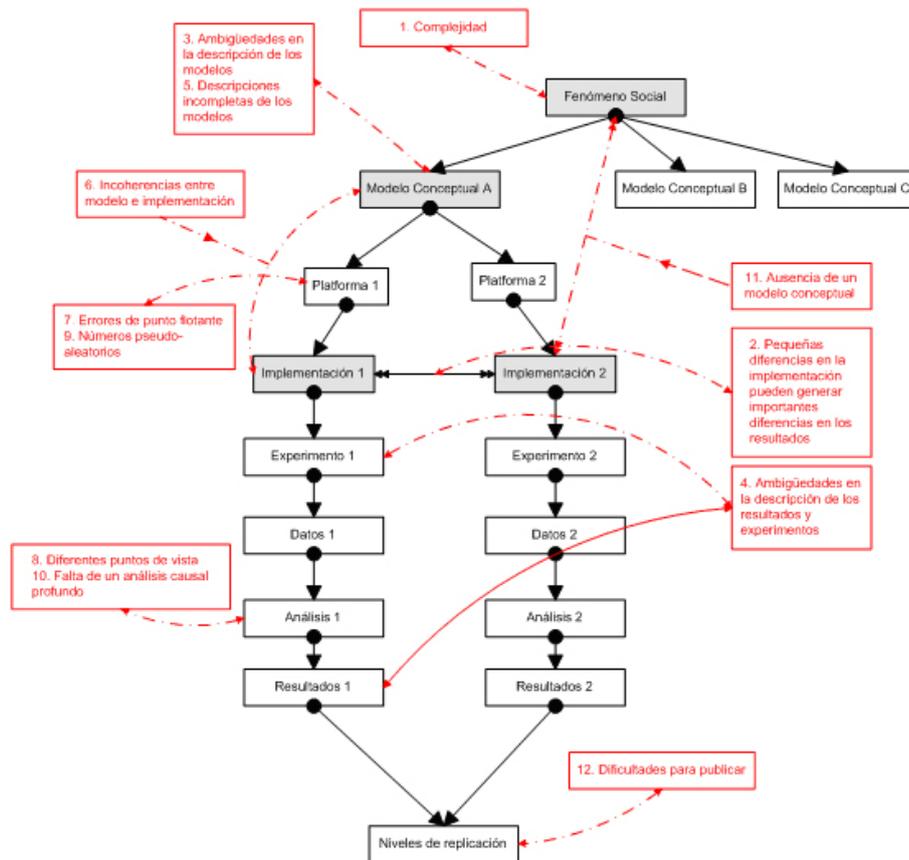
Para evitar los diferentes tipos de errores existen diferentes actividades que se pueden llevar a cabo. Algunas de estas actividades incluyen la repetición de experimentos en diferentes plataformas, la reimplementación de código en diferentes lenguajes de programación, la reformulación del modelo conceptual utilizando diferentes paradigmas de modelado y el análisis matemático de versiones simplificadas o casos particulares del modelo (Galán *et al.*, 2006). Entre ellas, la replicación y alineación de experimentos por investigadores independientes (Axtell *et al.*, 1996; Axelrod, 1997b; Moss, 2000; Edmonds y Hales, 2003; Edmonds y Hales, 2005) y el análisis matemático (Binmore, 1998; Edwards *et al.*, 2003; Gotts *et al.*, 2003a; Brown *et al.*, 2004; Galán y Izquierdo, 2005; Polhill *et al.*, 2006) ya han demostrado su utilidad. Utilizando estas técnicas es posible incrementar el rigor, la confiabilidad y la credibilidad de nuestros modelos.

Lamentablemente, aunque surgen con frecuencia nuevos modelos con la metodología multiagente, no son muchos los que se reexploran en busca de errores y artefactos. Y eso a pesar de que existe consenso en la comunidad científica respecto a que es este proceso el que puede dar a la simulación social la credibilidad y el rigor de otras ciencias. En palabras de Axelrod (1997b) “*la replicación es uno de los sellos de la ciencia acumulativa*”.

---

<sup>71</sup> Un clásico ejemplo de artefacto se da cuando la topología de un grid en un modelo se considera una hipótesis auxiliar, y se cree que los resultados obtenidos cuando se ejecuta el modelo son independientes de la topología pero de hecho al cambiarla por alguna alternativa (por ejemplo celdas cuadradas por celdas hexagonales) los resultados significativos no se observan o cambian.

Las razones de la falta de modelos replicados hay que buscarlas en que replicar no es fácil y presenta diversos problemas. De nuestra experiencia y de la experiencia adquirida por otros autores, se puede considerar que los principales problemas que se encuentra un investigador a la hora de replicar un experimento realizado sobre un modelo basado en agentes en simulación social se resumen en la figura 23:



**Figura 23.** Perspectiva general de algunos de los problemas típicos de un proceso de replicación. Ver un análisis más exhaustivo en Galán *et al.* (2003a)<sup>72</sup>.

## 2.5 Fortalezas y debilidades del modelado basado en agentes

Hasta este punto se ha hecho notar el creciente interés del uso de ABM. Se ha visto que este interés nace de la posibilidad de incorporar una representación muy detallada y refinada de cada una de las entidades específicas, individuos o

<sup>72</sup> Los diferentes problemas están situados sobre el marco metodológico con una única abstracción intermedia de Edmonds (2001). Para situar ejercicios de replicación sobre el marco de doble abstracción ver Galán *et al.* (2006).

instituciones (y de sus comportamientos), que *actúan* en cualquier sistema observado. El nivel de detalle se obtiene de esta forma implementando cada entidad como un agente computacional. Se ha comentado que la principal ventaja de la metodología se basa en la esperanza de obtener representaciones más fieles del sistema observado y por tanto de mayor realismo y rigor<sup>73</sup>. También anteriormente hemos bosquejado que existe el problema de acudir a la simulación frente al análisis matemático pero que en determinados usos puede ser un complemento e incluso un sustituto no sólo válido sino apropiado.

Una vez que se ha clarificado el concepto y uso, y se han subrayado de forma agregada las principales ventajas e inconvenientes, consideramos que es el momento de desglosar y analizar pormenorizadamente algunas de las fortalezas y debilidades competitivas de la aproximación desde nuestro punto de vista.

### 2.5.1 Puntos fuertes del modelado basado en agentes

#### *Heterogeneidad e individualidad*

Quizá, como se ha ido comentando a lo largo del capítulo, una de las principales ventajas de ABM y la que, en nuestra opinión, constituye su esencia, es la capacidad para identificar las diferentes entidades que participan en un sistema, personas, empresas, organizaciones, animales, etc., e implementarlas con sus propios sistemas de comportamiento capturando la heterogeneidad del sistema. Además, dentro de cada tipo de entidad que participa en el modelo con ABM no existe ninguna necesidad de hacer hipótesis sobre agentes representativos. Si los individuos de una población son diferentes, aprovechando las propiedades de instanciación de clases de la programación orientada a objetos aplicadas a la simulación, resulta relativamente sencillo capturar toda esa diversidad que existe en la población real e incluirla mediante tantos agentes computacionales específicos y diversos como sean necesarios.

#### *Espacio explícito e interacciones locales*

Cuando modelamos sistemas reales no resulta difícil encontrar ejemplos en los que los eventos que tienen lugar estén influenciados por un entorno específico.

---

<sup>73</sup> Y facilite la validación estructural del modelo.

Con ABM se pueden representar explícitamente entornos en los que situar los agentes, ya sea mediante *rasters*, autómatas celulares, o sistemas de información geográfica, permitiendo, si es el caso ya sea porque exista alguna evidencia empírica o porque se desee probar un efecto a nivel teórico, restringir las interacciones de los agentes a contextos locales y vecindades. Junto con la propiedad anterior, la metodología ofrece un conjunto de características que podríamos resumir como que *ABM permite describir de forma más natural los sistemas*.

### *Análisis bottom-up, autonomía y fenómenos emergentes*

Se define un fenómeno emergente como aquel que no puede ser reducido a sus partes puesto que surge de la interacción de cada una de ellas. Por tanto, quizá sea precisamente el ABM la forma canónica de intentar capturarlos. Puesto que estos sistemas son autónomos en los que no existe un control central, o “*top-down*”, sobre el comportamiento de los individuos y se utilizan estrategias “*bottom-up*” en las que a partir de la micro-definición del problema puede emerger el macro-comportamiento del sistema, no cabe duda de que si en un sistema sospechamos la aparición de un fenómeno emergente, ABM puede ser la herramienta adecuada. Bonabeau (2002) identifica que en aquellos procesos caracterizados por:

- Comportamientos individuales no lineales, con reglas *if-then*, acoplamiento, discontinuidades, etc.
- Aquellos en los que el comportamiento individual exhiba memoria, comportamiento no-markoviano, *path-dependence*, histéresis, aprendizaje, adaptación, etc.
- Efectos red debidos a la topología de la interacción.
- O efectos en los que las fluctuaciones puedan ser amplificadas.

Pueden ser candidatos a presentar fenómenos emergentes y por tanto susceptibles de ser analizados mediante ABM.

### *Racionalidad limitada*

Muchos modelos de comportamiento humano en las Ciencias Sociales asumen que los individuos pueden aproximarse razonablemente o ser descritos

mediante entidades *racionales*, especialmente cuando se incluyen en modelos de teoría de elección racional. Sin embargo, es fácil darse cuenta de que los individuos reales no poseen información global y capacidad computacional infinita (Simon, 1982). Hoy en día existe todo un extenso cuerpo empírico proporcionado por científicos provenientes del estudio de las ciencias del comportamiento, de la psicología y la experimentación que demuestran tales hechos (Hernández, 2004). Esta evidencia puede implementarse relativamente fácilmente en ABM, mientras que otras técnicas de modelado requerirían fuertes (y probablemente no realistas) hipótesis simplificadoras.

### *Ciencia integrada e interdisciplinaria*

Cuando se crea una sociedad artificial de agentes en un modelo, implícitamente se están asociando todos los subprocesos que lo componen de forma individual e integrada. Es posible incluir las dimensiones económicas, sociales, territoriales, tecnológicas o cualquier otra que tenga influencia de forma integrada en un modelo. Puesto que los agentes toman decisiones en cada subproceso que se haya incluido como parte del modelo, son los propios agentes el vehículo conductor que unifica los submodelos. Por tanto, utilizando la metodología, no es necesario establecer límites artificiales en la construcción de los modelos: como Epstein (1999) establece – “*puesto que el individuo es multidimensional, también lo es la sociedad*”<sup>74</sup> –

Precisamente, y asociado con lo dicho, cabe destacar que el carácter multidisciplinar de este tipo de modelado no sólo surge de la integración de multidimensional de decisiones de los agentes de modelado, sino que va más mucho más allá y puede servir como puente entre disciplinas (Axelrod, 2005b). En primer lugar como discutíamos al principio del capítulo, la multitud de fuentes de las que hereda la tecnología de agentes provoca que comparta las mismas inquietudes y problemas que las disciplinas en la que se basa. En segundo lugar facilita la colaboración multidisciplinaria, como es el caso del modelo presentado en esta tesis en la que colaboran conjuntamente áreas de la Ingeniería con departamentos de

---

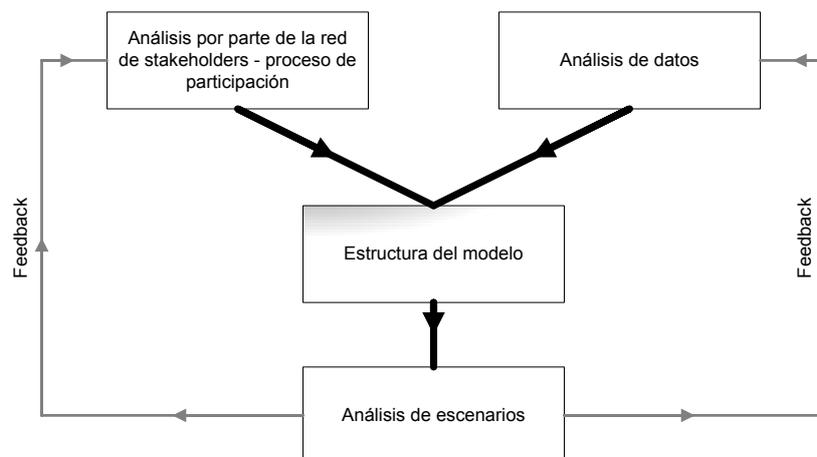
<sup>74</sup> “*Because the individual is multi-dimensional, so is the society*”.

Geografía, e incluso puede revelar unidad entre disciplinas inspirando soluciones similares para problemas que pudiesen ser muy diferentes.

Por otro lado también se puede argumentar como contra a una ventaja que el interés multidisciplinar de la metodología hace que ésta se encuentre muy difusa y dispersa como trabajos heterodoxos en muchas disciplinas, lo cual en parte es cierto.

### *Utilización de procesos de participación en las etapas de modelado y validación*

ABM permite la posibilidad de incluir las perspectivas de los *stakeholders* de un determinado dominio en el diseño de los modelos. De hecho, existe una creciente literatura hacia el uso de procesos participativos de construcción de modelos (Downing *et al.*, 2001; Pahl-Wostl, 2002b; López-Paredes *et al.*, 2005; Moss y Edmonds, 2005). La ventaja de ABM frente a otras técnicas que la permite integrarse con los procesos de participación es una consecuencia de la relativa claridad descriptiva de este tipo de modelado. El modo casi directo en el que las hipótesis de los modelos pueden ser interpretadas y entendidas hace posible que *stakeholders* y expertos en el dominio puedan criticarlas y modificarlas si es preciso. Si este proceso se lleva a cabo de forma iterativa (figura 24), entonces es posible re-diseñar el modelo incorporando conocimiento hasta que los participantes del proceso puedan considerarlo suficientemente bueno. Esto constituye un método de validación en el diseño de las hipótesis de los modelos y en las salidas y resultados.



**Figura 24.** Procesos de participación con stakeholders en las fases de modelado y validación. Adaptado de Pahl-Wostl (2002b).

## 2.5.2 Puntos débiles del modelado basado en agentes

### *Agregación de roles en el diseño*

En el apartado de metodología de este mismo capítulo veíamos que a nivel teórico el desarrollo metodológico de un modelo podía asociarse a cuatro roles diferentes en el diseño de un modelo de simulación, el *thematician* o experto en el dominio, el *modeller*, el *computer scientist* y el *programmer*. En la práctica, el diseño de los modelos recae con frecuencia completamente en una única persona o grupos de personas, que en realidad son expertos en uno de los roles pero que no tienen por qué serlo en los demás. Este proceso de integración vertical tiene una doble visión, por un lado es una ventaja puesto que elimina los posibles problemas de coordinación y comunicación entre los roles unificando el control. Sin embargo se puede producir una pérdida de eficiencia y precisión en alguna de las etapas.

### *ABM es “difícil de vender” y el problema de la robustez de la simulación*

Quizá uno de los principales problemas de la metodología sea la dificultad de aceptar por parte de la comunidad científica más ortodoxa los modelos construidos de esta manera, ver por ejemplo las dificultades para publicar este tipo de modelos de investigadores del prestigio de Hamilton o Axelrod (Axelrod, 2005b). Esto repercute en la dificultad de publicar estos modelos y en el efecto realimentación que el propio proceso conlleva. Una razón que se podría buscar para explicar esto es que la ciencia en general está más habituada y le resulta más familiar analizar los modelos expresados en matemática concisa mediante la lógica matemática que mediante modelos construidos a partir de simulaciones. Esto resulta lógico puesto que si la solución es algebraicamente expresable supone conocer la robustez del modelo, mientras que mediante ABM los modelos están parametrizados y por tanto ofrecen soluciones más específicas<sup>75</sup>. Incluso aunque se haga un análisis paramétrico para evaluar su influencia, estos análisis serán funciones estimadas a partir de las simulaciones. Sin embargo, repitiendo la idea que se destila una y otra vez a lo largo del capítulo, a cambio estos modelos pueden relajar la muchas de las hipótesis de los modelos matemáticos compactos lo que representa una ventaja frente a ellos. Así

---

<sup>75</sup> Incluso en casos extremos detractores de la metodología consideran una simulación como una *evidencia anecdótica*.

cambiamos robustez en los resultados por rigor y realismo en las hipótesis de los modelos.

### *Crítica y contracrítica a la idea de laboratorio virtual*

Resulta habitual que en la defensa de la aproximación se argumente que un modelo basado en agentes proporciona, sobre todo en las Ciencias Sociales, un laboratorio virtual donde ensayar sistemáticamente situaciones y escenarios bajo condiciones controladas, que de otro modo resultarían imposibles de llevar a cabo. Determinados detractores de esta idea (Leombruni, 2002) podrían argumentar, con parte de razón, que mientras la Economía Experimental en sentido estricto sí que permite experimentar y estudiar el comportamiento de los participantes bajo condiciones, en el ABM realmente con lo que se experimenta es con *los modelos de comportamiento* de los individuos o entidades, y no con los comportamientos en sí. Bien, es cierto, pero no es menos cierto que en muchas ocasiones no es posible experimentar con individuos puesto que las entidades con decisión no son tales. Pensemos por ejemplo en el papel de los Estados dentro de las economías globales a escala macroeconómica, o en las muchas veces no es posible reproducir en número de individuos los experimentos en un laboratorio, o en las situaciones en las que el modelo de comportamiento de los individuos pueda variar por saber que están formando parte de un experimento. A pesar de que estamos de acuerdo en que trabajamos con modelos formados por modelos de comportamiento lo cierto es que en muchas ocasiones poder inferir comportamientos globales de esta forma ya es un avance muy significativo.

### *¿Ha llegado la revolución?*

Existen autores como Bankes (2002), que argumentan que el conjunto de propiedades de ABM ofrece potencial suficiente para que efectivamente suponga una revolución en muchos campos, pero que, sin embargo, esa revolución anunciada no acaba de llegar y que aunque el crecimiento de la metodología es muy alto, todavía no ha tenido el impacto esperado. La tesis de Bankes es cierta, pero también es lógico que sea así, como ocurriría con cualquier nuevo paradigma que se está formando. Para ser justos quizá sea más adelante, cuando hayamos dado tiempo a que el ABM intente superar los desafíos a los que se le presentan, cuando debamos

analizar su impacto. Hasta entonces, es ahora el momento de explorar la metodología y de enfrentarse a sus retos.

### 3. Gestión de agua con sociedades artificiales de agentes

#### Fundamentos

*The sciences do not try to explain, they hardly even try to interpret, they mainly make models. By a model is meant a mathematical construct which, with the addition of certain verbal interpretations, describes observed phenomena. The justification of such a mathematical construct is solely and precisely that it is expected to work.*

Johann Von Neumann (1903 - 1957)

#### Resumen

*En este capítulo describimos los antecedentes más importantes que existen en el modelado basado en agentes aplicado a la gestión del agua, situándolos en el marco más general de la gestión de recursos naturales.*

*Comenzamos por analizar la estructura general de los modelos basados en agentes aplicados a este dominio, y establecemos criterios de clasificación de los modelos en cuanto a su objetivo y características estructurales.*

*Mostramos la representación espacial explícita adoptada en el modelo de la tesis, los sistemas de información geográficos. Analizamos los tipos de formatos SIG, sus posibilidades de integración con ABM y los principales modelos que los implementan.*

*En la parte final del capítulo resumimos las características de los principales modelos publicados y aplicados a la gestión del agua. Inicialmente analizamos las características del modelo del Támesis, del modelo FIRMABAR y del modelo DAWN, todos ellos antecedentes directos del trabajo desarrollado en esta tesis. Posteriormente complementamos la revisión con otros modelos, no tan focalizados sólo en los consumos domésticos, pero que aportan elementos muy relevantes de uso como la difusión de opinión e innovación, o los procesos de integración de modelos.*





## 3.1 Modelado basado en agentes en la gestión de recursos naturales

### 3.1.1 Introducción

Una de las más importantes aplicaciones del modelado basado en agentes desde mediados de los años 90<sup>76</sup> ha sido en los sistemas ambientales. Un sistema de este tipo se caracteriza por contener interacciones entre dinámicas sociales (típicamente humanas, pero también de otros tipos como ganado o insectos por ejemplo) y naturales, como pueda ser un recurso como el agua, un banco de pesca o la hierba de una determinada superficie de pastoreo que comparten varios agricultores.

La metodología de utilización de este tipo de modelado para el estudio de estos sistemas es directa. En el proceso de abstracción, se representan por un lado las unidades atómicas de la sociedad y sus interacciones como agentes del modelo, y por otro el entorno o el recurso como otra entidad software con la que los agentes interaccionan. El proceso de explotación del modelo se centra entonces en el estudio y entendimiento de los patrones y los procesos que se producen en el recurso como consecuencia de las interacciones entre entidades.

En el contexto de la gestión de los recursos naturales, los modelos de simulación multiagente se pueden clasificar según su objetivo de aplicación. Barreteau *et al.* (2001) consideran que los tres usos principales de la simulación de la evolución de escenarios mediante sistemas basados en agentes están enfocados a su utilización como herramientas de investigación, entrenamiento y como herramientas de soporte a la discusión. A esta clasificación se le pueden añadir los modelos creados con usos predictivos<sup>77</sup> y los sistemas que utilizan el paradigma multiagente

---

<sup>76</sup> Los primeros trabajos de este tipo se atribuyen a Lansing y Kremer (1993) en el estudio de la gestión de agua en Bali, a Bousquet *et al.* (1993) por el estudio de bancos de pesca y a Deadman y Gimblett (1994) en la gestión de parques.

<sup>77</sup> En realidad la mayoría de los modelos tienen en parte cierto carácter predictivo, aunque no sea total sí de un determinado hecho parcial, o de una estructura de comportamiento, etc.

en estos contextos no como herramienta de simulación sino como herramienta informática en aplicaciones de ingeniería del conocimiento<sup>78</sup>.

En los tres usos considerados por Barreteau *et al.* (2001) y en el de predicción, los modelos creados pueden ser vistos como una representación del sistema, a una escala que el modelador considera apropiada, y que encaja perfectamente en la metáfora de laboratorio virtual que comentábamos en el capítulo anterior, en el que es posible llevar a cabo experimentos de acuerdo a los escenarios que se consideren de interés.

### 3.1.2 Modelos de simulación como herramientas de investigación

Los sistemas que engloban la gestión de recursos naturales se consideran sistemas complejos puesto que suelen integrar heterogeneidad, influencia espacial e integración con procesos autónomos. Además con frecuencia suelen ser procesos lentos. Por todo ello no resulta fácil realizar experimentos directamente sobre los sistemas reales de estudio. Como argumentan Barreteau *et al.* (2001), la necesidad de repetibilidad y de control de los parámetros, y la cantidad de tiempo necesario para realizar los experimentos justifica la utilización de metodologías indirectas como la simulación.

Los modelos basados en agentes hacen posible experimentar con escenarios completamente repetibles y controlables, con la duración apropiada y con la escalabilidad necesaria de acuerdo a la capacidad computacional necesaria y disponible para el experimento, y sin riesgo para los individuos del sistema ni para el conjunto de recursos.

El análisis de los resultados obtenidos mediante este conjunto de simulaciones puede servir para desarrollar teorías del comportamiento del sistema bajo las diferentes hipótesis utilizadas en la elaboración de los experimentos y entrar en las fases de validación de las explicaciones propuestas.

---

<sup>78</sup> Aprovechando las propiedades que se pueden obtener a partir del concepto de agentes completos como base teórica para el diseño de arquitecturas computacionales se pueden encontrar herramientas que las aprovechan en el campo de la gestión de recursos naturales como el agua (Davis, 2000) o los bosques (Nute *et al.*, 2004). Los agentes bajo esta perspectiva, ofrecen suficiente flexibilidad para integrar diferentes categorías de procesamiento y la posibilidad de diseños incrementales.

Este uso del modelado se puede encontrar en dominios de aplicación muy específicos y dependientes del contexto, que van desde la gestión del agua desde un punto de vista muy amplio e integrado en el Danubio (Barthel *et al.*, 2005), modelos de comportamiento de caza en Camerún (Bousquet *et al.*, 2001) o modelos para simular las interacciones entre la poblaciones de patos, el comportamiento de los granjeros y los derechos de caza en el sur de Francia (Mathevet *et al.*, 2003a), a modelos mucho más abstractos e independientes de la situación espacial como el modelado de la tragedia de los comunes con agentes (Deadman, 1999) o modelos del comportamiento de las ovejas a la hora de pastar (Dumont y Hill, 2001).

### 3.1.3 Modelos de simulación como herramientas de entrenamiento y aprendizaje

Los modelos de simulación en general y los modelos basados en agentes en particular (Axelrod, 1997b; Edmonds, 2001) pueden ser utilizados también para propósitos de enseñanza y entrenamiento en áreas de recursos naturales o en cualquier otro.

La simulación multiagente proporciona herramientas para poder jugar con el conjunto de reglas conocidas en un determinado contexto ambiental y poder explorar las consecuencias del comportamiento del gestor, de sus políticas y su sensibilidad, o simplemente de las condiciones iniciales o de contorno que se impongan. Así se puede llegar a conseguir un mejor entendimiento de los comportamientos complejos de los sistemas con recursos. La utilización de estos modelos supone desplazarse del famoso “*learning by doing*” al “*learning by simulation*”. Si se asume que el aprendizaje en un sistema virtual puede ser útil en el aprendizaje sobre el sistema real<sup>79</sup> quizá sea posible limitar parcialmente el coste de los métodos de ensayo y error (Barreteau *et al.*, 2001).

### 3.1.4 Modelos de simulación como herramientas de soporte a la decisión y negociación

Otro de los usos de la simulación basada en agentes es como herramienta de ayuda a la decisión y negociación. Lo que se entiende por decisión en el marco de la

---

<sup>79</sup> Teniendo claro el vínculo y las diferencias entre los dos.

gestión de un recurso emerge frecuentemente de la interacción de un pequeño número de *stakeholders*. En este contexto los sistemas de simulación multiagente se conciben como un objeto de mediación y soporte entre los grupos de decisión para una mejor negociación (Bousquet *et al.*, 1999), o bien para inducir a los propios *stakeholders* a acordar representaciones comunes del recurso y, por tanto, utilizar el sistema como herramienta de facilitación de la comunicación, concentrando los procesos de selección en tiempo y espacio.

La utilización de modelos de simulación como herramientas de discusión, especialmente los modelos basados en agentes, generalmente más descriptivos y fácilmente comprensibles, pueden prevenir ciertas ideas erróneas entre los *stakeholders* y comportamientos de mala fe, favoreciendo procesos de empatía y elaboraciones conjuntas de los modelos. Conviene tener presente que casos en los que los modelos utilizados no son públicos, y en consecuencia sus hipótesis no son consensuales, pueden provocar procesos de negociación fallidos (Reitsma *et al.*, 1996).

Una de las herramientas con las que más frecuentemente se combina este uso del modelado es con los juegos de rol<sup>80</sup> (Barreteau *et al.*, 2001; Barreteau, 2003; Etienne *et al.*, 2003; Etienne, 2003; Barreteau *et al.*, 2003b; Castella *et al.*, 2005). En estos sistemas los *stakeholders* participan como jugadores sobre una representación conjuntamente aceptada del sistema en el que interactúan, el modelo multiagente.

### 3.1.5 Taxonomía de los modelos basados en agentes en la gestión ambiental

El primer intento de clasificación de los modelos en este tipo de dominio es muy reciente (Hare y Deadman, 2004) puesto que la explosión de aplicaciones también es muy reciente. Hare y Deadman (2004) clasifican los modelos según siete características.

La primera característica importante es la forma de acoplamiento entre el modelo del recurso y el modelo social. Aquí surge la primera división importante entre los modelos que representan el entorno explícitamente y aquellos que no. Por

---

<sup>80</sup> También se utilizan RPG y procesos de participación para otros usos diferentes de ABM, pero esta es la aplicación más frecuente.

supuesto en este dominio de aplicación es necesaria una representación del entorno en el que actúan los agentes, es preciso representar el recurso. Aunque hay modelos en los que el modelador puede considerar que el espacio explícito no es necesario, esto no significa que no se represente, se puede hacer mediante una base de datos o mediante una estructura matemática sencilla sin necesidad de ir más allá. Sin embargo, también pueden existir modelos en los que sí que sea necesaria. En estos casos la representación se puede hacer mediante una simple superficie reticular o grid, o mediante un Sistema de Información Geográfico (SIG), como comentaremos posteriormente y de forma más amplia en este mismo capítulo.

Una segunda característica importante a evaluar es si el modelo en cuestión representa explícitamente la toma de decisiones de los agentes<sup>81</sup>, especialmente en lo concerniente a factores cognitivos y psicológicos explícitos frente a modelos maximizadores como los que se podrían utilizar al representar al *homo-economicus* racional clásico de la literatura económica

El tercer aspecto a tener en cuenta es si el modelo considera o no interacción social. Puesto que no todos los sistemas pueden ser considerados como sociales, no todos los modelos tienen por que incluirla. En el caso de que los diseñadores consideren la necesidad de representar las interacciones sociales de forma explícita, existen diferentes formas de hacerlo. La primera surge en los modelos en los que existen tareas distribuidas y por tanto la interacción social se centra en la tarea, los agentes interaccionan con aquellos con los que necesitan para completar la tarea, se dice que la interacción es por *tareas basadas en grupo*. La segunda forma de interacción social surge en los modelos en los que los agentes adaptan su comportamiento en función de otros agentes que estén localmente próximos o conectados mediante una red social, en ese caso se habla de una *adaptación social local*. La última opción de interacción social es la *adaptación global social*.

Otro requerimiento a considerar es la adaptación intrínseca del sistema de toma de decisiones y del comportamiento. Esta característica hace referencia a como evoluciona el comportamiento de los agentes modelados como respuesta a las políticas de gestión que se puedan adoptar o al cambio del entorno o del recurso,

---

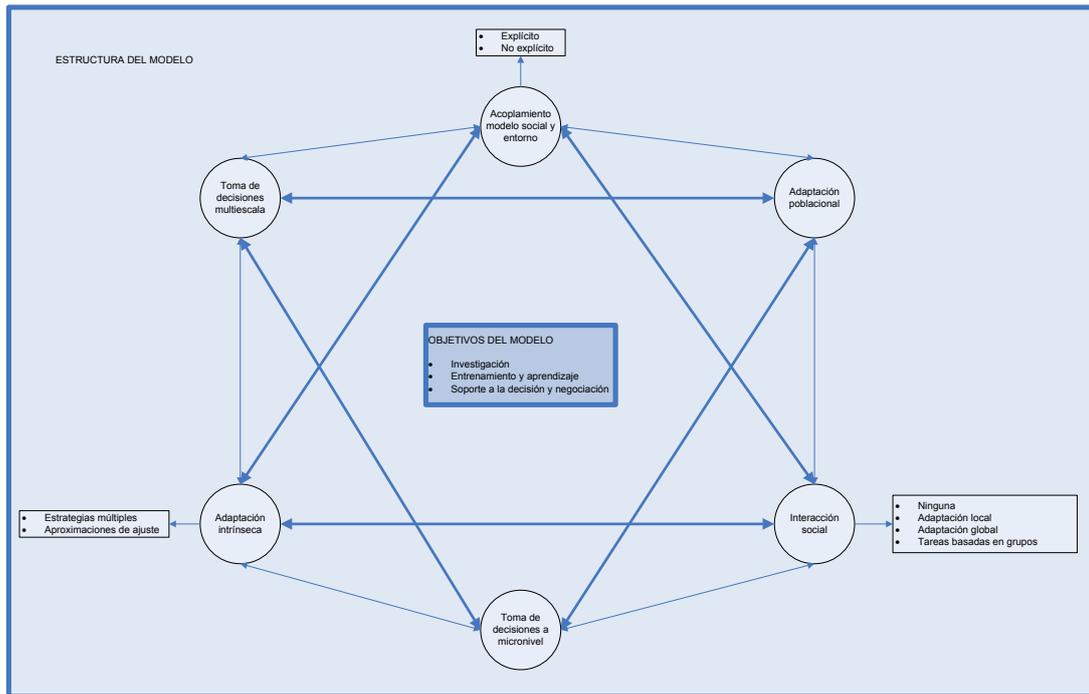
<sup>81</sup> La clasificación de Hare y Deadman (2004) presenta cierta inconsistencia al referirse simplemente a agentes representando seres humanos, cuando podrían ser otros tipos de animales, organizaciones, etc.

aparte de los fenómenos de adaptación social que pudiese haber. Básicamente existen dos maneras: mediante la selección entre *estrategias múltiples* o bien las *aproximaciones de ajuste*.

El quinto factor de diferenciación entre modelos es el nivel de adaptación de la población. Aquí Hare y Deadman (2004) hacen referencia al intento de identificar estrategias de gestión óptimas o dominantes para determinados estados del sistema, mediante la eliminación de aquellos agentes con peores resultados y la promoción de los mejores.

Los últimos criterios de diferenciación son la toma de decisiones a nivel multiescala, aunque la mayoría de los modelos no la implementan, y el nivel de escala o agregación de los modelos, es decir si en los modelos se representan las mínimas unidades de decisión y si se ha producido un proceso de agregación o *agentificación*.

La figura 25 muestra de manera sináptica todos los criterios de clasificación de modelos basados en agentes de recursos naturales que se han revisado a lo largo de este capítulo de acuerdo a sus objetivos y su estructura. El poder de clasificación más descriptivo es el triángulo de criterios formado por la representación espacial del acoplamiento entre los modelos social-entorno, y las interacciones sociales y de adaptación individual intrínseca de los agentes del modelo.



**Figura 25.** Criterios de clasificación de modelos de recursos naturales en cuanto a sus objetivos y estructura. Fuente: Elaboración propia.

## 3.2 Modelado basado en agentes y Sistemas de Información Geográfica

### 3.2.1 Introducción a los SIG

El estudio de fenómenos que incorporan de manera relevante el concepto de espacio se puede ver favorecido a través de la inclusión de tecnologías computacionales para el análisis y modelado de espacios geográficos, los *Sistemas de Información Geográficos*, (SIG)<sup>82</sup>.

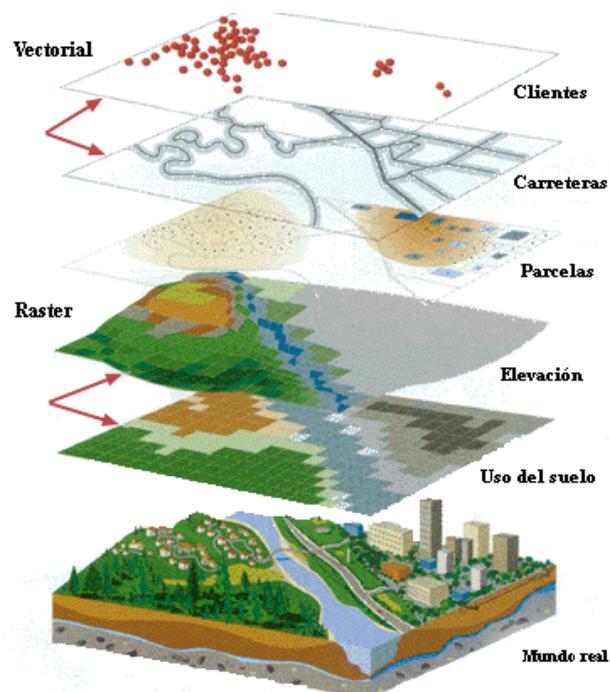
Entre las múltiples definiciones de SIG, una de las más formales en nuestra opinión, la de Star y Estes (1990) lo describe como un sistema de información diseñado para trabajar con datos referenciados por coordenadas espaciales o geográficas. En otras palabras, un SIG es tanto un sistema de base de datos con capacidades específicas para datos referenciados espacialmente, como un conjunto de operaciones para trabajar con los datos propiamente. Para los objetivos de esta

<sup>82</sup> *Geographic Information System*, GIS.

tesis conceptualizaremos un SIG como una base de datos computacional consistente en datos ligados a su localización geográfica.

La base de datos de un SIG está formada a su vez por dos tipos de información. Por un lado están los datos sobre la localización espacial, datos espaciales de los objetos incluidos en la base de datos de estudio, lo que se conoce como la *base de datos geográfica*. Por otro, el SIG contiene datos sobre la información temática o los atributos de los objetos geográficos incluidos, la *base de datos alfanumérica* (Clarke, 1999; Ormsby *et al.*, 2001).

En un SIG, los datos que forman la base de datos espacial se representan mediante capas, cada una sobre una temática similar, que representan un determinado aspecto geográfico del entorno bajo estudio (figura 26). Cada una de estas capas puede contener datos de atributos formando las bases de datos alfanuméricas. Estos datos contienen descripciones sobre cada entidad representada en la capa y suelen almacenarse de forma tabular de tal manera que mantengan vínculos con los objetos gráficos.



**Figura 26.** Estructura de capas y estructuras de información de un sistema de información geográfico<sup>83</sup>.

<sup>83</sup> Imagen retocada a partir de original en <http://cier.uchicago.edu/gis/gis.htm> [Fecha de acceso: 28 de abril de 2006]

La información de las capas se puede almacenar utilizando dos formatos<sup>84</sup>, el formato *raster* y las estructuras de datos vectoriales. El modelo de SIG *raster* o matricial compartimenta el espacio en celdas regulares donde cada una de ellas representa un único valor. Matemáticamente se puede definir como un conjunto de celdas localizadas en coordenadas contiguas, implementadas en una matriz 2D. Cada celdilla, también llamada elemento de imagen, elemento de matriz o píxel, es referenciada por índices de línea y columna y contiene un número representando el tipo o valor del atributo de la celda. Cuanto mayor sean las dimensiones de las celdas (resolución) menor es la precisión o detalle en la representación del espacio geográfico.

En el caso del modelo de SIG vectorial, el interés de las representaciones se centra en la precisión de localización de los elementos sobre el espacio. La representación vectorial de un objeto es un intento de representar de la forma más exactamente posible, procurando definir de manera precisa todas las posiciones, longitudes y dimensiones de las entidades geográficas. Consiste normalmente en listas de coordenadas 2D que delimitan regiones temáticas mediante puntos, líneas y polígonos.

Las ventajas que presenta la representación vectorial frente a la representación raster se deben principalmente a la representación matemática más precisa y más compacta de elementos discretos, como por ejemplo la representación de las relaciones topológicas de forma adecuada. Además permite asociar de forma sencilla atributos a elementos gráficos, proceso mucho más complejo en la representación raster.

La representación raster, no obstante, tiene también mucha importancia puesto que, pese a la pérdida de resolución, permite representar fenómenos con variación continua en el espacio y por tanto mecánicas y algoritmos mucho más sencillos en problemas de modelado y simulación. De hecho, la mayoría de los pocos modelos basados en agentes que incorporan sistemas de información geográficos como representación del espacio, utilizan este sistema por la relativa sencillez de

---

<sup>84</sup> También existen los formatos TIN, *triangulated irregular network* y *Quad-Tree structures*, pero son mucho menos conocidos (Clarke, 1999).

integración que pueden tener con *grids* y estructuras matriciales para convertir los modelos a basados en *autómatas celulares*<sup>85</sup> (CA).

### 3.2.2 SIG y sistemas de modelado. Acoplamiento SIG-ABM.

La razón de que todavía no existan muchos modelos basados en agentes acoplados con SIG se debe a que en simulación, los contextos dinámicos de los modelos son difíciles de implementar sobre SIG convencionales, en los que la información se almacena y recupera de forma estática (Gonçalves *et al.*, 2004). Para poder utilizar SIG sobre estructuras de simulación de eventos discretos, entre los que se incluyen los modelos ABM, sería necesario representar estructuras de información con cuatro dimensiones, incluyendo la dimensión temporal además de las coordenadas geográficas. Esto permitiría captar los cambios dinámicos que podrían tener lugar en los objetos geográficos pero a costa de manipular estructuras de datos enormes, lo que lo hace técnicamente difícil.

La necesaria fase de integración se puede intentar acometer desde dos perspectivas extremas: desde aproximaciones centradas en SIG o bien desde aproximaciones centradas en el modelado (Maguire, 2005).

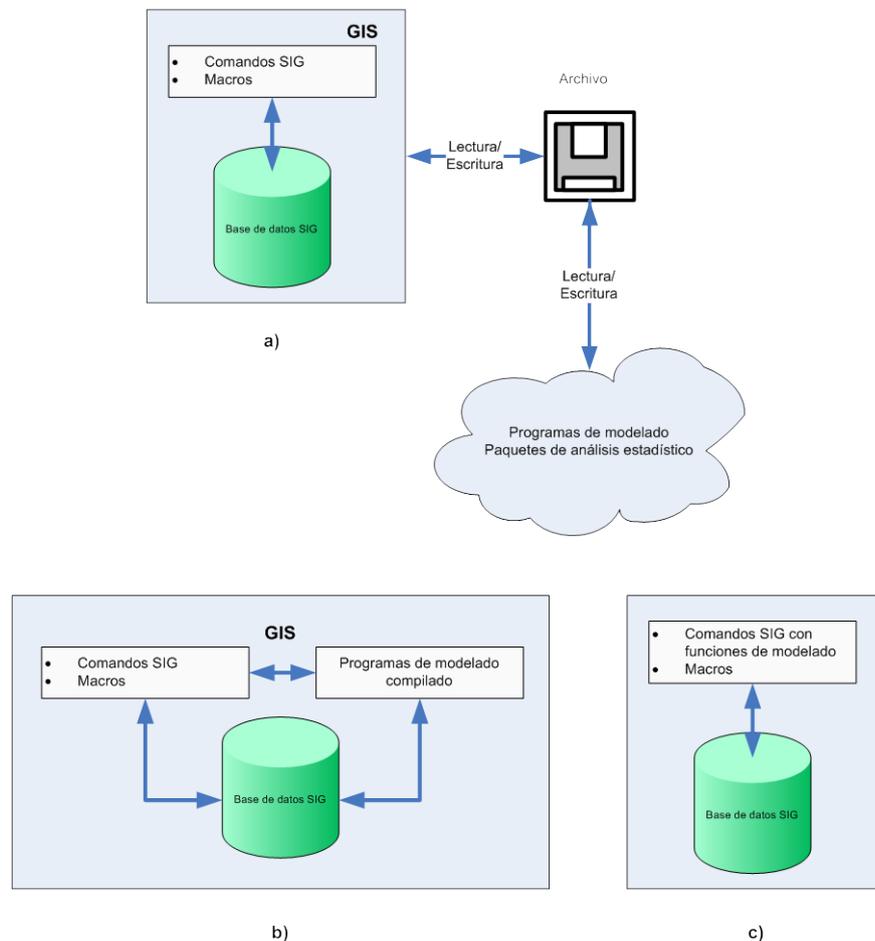
Las aproximaciones centradas en los SIG actuales ofrecen importantes ventajas para las tareas de modelado como son la gestión de datos masivos, herramientas para la integración y transformación de datos, perfecta integración con el propio SIG para la visualización y múltiples herramientas de análisis espacial (Goodchild y Longley, 2005). Sin embargo hoy en día carecen de la flexibilidad y expresividad de las herramientas basadas en el modelado.

Los sistemas centrados en el modelado, sobre todo en el modelado basado en agentes, como Swarm, Mason o RePast ofrecen también importantes ventajas, son abiertos, de dominio público, muy flexibles para el modelador pero, limitados en el tratamiento de información geográfica.

---

<sup>85</sup> Mientras que con los softwares específicos de ABM no resulta complicado generar modelos acoplados con CA, la integración no es directa cuando los datos provienen de un SIG. La razón de este hecho se puede buscar en que tanto los agentes como las celdas de un autómatas pueden ser implementados con la misma filosofía basada en el individuo. Esto no ocurre cuando tratamos con un SIG en el que las unidades de información no son propiamente las celdas sino las capas (Box, 2002). Aunque si las capas son *raster*, identificando celda del SIG con celda del CA la dificultad decrece frente a representaciones vectoriales.

Existe una situación intermedia que ocurre cuando nos enfrentamos a situaciones en las que los sistemas de modelado y SIG ya están creados y resulta muy costosa la reconstrucción integrada de uno sobre otro, en esos casos los sistemas pueden ser acoplados. En este sentido Westervelt (2002) compara diferentes aproximaciones de integración SIG-modelo en términos de fuerza de acoplamiento (figura 27).



**Figura 27.** Integración de modelos con SIG. a) Integración débil, b) integración moderada, c) integración fuerte. Basado en Yeh (2005) y Brown *et al.* (2005).

La *integración fuerte* se caracteriza por las operaciones simultáneas de múltiples modelos que permiten la comunicación intermodelo durante la ejecución. Normalmente se hace mediante las llamadas a funciones y a interfaces de objetos entre los sistemas. La *integración media* se caracteriza por la utilización de técnicas como las llamadas a procedimientos remotos o el acceso compartido a bases de

datos. La *integración débil* emplea estructuras de archivos comunes o traductores de archivos. La tabla 4 muestra las diferencias entre los diferentes tipos de integración.

**Tabla 4.** Comparación de aproximaciones de integración entre SIG y sistemas de modelado. Fuente: Westervelt (2002) y Maguire (2005).

	<b>Débil</b>	<b>Media</b>	<b>Fuerte</b>
<b>Tiempo de integración</b>	Rápida	Media	Lenta
<b>Experiencia del programador</b>	Baja	Alta	Media
<b>Velocidad de ejecución</b>	Lenta	Media	Rápida
<b>Capacidad de ejecución simultánea</b>	Baja	Baja	Alta
<b>Depuración</b>	Fácil	Moderada	Difícil

### 3.2.3 Niveles de integración actual. Principales modelos

Hoy en día existen ejemplos de la mayoría de los niveles de integración ABM-SIG posibles (Parker, 2005). Hay modelos que se ejecutan sobre autómatas celulares abstractos. Modelos que son capaces de leer datos de un SIG para realizar sus operaciones y luego volver a generar datos para volver a ser devueltos al SIG. Hay modelos integrados cuando se necesitan determinadas funcionalidades en tiempo de ejecución.

La mayoría de los modelos están desarrollados para operar sobre representaciones espaciales abstractas, incluso cuando los objetivos a largo plazo de los modelos sean aplicar los resultados de las simulaciones a zonas espaciales concretas (Parker, 2005). Estos modelos aparte de servir como trampolín para el salto conceptual al mundo real, también sirven de forma más metódica como herramientas teóricas para buscar mecanismos que generen patrones de comportamiento que se ajusten con los comportamientos reales. Como ejemplo paradigmático de este uso podemos encontrar el estudio del modelo del Támesis, descrito con mayor amplitud más adelante en este mismo capítulo, con el que Moss (2002b) reproduce patrones sociales. Otros ejemplos de modelos de este tipo los podemos encontrar en el modelo SLUDGE (Parker y Meretsky, 2004) basado en RePast en el que se examina la relación entre las externalidades espaciales negativas, la fragmentación del espacio y la eficiencia económica, o el modelo FEARLUS (Polhill *et al.*, 2001; Gotts *et al.*, 2003b) basado en Swarm, un modelo abstracto de cambio de uso del suelo con usos del suelo, clima, economía y propiedades biofísicas artificiales para la generación de patrones.

Existe también un importante grupo de modelos basados en agentes que implementan entornos reales mediante un *raster*. Podemos encontrar colecciones de modelos de este tipo en Janssen (2002), Gimblett (2002) ó Maguire *et al.* (2005), y aplicaciones tan sorprendentes como el estudio de la cultura Anasazi mediante simulación en aplicaciones antropológicas (Dean *et al.*, 2000; Kohler *et al.*, 2005). Una gran parte de modelos de este tipo han sido desarrollados con la herramienta Cormas (Bousquet *et al.*, 1998; Barreteau y Bousquet, 2000; Bousquet *et al.*, 2001; Becu *et al.*, 2003; Feuillet *et al.*, 2003; Etienne, 2003; Barreteau *et al.*, 2003a; Mathevet *et al.*, 2003b; Barreteau *et al.*, 2004), que permite a los usuarios importar vectores y capas SIG tipo *raster* o crearlas de forma interactiva. A menudo estas aplicaciones se han diseñado para combinarlas con procesos de participación de *stakeholders* y juegos de rol.

También se están empezando a realizar aplicaciones que están completamente integradas e implementan la comunicación en tiempo de ejecución entre modelo y SIG (Parker, 2005). Las más importantes de ellas utilizan librerías en Java que integran con RePast. GeoGraphs (Dibble y Feldman, 2004) por ejemplo, inicializa entornos en modelos a través de SIG con RePast y permite el modelado de redes en 2D y 3D, sin embargo sus librerías no son públicas de momento. Una de las más importantes y recientes extensiones añadidas a RePast es la herramienta *Agent Analyst* (North, 2005) que intenta facilitar la integración con ArcGIS y OpenMap, y la sistematización en la creación de modelos. A pesar de que la herramienta es francamente interesante tiene sus desventajas: la sintaxis es compleja al mezclar Python y Java en el mismo código y no es tan flexible como el código de RePast directamente.

Por último, respecto a modelos basados en agentes que integren funcionalidad interna SIG, todavía no existen demasiados trabajos, aunque se puede citar el trabajo de Torrens y Benenson (2005) en el desarrollo de GAS (Geographic automata system). GAS es un marco conceptual para integrar modelos urbanos basados en autómatas con SIG y modelos multi-agentes. El marco ha sido implementado para

diferentes lenguajes y plataformas en *The Object-Based Environment for Urban Systems* (OBEUS)<sup>86</sup>.

### 3.3 Principales modelos basados en agentes en el dominio del agua

#### 3.3.1 El modelo del Támesis

El modelo del Támesis es un modelo basado en agentes centrado en el consumo doméstico de agua desarrollado por el *Centre for Policy Modelling*<sup>87</sup> de la Manchester Metropolitan University (Barthélemy *et al.*, 2001; Edmonds *et al.*, 2002; Moss, 2002b; Edmonds y Moss, 2005) en su versión en SDML e implementado por José Manuel Galán y el Dr. Adolfo López Paredes en su versión en RePast. El modelo está centrado en el comportamiento de las viviendas (*households*), en particular, en como los patrones de comportamiento imitativo pueden afectar a la demanda agregada de agua. Así, el núcleo del modelo lo compone una red de agentes que representan una vivienda individual. Estos agentes se distribuyen de forma aleatoria en una superficie reticular toroidal de dos dimensiones. Cada uno de los agentes pertenecientes a este tipo sólo puede interactuar con aquellos que se encuentren a menos de una distancia máxima definida.

La totalidad de las viviendas y sus posibles interacciones se pueden considerar como la representación de una comunidad o cluster. El entorno exterior de cada vivienda consiste en: las temperaturas y las precipitaciones; los mandatos de la compañía de agua; y, de forma crítica, las viviendas vecinas (figura 28).

Cada vivienda se define por tres características que determinan su consumo, *Ownership*, *Frequency* y *Volume*. *Ownership* hace referencia al número diferente de dispositivos de uso de agua que posee una vivienda tales como; duchas, lavadoras, lavavajillas, mangueras, etc. La proporción de posesión de estos dispositivos por parte de las viviendas está calibrada para representar las proporciones reales del área del Támesis. *Frequency* y *Volume* se refieren a la frecuencia de uso del dispositivo de consumo de agua y el volumen de agua consumida con cada uso, respectivamente.

---

<sup>86</sup> <http://www.eslab.tau.ac.il/obeus/obeus.htm>

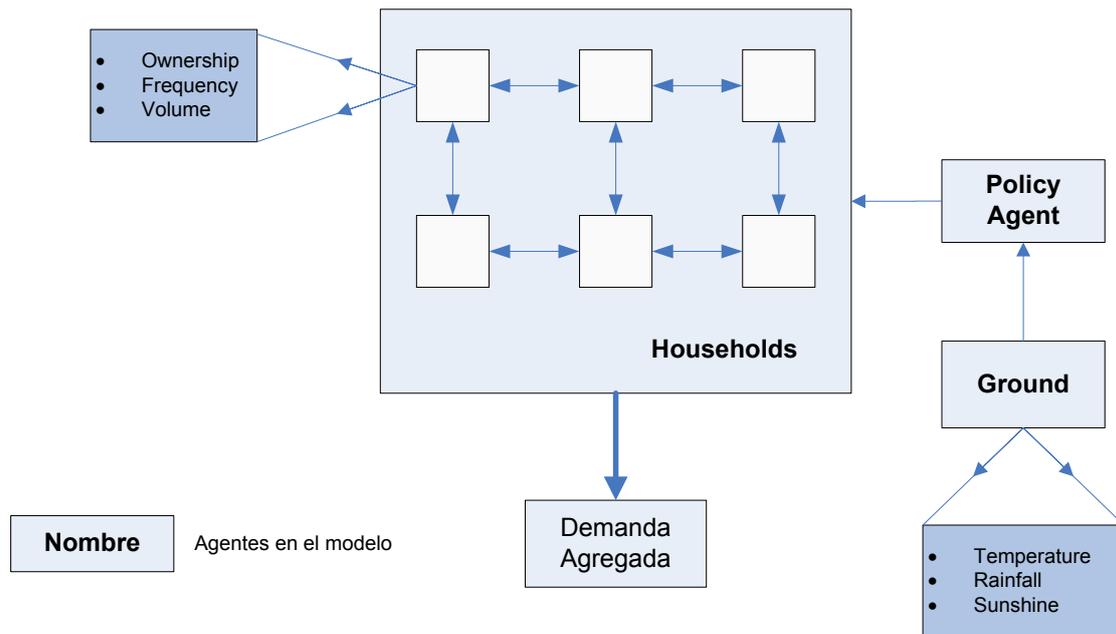
<sup>87</sup> <http://cfpm.org/>

La unidad de tiempo del modelo es el mes. En cada mes, cada vivienda ajusta sus hábitos de uso de agua en términos de la cantidad de usos del dispositivo y de la posible adquisición de nuevos dispositivos que puedan producir un mayor consumo o un ahorro de recurso.

El ajuste se realiza mediante un proceso de imitación y refuerzo. Para ello, cada una de las viviendas evalúa de forma diferente la importancia que da a determinados factores de la sociedad. Cada una valora (o refuerza) de manera diferente las señales que percibe dependiendo de la fuente que las emita. Esta particularidad se implementa en el modelo mediante un sistema de *endorsements* (Cohen, 1985), metodología utilizada con éxito como aproximación a modelos de racionalidad limitada (Moss, 1995; Moss, 1998; Pajares *et al.*, 2003a; Pajares *et al.*, 2004). A partir del sistema de *endorsement* las viviendas ponderan más o menos las señales percibidas por ellos mismos, por su vecindad o por las recomendaciones realizadas por el *Policy Agent* de manera conjunta a la totalidad de las viviendas.

Para poder ser influenciados por la vecindad, cada vivienda ha de recibir información sobre los hábitos de consumo por parte de los vecinos de su entorno, pero sólo aquellos comportamientos que son públicos y no las actividades del dominio privado, y así evaluar las relaciones asimétricas que puedan tener lugar.

El *Policy Agent* representa el agente responsable de la guía de los consumidores respecto al consumo de agua en tiempos de escasez o crisis del recurso. Puede hacer referencia a la compañía suministradora de agua o a alguna autoridad gubernamental o municipal. Para configurar el comportamiento de este agente en el modelo se calcula el nivel de agua en el suelo derivado de los datos climatológicos suministrados. Este agente no hace predicción, sólo reacciona a la evidencia científica, y para él la evidencia científica es el déficit de humedad en el suelo calculado mediante el *algoritmo modificado de Thornthwaite* (Thornthwaite y Mather, 1955). Si los valores obtenidos son bajos durante dos meses consecutivos, el *Policy Agent* comienza con sus sugerencias a las viviendas. Si el proceso continúa estas sugerencias se van haciendo cada vez mayores.



**Figura 28.** Estructura del modelo del Tamesis. Fuente: Edmonds *et al.* (2002).

El modelo implementado se configuró para que dos nuevos dispositivos estuvieran disponibles para las viviendas: nuevas lavadoras, con un consumo mucho menor que las antiguas y *power shower* con un consumo mucho mayor que las de uso convencional en el Reino Unido. Estos dispositivos pueden ser adquiridos en cualquier momento por parte de las viviendas a partir del instante en el que el modelador las señala como disponibles en la simulación, en particular cuando se estropean las antiguas. La tasa de fallo se estima mediante una función de Weibull parametrizada de acuerdo al tipo de dispositivo.

Los resultados del modelo sugieren que el efecto de las sequías puede tener trascendencia a largo plazo acostumbrando a las viviendas a valores de consumo más bajos. Sugiere que el efecto climático es menor que los posibles efectos sociales que puedan tener lugar y el impacto significativo de la inclusión de los nuevos dispositivos de ahorro o de mayor consumo que puedan estar disponibles en el mercado.

### 3.3.2 El modelo FIRMABAR

El modelo FIRMABAR (López-Paredes *et al.*, 2005) constituye el principal antecedente a la realización de esta tesis. Su desarrollo fue financiado por el V

programa Marco de la UE en el seno del proyecto FIRMA<sup>88</sup> y su diseño, implementación y calibración fue llevado a cabo por el Dr. López-Paredes y José Manuel Galán del grupo INSISOC<sup>89</sup> y el Dr. Saurí de la Universidad Autónoma de Barcelona.

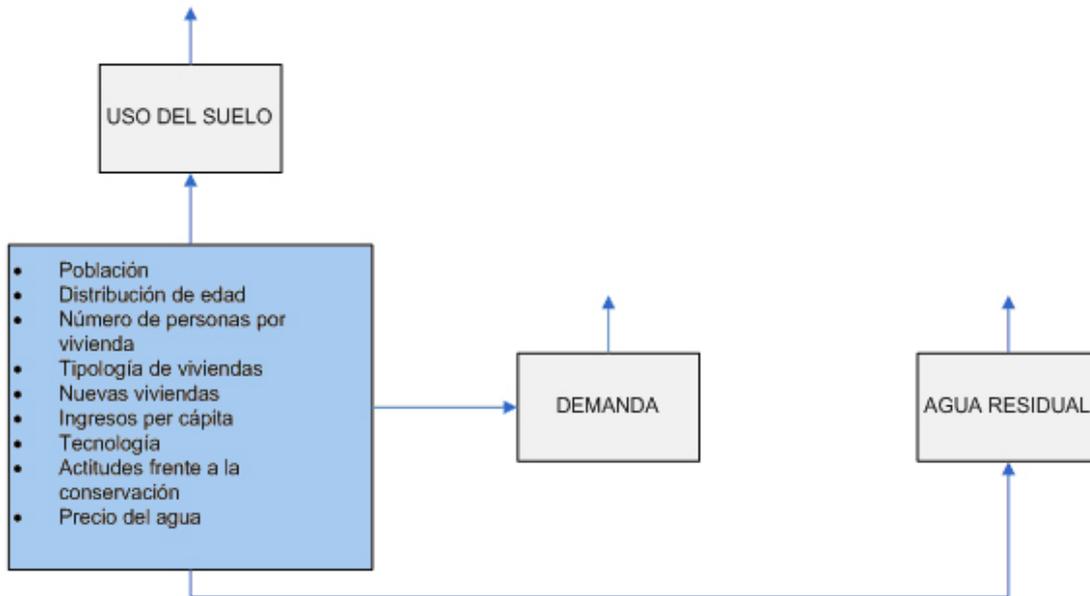
El objetivo del proyecto era crear un simulador basado en agentes a partir de las ventajas metodológicas ofrecidas por la integración iterativa de los procesos de participación, que integrase aspectos físicos, hidrológicos, sociales y económicos de la gestión de agua. Para cumplir con los objetivos se seleccionaron cinco aplicaciones regionales. Sin embargo, y como consecuencia de las diferencias de cada una de las zonas, no fue posible ofrecer un modelo completo e integrado para todas las regiones, se hizo necesario desarrollar un modelo en cada caso y el modelo FIRMABAR fue el modelo creado para el dominio del área Metropolitana de Barcelona.

El modelo está centrado en el consumo doméstico de agua y en la integración de diferentes factores sociales (figura 29) en el modelo de demanda, y su simulador asociado proporciona la visión de la dinámica del sistema y las interacciones sociales que afectan al recurso en el área geográfica. Además permite a los *stakeholders* envueltos en el proceso probar diferentes estrategias y configurar diferentes escenarios para evaluar los resultados de sus políticas e hipótesis.

---

<sup>88</sup> Freshwater Integrated Resource Management with Agents.

<sup>89</sup> [www.insisoc.org](http://www.insisoc.org)



**Figura 29.** Factores con influencia en la demanda y uso del suelo acordados por la plataforma de entidades sociales

Para asistir en las fases de modelado y validación del simulador y establecer los escenarios de estudio se constituyó una plataforma de nueve organizaciones representativas de los sectores públicos, privados y cívicos (tabla 5)

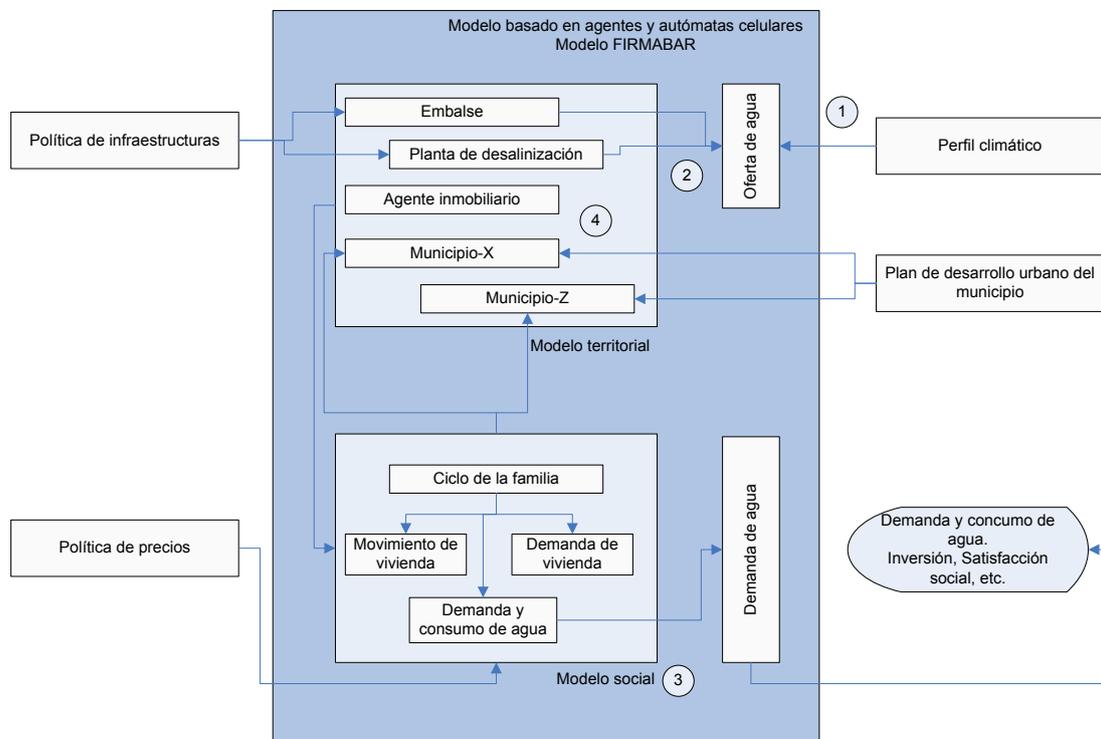
**Tabla 5.** Plataforma de entidades sociales (Galán *et al.*, 2007).

Región Metropolitana de Barcelona					
Decisión		Ejecución		Influencia	
ACA	Agencia Catalana del Agua	ATLL	Gestor de la red de suministro de agua	ROCA	Fabricante de tecnologías de agua doméstica
		AGBAR	Compañía suministradora de agua	APCE	Asociación de constructores y promotores de viviendas
				CONFAVC	Confederación de comunidades de vecinos
				OCUC	Asociación de consumidores
				ALTERNATIVA VERDA	Partido ecologista

- Organizaciones públicas
- Compañías privadas
- Sociedades civiles

La estructura del modelo está compuesta de un contenedor de dos submodelos acoplados como se muestra en la figura 30, el modelo territorial y el modelo social. También existen módulos adicionales destinados a la configuración de las simulaciones, la computación de los comportamientos agregados y la modificación de la estrategias en tiempo de simulación (ver López-Paredes y Galán (2003) y Galán *et al.* (2004)).

En el modelo, el uso del suelo y el clima determinan el entorno y afectan al comportamiento global del sistema, mientras que la dinámica de la población modifica el uso del suelo y la demanda total de agua. El modelo social contiene una sociedad artificial de familias (agentes) que se comportan de acuerdo a sus atributos sociales. Cada familia exhibe su propio estilo de vida y su actitud social, ambos determinando los niveles de consumo real y deseado. Sin embargo las familias no son los únicos agentes que participan en el modelo; existe también representación del gobierno regional, los municipios y un mercado inmobiliario. Cada uno de ellos interactúa con los demás y con su propio entorno para generar historias completas del proceso de agua en la región bajo diferentes condiciones.

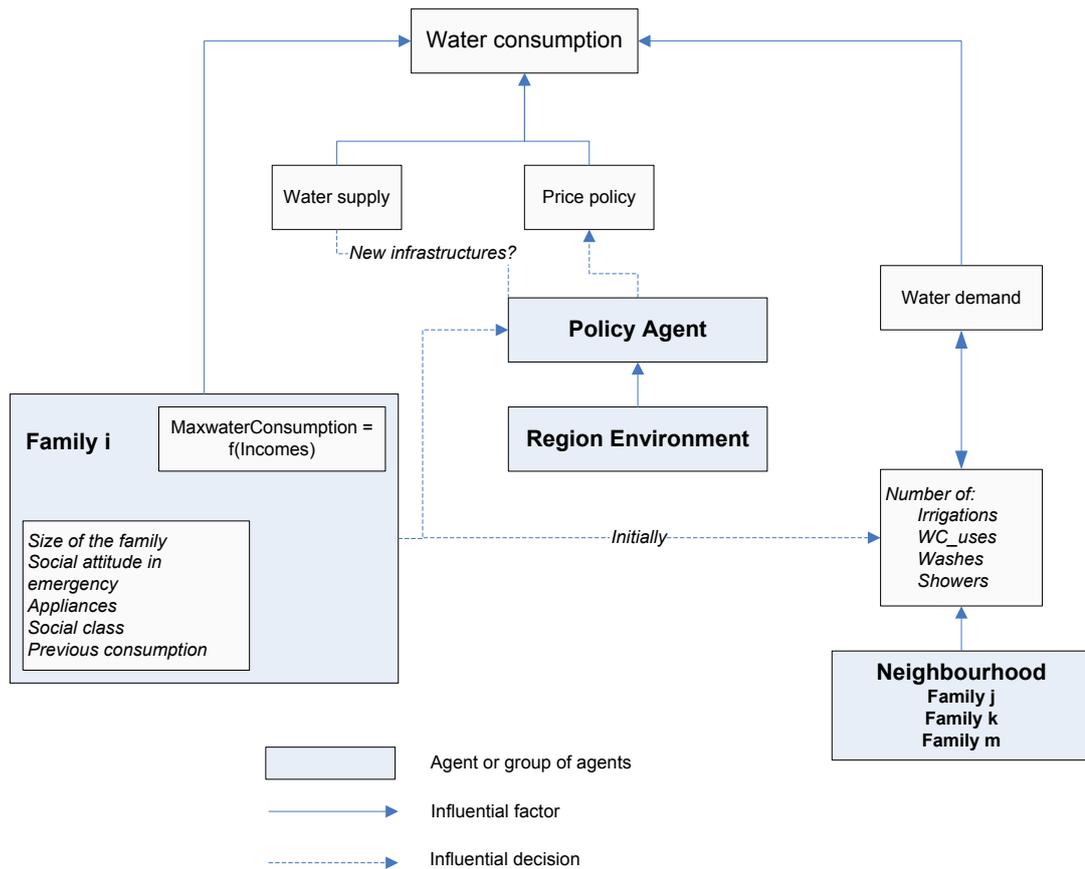


**Figura 30.** Estructura y dinámica general del simulador. Fuente: López-Paredes *et al.* (2005).

En la región Metropolitana de Barcelona existen 177 municipios. Para poder modelar la dinámica para la región se realizó una fuerte abstracción del sistema. Se definieron tres unidades territoriales representando las unidades urbanas reales de la región: la ciudad de Barcelona, los municipios con más de 50.000 habitantes y aquéllos en la región con menos de 50.000. Se localizaron estas tres representaciones territoriales en una superficie reticular espacial (*grid*) donde cada celda representa una vecindad de familias viviendo en un tipo de vivienda. Cada municipio se organiza mediante barrios o distritos. Algunos de estos distritos se pueden dotar de planes urbanos que se desarrollan a medida que la presión de las nuevas viviendas aumenta en el municipio.

El otro submodelo, el modelo social, está compuesto por la vida del conjunto de familias en el *grid* que representa el territorio. Cada familia se localiza en una vecindad dentro de una unidad de las unidades territoriales representativas. Las familias se comportan e interactúan con el resto de los agentes en el sistema tomando principalmente dos tipos de decisiones respecto al modelo, el movimiento de vivienda y el consumo de agua.

La decisión de movimiento de vivienda de cada familia depende de sus propias preferencias, principalmente el tamaño de la vivienda respecto a la estructura familiar, la clase social predominante en la vecindad y evolución de los precios de la vivienda. El algoritmo que define el comportamiento de consumo de agua de la familia depende esencialmente en los factores sociales con influencia determinados por la plataforma del proceso participativo (figura 31).



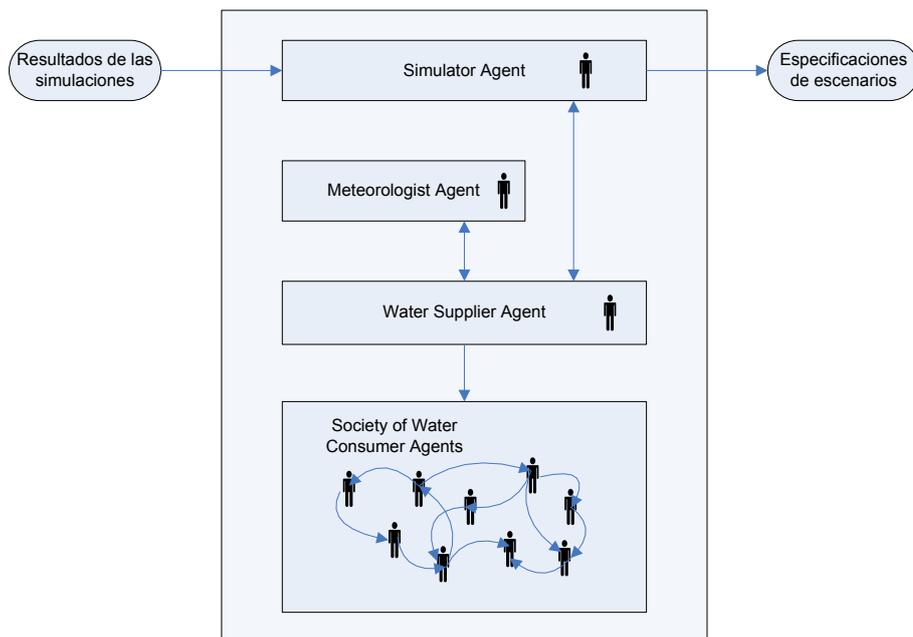
**Figura 31.** Diagrama del algoritmo de decisión de consumo de agua para una familia unidad de ejecución. La decisión de consumo de agua de cada familia depende esencialmente del precio del agua y del nivel de ingresos, del agua máxima demandada y de la evolución de los embalses en la región. Además, se ve afectado por el tipo de vivienda y sus tecnologías disponibles, la actitud social cuando la región está en épocas de escasez, la clase social y el tamaño de la familia. Finalmente, el consumo de agua se adapta a los hábitos locales mediante un mecanismo de imitación respecto a la vecindad más próxima (López-Paredes *et al.*, 2005).

### 3.3.3 El modelo DAWN

DAWN es un modelo híbrido basado en agentes para la estimación de la demanda residencial de agua y aplicado en Tesalónica (Grecia) (Athanasiadis *et al.*, 2004; Athanasiadis *et al.*, 2005; Athanasiadis y Mitkas, 2005). Integra un modelo basado en agentes para el consumo con modelos econométricos convencionales, de ahí su carácter híbrido, y su principal aportación es la integración de un mecanismo de difusión de influencia implementado mediante comunicación entre agentes a través de un grid social aleatorio.

El modelo basado en agentes que integra DAWN se utiliza para simular el ciclo demanda-oferta del agua. En esta cadena, se representan principalmente dos *stakeholders*. Por un lado la compañía suministradora de agua, que oferta el agua en el territorio urbano de estudio y es la encargada de fijar la política de precios. Por otro, se utiliza un conjunto de agentes que se consideran representativos de los consumidores del sistema real.

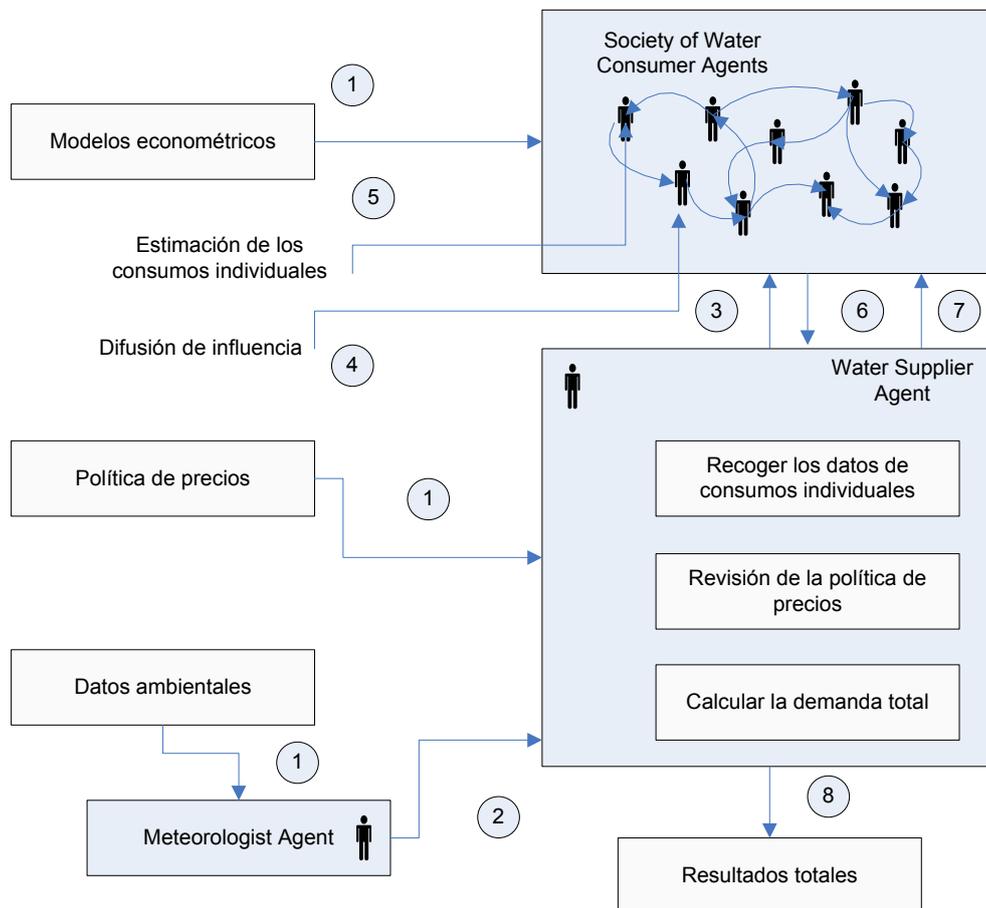
La empresa de suministro de agua se representa en el modelo por el *water supplier agent* (WSA), mientras que la sociedad de agentes consumidores constituye la comunidad de *consumer agents* (CA), donde cada CA simula un consumidor individual o un grupo de consumidores con necesidades comunes. Además en la arquitectura del programa se han añadido dos agentes adicionales, el *meteorologist agent* (MOA) para suministrar al sistema con las condiciones meteorológicas necesarias para llevar a cabo la simulación, y el *simulator agent* (SA) que se utiliza para moderar y sincronizar el procedimiento de simulación (figura 32).



**Figura 32.** Arquitectura de la plataforma DAWN. Fuente: Athanasiadis y Mitkas (2005).

La dinámica de la simulación está configurada en ocho pasos (figura 33). El primer paso es la introducción de los datos de entrada y la inicialización. Este proceso conlleva los procesos de especificación de los modelos econométricos de demanda de agua, la política de precios y los datos meteorológicos que serán

utilizados. En el segundo paso MOA informa a WSA sobre las condiciones meteorológicas. En el tercer paso MOA informa a WSA sobre las condiciones meteorológicas. En el tercer paso la sociedad artificial reacciona frente a la aplicación de determinadas políticas de fijación de precios, simulando el comportamiento dinámico de consumo. Los agentes consumidores deciden su consumo a partir de un modelo econométrico parametrizado con un modelo de actividad social. Los parámetros del modelo de actividad social son los afectados por el mecanismo de difusión de influencia que se ejecuta en el cuarto paso. Este submodelo pretende simular las señales de propagación de las medidas de conservación del recurso entre la comunidad de consumidores. En el quinto paso se vuelve a recalcular el consumo de cada CA teniendo en cuenta las nuevas influencias. En el sexto paso WSA calcula el consumo agregado del sistema y el último paso presenta los resultados al usuario.



**Figura 33.** Dinámica de simulación de DAWN. Fuente: Athanasiadis *et al.* (2005).

### 3.3.4 El modelo de Ducrot *et al.*

El objetivo del modelo de Ducrot *et al.* (2004) es proponer un prototipo de modelo basado en agentes desarrollado en Cormas (Bousquet *et al.*, 1998) para representar las relaciones entre la dinámica de urbanización en las zonas peri-urbanas de países en desarrollo y la gestión de agua.

El caso de estudio se inspira en las áreas de los alrededores de la ciudad de Sao Paulo en Brasil. Esta zona está sometida a una muy importante presión urbanística aunque alberga los principales embalses de agua potable y las zonas naturales más importantes del área metropolitana.

En el modelo se representa una zona de 90 Km<sup>2</sup> mediante un grid espacial regular de 60\*50 celdas. Cada una de las celdas corresponde a una porción del terreno de estudio de 3 ha. A las celdas se les dota de un único estado inicial representando su uso del suelo entre ocho posibilidades diferentes: embalse, río, favela, construcción residencial, industria, infraestructura de turismo, cosecha de regadío (horticultura), cosecha de secano (cereales).

Si las celdas son contiguas existen dos clases de entidades de agregación en la representación espacial, los embalses y los municipios. El grid en el modelo prototipo se divide en tres municipios, cada uno con un nivel de impuestos específico. El embalse por otra parte contiene información sobre el nivel de agua disponible y los niveles de polución, que a su vez influyen en el proceso de toma de decisión de los agentes.

En cuanto a los agentes propietarios del suelo, el prototipo combina dos tipos diferentes de clases de agentes, los productores (granjeros) y los especuladores. Inicialmente cada celda es atribuida aleatoriamente a uno de los dos tipos en la proporción de dos tercios de productores y un tercio de especuladores hasta un total de 3.000 en total.

Mientras que en el modelo todos los productores siguen la misma estrategia, consistente en la recogida de las cosechas de sus celdas, los especuladores eligen entre tres tipos de estrategias que les son atribuidas también aleatoriamente. Pueden utilizar sus celdas para usos recreativos como viviendas de fin de semana, para

propósitos puros de especulación, esperando la subida de precios de sus celdas o invirtiendo para el desarrollo de actividades de negocio como el turismo o la industria. La elección de la inversión depende de la localización de la celda en el grid, su distancia a las zonas de agua y parques, aparte de la capacidad de inversión del propietario.

Cada uno de los agentes propietarios además está dotado con una cantidad de dinero y unas necesidades familiares distribuidas aleatoriamente. Las decisiones de cada uno se basan en los valores que en cada instante de tiempo tengan esos parámetros además de las propiedades espaciales que tengan la celda y su vecindario próximo.

Dentro del modelo también se integran dos procesos migratorios contrapuestos. Por un lado para representar los movimientos de inmigración, cada doce meses, se añaden nuevos potenciales propietarios. Para representar los movimientos de emigración aquellos propietarios que queden sin celdas se quitan del modelo.

Cada seis meses los propietarios deciden que tipo de uso harán con sus celdas. Los productores tienen tres tipos de opciones, cosecha de regadío (sólo si tiene dinero para invertir en las infraestructuras necesarias y si la celda se encuentra en la proximidad de una zona de captación de agua), cosecha de secano y barbecho. El regadío permite mayor número de cosechas anuales y mayores ingresos.

En el caso de los propietarios especuladores la elección del uso del suelo dependerá de la estrategia de cada propietario y de su nivel de riqueza para acometer las inversiones.

Tanto productores como especuladores acumulan los ingresos generados además de los ingresos externos aleatorios y pierden dinero a través de las necesidades familiares y los impuestos del municipio. Mientras que los productores con resultados negativos están obligados a vender, en el prototipo los agentes especuladores no. El precio de las celdas depende fundamentalmente de la proximidad a las zonas con agua y de la distancia a los núcleos de favelas. Una celda puesta a la venta es inicialmente ofrecida a los granjeros vecinos y si no se lo pueden

permitir puede ser comprada por cualquier propietario. Si nadie la puede comprar decrece su valor en la siguiente iteración.

La dinámica de uso del suelo de este modelo se basa en el efecto conjunto de dos fuerzas. La primera es la toma de decisiones de los agentes que se acaba de comentar, si una celda cambia de propietario o de estrategia, el uso del suelo de esa celda también cambia. La segunda forma se produce cuando una celda en los alrededores inmediatos de un núcleo de favelas no es ocupada durante diez meses consecutivos se urbaniza y pasa a constituirse como favela.

Aunque la dinámica del modelo es bastante simple, permite explicar los procesos de expansión de los núcleos de favelas y gestionar procesos de gestión y flujos hidrológicos a nivel de celda, aunque sea de forma no muy detallada. A pesar de ello, el modelo ha sido criticado por la hipótesis de que la competición sobre uso del suelo está sobre-simplificada y por no incluir el rol que juega la inseguridad y la violencia en la expansión urbana en Brasil y los efectos de la minería.

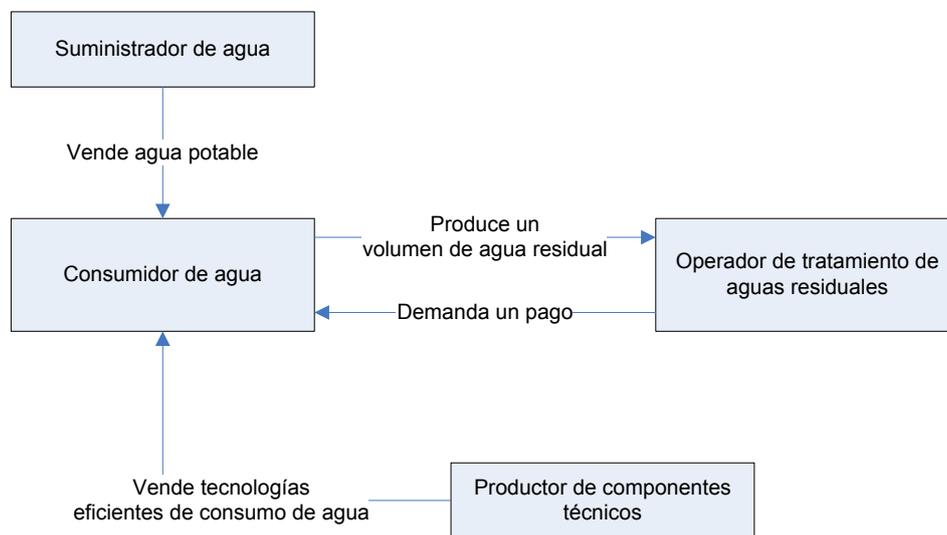
### **3.3.5 El modelo de Kotz y Hiessl**

El objetivo del modelo presentado por Kotz y Hiessl (2005) describe los aspectos principales asociados con los procesos de innovación en sistemas de infraestructuras de agua urbana, mediante un modelo basado en agentes que simula esos procesos de innovación.

La aproximación de los autores utiliza el marco de la economía evolucionista para el desarrollo de sus modelos. En el dominio de aplicación, los autores identifican del lado de la oferta básicamente dos jugadores, el suministrador de agua y el operador encargado del tratamiento de las aguas residuales. En el lado de la demanda identifican un gran número de consumidores (consumo doméstico e industrial). Mientras que los operadores del lado de la oferta gestionan subsistemas técnicos con gran influencia en el sistema de infraestructura urbana de agua, los miembros del lado de la demanda se encargan sólo de subsistemas técnicos de menor importancia (lavadoras, lavavajillas, etc.). No obstante, por su gran número pueden llegar a tener una importante influencia.

Además la flexibilidad del cambio tecnológico es muy diferente en los dos lados del mercado, mientras que el cambio de infraestructuras de oferta tiene un horizonte muy largo, el del lado de la demanda es muchísimo menor.

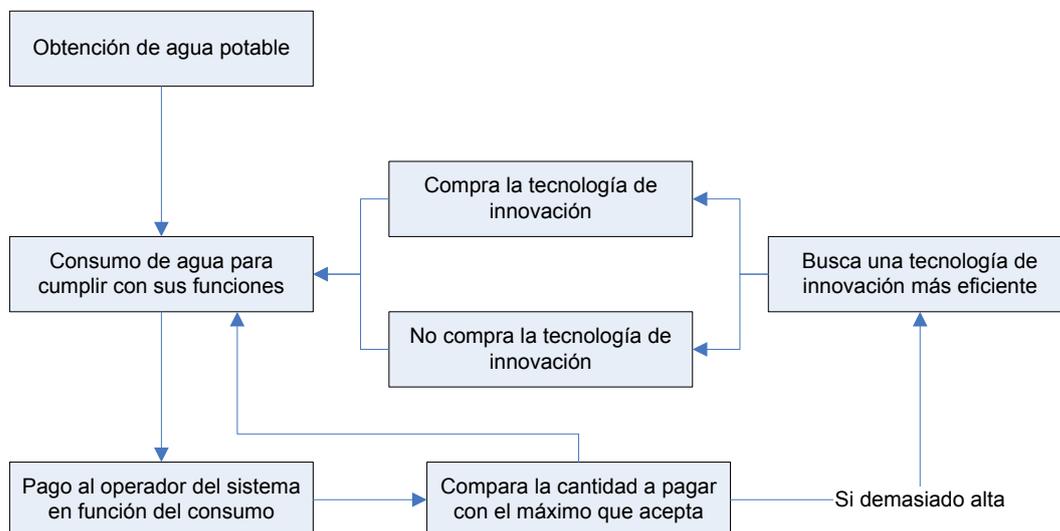
Con el objetivo de ilustrar los aspectos con influencia en el proceso de innovación y modelar la divergencia funcional de los diferentes ciclos de tiempo de las tecnologías de oferta y demanda, los autores han desarrollado un modelo basado en agentes. Los agentes diseñados en el modelo son cuatro (figura 34), el suministrador de agua, el operador responsable de las aguas residuales, el agente consumidor (con tres instancias) y el agente productor de tecnologías utilizadas en las viviendas (también con tres instancias).



**Figura 34.** Representación esquemática de los agentes e interacciones del modelo de Kotz y Hiessl. Fuente: Kotz y Hiessl (2005).

La función de utilidad del suministrador de agua es simplemente proporcionar agua potable. Las reglas de comportamiento del operador de aguas residuales sin embargo son un poco más complejas. Cada año el operador obtiene un volumen de agua a tratar por parte de los agentes consumidores, si ese valor es mayor que el mínimo que necesita para obtener beneficios, identifica que no hay ningún problema y espera al año siguiente para saber el nuevo volumen de agua a tratar. Si por el contrario el volumen no llega al mínimo operativo, el operador aumenta la tasa.

Los consumidores por su parte utilizan agua para diferentes funciones. En el modelo cada uno de los tres agentes consumidores tiene funciones de utilidad en la que influyen factores como el lavado de ropa, fregar y el uso del retrete. Para estas funciones los consumidores disponen de diferentes tecnologías, lavavajillas, lavadoras, etc. El comportamiento de las viviendas varía en cuanto su disposición a la innovación respecto a las tecnologías de ahorro del recurso. Al final de cada año los consumidores reciben una demanda de pago por parte del operador. Si ese valor es menor que el máximo aceptado por cada consumidor no perciben ningún problema. En cambio si el valor es mayor se comunican con los agentes productores de tecnologías para intentar sustituir los dispositivos por unos nuevos que reduzcan el consumo de agua y por tanto el pago al operador (figura 35).



**Figura 35.** Esquema de razonamiento de los agentes consumidores.  
Fuente: Kotz y Hiessl (2005).

La dinámica del sistema puede provocar un efecto de realimentación. El descenso del volumen de consumo por parte de los consumidores puede generar que el volumen de tratamiento se vea reducido. Esto implica la necesidad de mayores tasas para los consumidores para que el operador pueda hacer frente a los gastos de operación. El efecto se repite, mayores gastos de operación implican un incentivo para los consumidores para reducir el consumo utilizando tecnologías más eficientes, que forzarán nuevamente al operador a aumentar sus tasas. El proceso muestra como los consumidores pueden sustituir las tecnologías más antiguas por otras nuevas debido a los ciclos cortos de innovación. Sin embargo debido al efecto negativo que

produce en la red de suministro y tratamiento, el sistema se aleja del funcionamiento eficiente puesto que los ciclos de amortización de las infraestructuras de oferta son mucho más largos.

### 3.3.6 El modelo de consumo con proceso de difusión de Edwards *et al.*

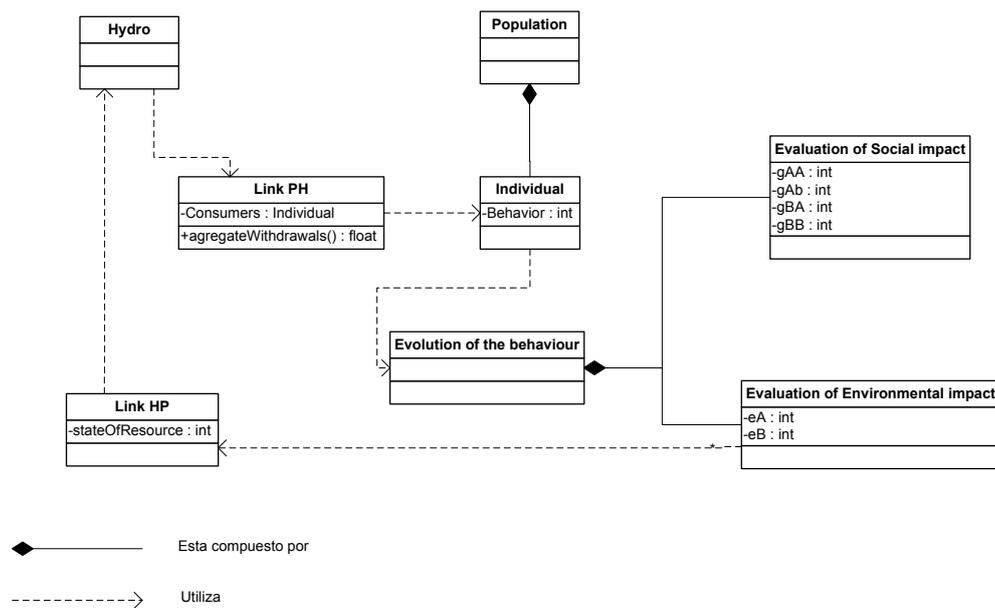
Edwards *et al.* (2005) han desarrollado un interesante modelo en el que utilizan dos versiones de modelos de consumo, uno basado en agentes y otro modelo agregado, simulando un proceso reversible de difusión que depende de la información disponible de recurso.

El estudio resulta interesante por dos motivos, primero por los modelos en sí que describiremos más adelante. Pero también porque es un estudio pionero en el análisis y comparación de modelos basados en agentes y aproximaciones agregadas parcialmente equivalentes. Los modelos agregados presentan la ventaja de tiempos de computación más cortos y mayor facilidad de análisis, por lo que resulta interesante conocer en que condiciones el estudio basado en el individuo aporta algo al estudio y cuando no (Edwards *et al.*, 2003).

El modelo está compuesto por dos submodelos ligados, un modelo muy sencillo que representa la dinámica del recurso de agua, y un modelo social del comportamiento de agua. El consumo de agua altera la cantidad disponible de recurso, lo que a su vez condiciona el comportamiento de los consumidores (ver diagrama UML de la figura 36).

Cada uno de los individuos tiene la posibilidad de elegir entre dos comportamientos respecto al consumo: comportamiento cuidadoso o comportamiento indiferente, que implica multiplicar las necesidades básicas del consumo del recurso por 1 o por 2,5.

Los agentes del modelo son de dos tipos, las viviendas y los granjeros, que tienen necesidades básicas de consumo de agua diferentes representadas por diferentes parámetros sociales.



**Figura 36.** Modelo UML de la relación entre la población y su entorno, el recurso agua. Fuente: Edwards *et al.* (2005)

En el modelo la evolución de los comportamientos depende de la información disponible existente del recurso, que viene definida por un indicador. Edwards *et al.* (2005) estudian la influencia de cinco indicadores diferentes que reflejan diferentes percepciones del estado del recurso.

El primer indicador corresponde a la percepción inmediata del estado del recurso. Teniendo en cuenta que la mayoría de los individuos no tienen acceso a la información de forma directa, se define un segundo indicador que representa la posición relativa respecto a un límite definido de la cantidad de recurso promediada respecto al año. El tercer indicador tiene en cuenta que el propósito de transmitir información a los consumidores no sólo les alerta de la situación sino que también puede evitarla, por lo que define un indicador que intenta anticiparse a las posibles crisis. El cuarto indicador que los autores prueban intenta responder a la pregunta de qué ocurre si la información deja de ser binaria (situación de crisis o no) como en los casos anteriores y se da información sobre el nivel de emergencia. Finalmente, el quinto indicador busca reflejar qué ocurre si la información es promediada en más o menos de 12 meses.

Las diferentes formas de percepción llevan a diferentes patrones de reactividad y por tanto a diferentes evoluciones del recurso.

El submodelo social del modelo basado en agentes<sup>90</sup> se inspira en modelos sociológicos de difusión de la innovación (Granovetter, 1978; Valente, 1995) y sobre todo en el modelo de Young (1999), aunque con algunas diferencias.

El modelo considera  $N$  agentes fijos que tienen que elegir entre dos comportamientos:  $A$  y  $B$ . Cada gente  $i$  tiene una red social asociada  $V(i)$  aleatoria, donde el número de vínculos en la red varía de un individuo a otro.

La elección de adoptar el comportamiento  $A$  ó  $B$  depende de la utilidad que cada comportamiento reporta al individuo. La utilidad  $U_i(A)$  y  $U_i(B)$  del agente  $i$  al elegir el comportamiento  $A$  o el comportamiento  $B$  viene expresado por las siguientes ecuaciones:

$$U_i(A \rightarrow A) = a \cdot V(i, A) + e_A \quad (20)$$

$$U_i(A \rightarrow B) = b \cdot V(i, B) \quad (21)$$

$$U_i(B \rightarrow A) = a' \cdot V(i, A) + e_A \quad (22)$$

$$U_i(B \rightarrow B) = b' \cdot V(i, B) \quad (23)$$

donde  $V(i, A)$  y  $V(i, B)$  son las proporciones de vecinos del agente  $i$  que tienen el comportamiento  $A$  ó  $B$ , y  $a$ ,  $b$ ,  $a'$  y  $b'$  son los parámetros del modelo.

Como se observa en las ecuaciones anteriores, el modelo depende de un término exógeno  $e_A$  que expresa la dependencia con el estado del recurso a través del indicador correspondiente y establece el vínculo con el otro submodelo.

Para poder tener en cuenta la variabilidad individual, la respuesta se modela como estocástica, por lo que un individuo no tomará la decisión  $A$  simplemente porque  $U(A)$  sea mayor que  $U(B)$  sino que la respuesta será probabilística, eso sí, dependiente de los valores de utilidad.

$$P(i \text{ elija } A / A) = \frac{e^{(\beta \cdot U_i(A \rightarrow A))}}{e^{(\beta \cdot U_i(A \rightarrow A))} + e^{(\beta \cdot U_i(A \rightarrow B))}} \quad (24)$$

<sup>90</sup> El modelo agregado no lo describiremos aquí, para mayor información consultar Edwards *et al.* (2005).

$$P(i \text{ elija } B / A) = \frac{e^{(\beta \cdot U_i(A \rightarrow B))}}{e^{(\beta \cdot U_i(A \rightarrow A))} + e^{(\beta \cdot U_i(A \rightarrow B))}} \quad (25)$$

El parámetro  $\beta$  representa el nivel de incertidumbre de la decisión, valores muy altos del parámetro indican decisiones muy deterministas y valores muy bajos valores aleatorios<sup>91</sup>.

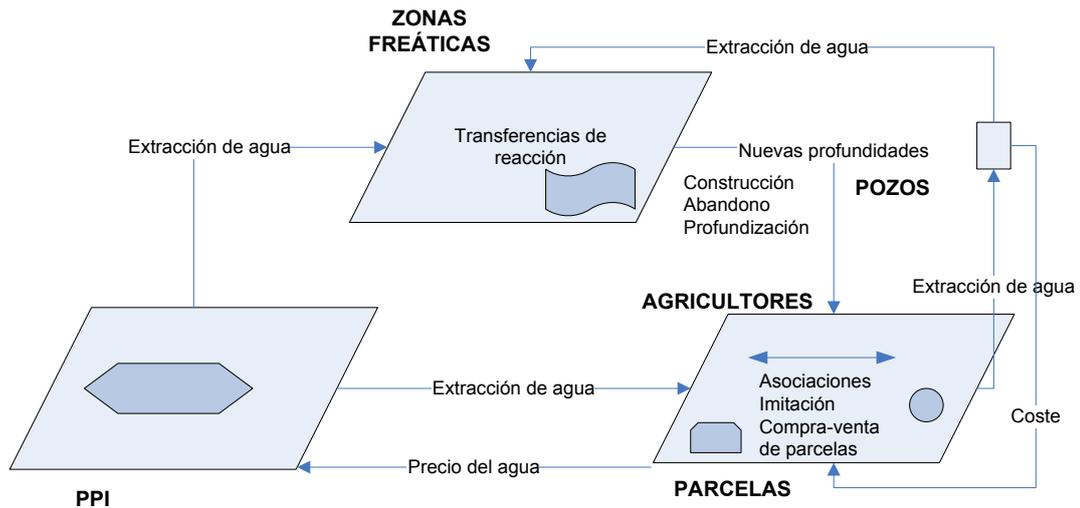
El modelo demuestra la influencia del indicador de comunicación de la información en la respuesta agregada, además resalta que la convergencia entre el modelo agregado parcialmente equivalente y el modelo basado en agentes descrito es dependiente también del indicador.

### 3.3.7 El modelo SINUSE

El modelo SINUSE (*Simulation of interactions between water table and water users*) es un modelo desarrollado por Feuillette *et al.* (2003) con la plataforma de modelado Cormas. El objetivo del modelo es el estudio de los métodos de gestión de la demanda en zonas con zonas freáticas sobreexplotadas. El estudio y el modelo están creados específicamente para el caso de Kairouan, en Túnez, una zona de unas 25.000 hectáreas cuyos acuíferos han decrecido de forma global y continua durante más de veinte años debido a la sobreexplotación por parte de regantes privados.

El modelo se basa en estudios de campo de las estrategias individuales y las interacciones entre los agricultores en la región. A partir de ellos la hipótesis general que se obtuvo fue: todos los agricultores tienen el mismo objetivo de adquirir sistemas de riego para aliviar la aridez climática de la zona. Las estrategias utilizadas para cumplir con este objetivo compartido dependen de las parcelas, las familias, las economías individuales, el acceso a los recursos y la situación de los agricultores vecinos. Puede darse la situación de que si varios vecinos contiguos tienen el mismo problema se pueda llegar a acuerdos para la construcción de pozos. Puesto que el nivel freático es homogéneo en profundidad y estructura, el acceso y el coste de extracción depende de la localización. La presencia de pozos funcionando en el entorno actuará como estimulante social mientras que la presencia de pozos secos actuará como desincentivo.

<sup>91</sup> Las ecuaciones en el caso de que el individuo estuviese teniendo el comportamiento  $B$  en lugar del  $A$  son completamente análogas.



**Figura 37.** Entidades en interacción en el modelo SINUSE. Fuente: Feuillette *et al.* (2003).

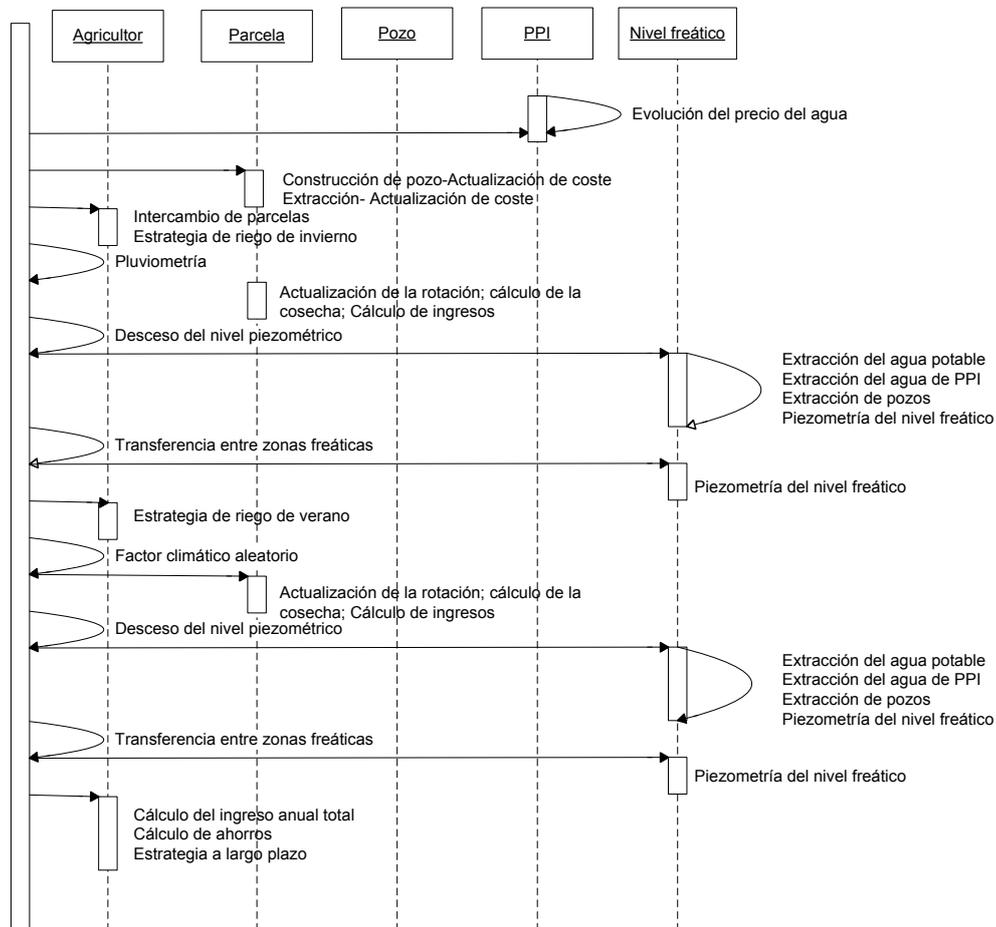
El modelo SINUSE intenta representar de forma simplificada todo este proceso. El tiempo de ejecución del modelo es de un año dividido en dos estaciones. En cada unidad de tiempo entran en funcionamiento tres tipos de entidades implementadas en el modelo (figura 37):

- Las entidades sociales, que representan a los agricultores del modelo, dotadas con reglas de comportamiento basadas en los parámetros que se consideraron influyentes en el estudio de campo, la familia, la parcela, la economía y el acceso al agua.
- Las entidades espaciales tales como las zonas freáticas comunicadas, las parcelas cultivadas, las zonas de riego o los perímetros de riego que distribuyen agua a tarifas fijas<sup>92</sup>.
- Entidades pasivas como pozos que aparecen y desaparecen durante la ejecución del modelo representando su construcción y abandono. Los pozos pueden ser perforados más profundamente, ser funcionales o no funcionales, pueden regar varias parcelas dependiendo de su capacidad. El precio de la construcción depende fundamentalmente de la profundidad necesaria para la extracción de agua. Puesto que puede haber diferentes tipos

<sup>92</sup> La mayoría de los regantes extraen el agua directamente de pozos privados, mientras que una minoría la obtiene mediante sistemas de riego colectivo a partir de perforaciones llamadas perímetros de riego públicos (PPI, *Public Irrigated Perimeters*) gestionadas por instituciones públicas.

de pozos cada agricultor tendrá diferentes niveles de preferencia por cada uno de ellos en función de sus necesidades y riqueza.

Las decisiones fundamentales de los agricultores son la cosecha y la recogida. Estas decisiones afectan a las zonas freáticas de las que extraen agua y a las posibles comunicaciones que pudiese haber entre ellas. Cada zona calcula en cada iteración su nueva profundidad, que puede conducir a pozos secos y por tanto necesidad de mayor profundidad. Los resultados de cada temporada se actualizan y los agricultores en función de la riqueza obtenida, sus ahorros y su situación social puede considerar la construcción de un nuevo pozo, si es necesario con un vecino o comprar o vender sus parcelas (por ejemplo en caso de extrema pobreza). En la figura 38 se representa una ejecución simplificada de un paso de simulación.



**Figura 38.** Diagrama de secuencia UML simplificado del modelo SINUSE. El diagrama representa los principales métodos utilizados durante el transcurso de un paso de ejecución de simulación. Fuente: Feuillette *et al.* (2003).

### 3.3.8 El modelo CATCHSCAPE

Dentro de los usos de la simulación basada en agentes como herramienta de ayuda a la decisión, negociación y elaboración de escenarios, podemos citar el modelo SHADOC (Barreteau y Bousquet, 2000) para evaluar las prácticas de riego en Senegal o el modelo CATCHMENT (Becu *et al.*, 2003) muy basado en el anterior, centrado en el norte de Tailandia.

El modelo CATCHMENT surge a partir del conflicto social surgido en el norte de Tailandia en 1998 a causa de la gestión de los recursos naturales. En ese año miles de granjeros de las zonas bajas del distrito de Chom Thong se manifestaban para demandar la recolocación forzada de casi 20.000 personas de las zonas altas a las que acusaban de causar importantes daños ambientales: deforestación, fuegos en los bosques y la sequía de las escorrentías. Por un lado, a los habitantes de las zonas altas se les acusaba de ser los causantes de la reducción de las escorrentías mediante la deforestación y por otro lado, a los habitantes de las tierras bajas se les acusaba de aumentar sus demandas de agua. Debido a la complejidad de las interacciones existentes, para buscar una solución negociada, se consideró la necesidad de herramientas descriptivas e integradoras que pudiesen servir como nexo de una visión común del proceso y poder llegar al consenso mediante el análisis conjunto de modelos, en este caso el modelo CATCHMENT.

Los agentes cognitivos más importantes definidos en el modelo son los agricultores. Los agricultores gestionan cuatro recursos: agua, trabajo, dinero y suelo. Están caracterizados por el tamaño de su familia y su fuerza de trabajo. El resto de elementos forman el entorno de los agricultores y son modelados como entidades reactivas: las cosechas, el río, el canal de riego y la villa.

La zona espacial es un grid de 45×44, en el que cada celda corresponde a 0,32 hectáreas en el sistema real. Cada celda se caracteriza por la textura del suelo, su profundidad y su inclinación. El uso del suelo que se puede dar a cada zona puede ser triple: arrozal, tierra alta y bosque. La zona de arrozales es una zona de riego compuesta de multitud de terrazas en las que los granjeros cultivan arroz durante la estación húmeda. Las tierras altas están constituidas por zonas en las laderas en la

que se puede cultivar arroz, soja o vegetales y regadas por lluvia natural. El bosque principalmente se utiliza para ceremonias religiosas.

Los granjeros inicialmente pueden ser propietarios de tierras altas y/o zonas de arrozal dependiendo de su estatus. Las zonas de arrozal pertenecen a un canal. Hay seis canales en el sistema, organizados por parejas y agrupados en dos sistemas de riego. Un agente cognitivo, llamado *Manager* gestiona la presa que controla el canal. Cada uno de los sistemas de riego se corresponde con las dos villas, las de los habitantes de las zonas altas y bajas.

La dinámica biofísica se simula a través de un modelo de balance de agua y un modelo hidráulico (Pérez *et al.*, 2002). Inicialmente los granjeros eligen la cosecha que más beneficios les reporta de acuerdo a sus limitaciones de dinero, fuerza de trabajo y disponibilidad de agua. Excepto para el arroz durante la estación húmeda, la elección de la cosecha es un modelo simplificado de programación lineal que tiene en cuenta los costes en la estación y la cantidad de agua y trabajo necesarios. Esta elección de cosecha inicial puede verse modificada durante la simulación. La fecha de siembra puede verse retrasada tan pronto como el dinero y la fuerza de trabajo de los granjeros no se ajuste a los requerimientos de preparación y siembra necesarios. El cultivo del arroz está motivado principalmente por estrategias de seguridad en la alimentación. Así, en el modelo los agricultores se ven forzados a sembrar arroz en el inicio de la estación húmeda para cumplir con las necesidades de alimentación de la familia y durante el período seco han de decidir que parte de su trabajo lo destinan a actividades fuera de la agricultura. Los granjeros también han de decidir sobre la dinámica de la tierra, pueden comprar otras zonas, decidir instalar sistemas de riego en las zonas altas, o bien pueden convertir zonas de bosque en nuevas zonas de cultivo.

Los canales de riego entran en rotación de riegos tan pronto como el canal inferior tiene problemas de escasez de agua. El gestor de las zonas altas está obligado a aceptar la rotación pero tan pronto como se vuelve a la situación normal puede volver a la situación normal, aquí entran en funcionamiento los procesos de negociación.

El modelo ha sido probado con diferentes escenarios dependiente de diferentes perfiles climáticos con un horizonte temporal de 10 años estudiando los problemas de desigualdad que se generan en la región.

### 3.3.9 El proyecto GLOWA-Danube

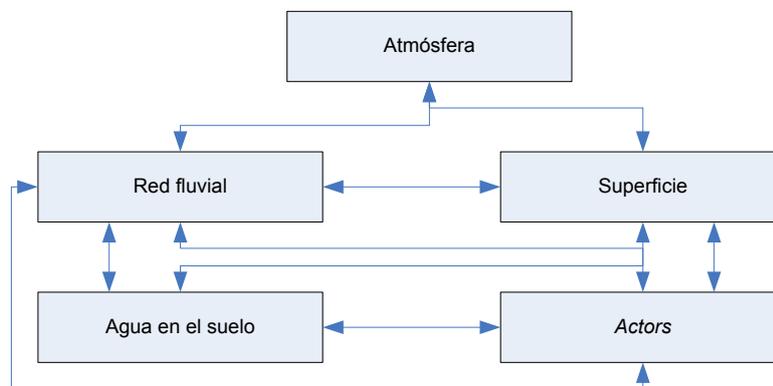
El proyecto GLOWA-Danube representa probablemente uno de los proyectos de gestión integrada de agua más ambiciosos hasta la fecha en el mundo (Barthel *et al.*, 2005). Aunque no es totalmente un modelo basado en agentes integra diferentes actores con influencia para crear una completa herramienta de soporte a la decisión, DANUBIA.

El proyecto está financiado por el Gobierno Federal Alemán, e investiga los cambios a largo plazo en el ciclo del agua de la parte alta de la cuenca del río Danubio a la luz del cambio climático. Puesto que está claro que la predicción de los ciclos del recurso a largo plazo requiere de una aproximación interdisciplinar, se trata de una herramienta completa que combina el trabajo de once institutos de investigación que cubren la mayoría de los aspectos relevantes en el ciclo completo del agua, desde la formación de nubes o los procesos de evapotranspiración al comportamiento de los consumidores de agua, los conflictos de usos de agua, la gestión de transvases o las nuevas tecnologías en la gestión.

El objetivo del proyecto pretende considerar tanto la influencia de los cambios naturales que se producen en el ecosistema como el cambio climático, hasta los cambios en el comportamiento humano que determinan los patrones de utilización del recurso. Para la consecución de un objetivo tan ambicioso, el proyecto ha integrado quince modelos individuales de diversas disciplinas conectados mediante interfaces apropiados para permitir el cálculo paralelo basado en red.

La herramienta DANUBIA se basa por tanto en la ejecución en paralelo de los diferentes modelos mediante una solución informática estrictamente modular y orientada a objetos. En este modelo no pueden tener lugar redundancias en la computación numérica de los procesos físicos, lo que implica que ninguna variable puede ser computada más de una vez en el modelo. Por lo tanto, cada modelo computa sólo aquellos procesos que pertenecen a su núcleo de competencia y envía los resultados al resto de áreas que lo precisen.

En el lado socioeconómico del modelo, el modelo de agua en el suelo intercambia información con los llamados componentes *Actors*, un grupo de modelos centrados en el impacto humano en el ciclo del agua. La cantidad de agua extraída para agua potable y otros usos humanos del agua se considera una condición de contorno para el modelo de agua en el suelo calculada por el modelo de *Actors*. Esta realimentación entre los submodelos de demanda y de oferta determina la arquitectura de la herramienta como se muestra en la figura 39.



**Figura 39.** Conexiones y dependencias entre los principales componentes del modelo. Cada componente puede incluir varios modelos individuales. Fuente: Barthel *et al.* (2005).

### **III APLICACIÓN**



## 4. Modelo integrado de consumo

Aplicación

*Make everything as simple as possible, but not simpler*

Albert Einstein (1879 - 1955)

### Resumen

*En este capítulo describimos el modelo que hemos desarrollado para evaluar el consumo doméstico de agua bajo diferentes escenarios. Se trata de una aproximación híbrida compuesta por un submodelo estadístico de caracterización del comportamiento de consumo de los individuos acoplado con un modelo basado en agentes que integra, a su vez, un modelo de dinámica urbana y dos modelos de difusión.*

*El modelo de dinámica urbana está basado en la hipótesis de estrés-resistencia y lo hemos adaptado para integrarlo con sistemas de información geográfica.*

*Para modelar la difusión de opinión incluimos un modelo de difusión estocástico reversible basado en el modelo de Young (1998) y adaptado por Edwards et al. (2005). Hemos incorporado la posibilidad de mecanismos de endorsement para evaluar el efecto de la heterogeneidad de objetivos, motivaciones e influencias en la población.*

*Integramos también un modelo de difusión tecnológica no reversible. Para ello, adaptamos el modelo de Bass (1969), en ecuaciones diferenciales, para acoplarlo como modelo basado en agentes con la dinámica del modelo general. Hemos efectuado la integración en dos versiones: como modelo desacoplado e independiente, y como modelo acoplado al modelo de difusión de opinión.*





## 4.1 El modelo urbano

### 4.1.1 Modelos urbanos

La influencia del modelo urbano sobre los consumos de agua ha sido comprobada en multitud de ocasiones (Nauges y Thomas, 2000; Arbués *et al.*, 2003; Saurí, 2003; Domene y Saurí, 2003; Parés *et al.*, 2004). Es obvio, por tanto, que modelos que intentan reproducir las dinámicas de consumo de manera explícita y detallada han de incluir los submodelos de dinámica urbana de los que dependen.

Por sí solo, el modelado de dinámicas urbanas y la estructura espacial de las ciudades resulta un problema extremadamente complejo. La multidependencia de diversos factores en la explicación de la ocupación dinámica del espacio se puede demostrar sin más que observar la multitud de teorías diferentes y complementarias aportadas desde campos como la Sociología, la Geografía, la Política o la Economía (Aguilera y Ugalde, 2006).

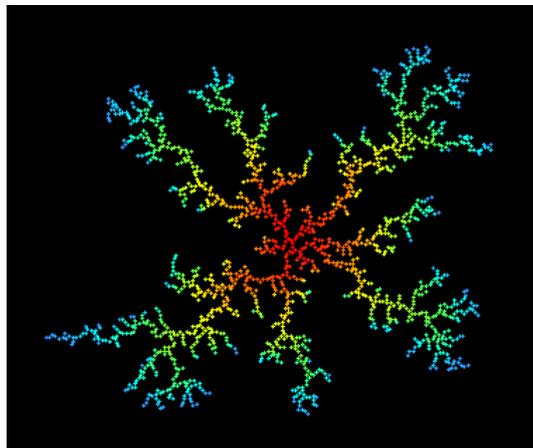
De hecho, aquí surge el primer problema de modelado, ¿qué modelo de fenómenos urbanos hemos de incluir como submodelo relevante en el consumo de agua doméstica? Puesto que la aproximación propuesta en esta tesis es el modelado basado en agentes, parece lógico incluir un modelo de este tipo como submodelo. Sin embargo, al analizar cómo el modelado basado en agentes ha abordado estos fenómenos, es posible identificar al menos tres niveles muy diferentes de abstracción (Benenson y Torrens, 2004).

Un primer nivel de máxima abstracción es el conjunto de modelos generales de fenómenos colectivos de agentes con interpretación urbana. Estos modelos son heredados principalmente de disciplinas como la Física o la Química. Aquí se representan agentes extremadamente sencillos con comportamientos completamente reactivos, no se les dota de ningún nivel cognitivo. Entre estos modelos quizá los más relevantes sean el modelo DLA (*Diffusion-Limited Aggregation*) de Witten y Sander (1981) y el modelo de percolación (Stanley *et al.*, 1999).

El modelo DLA considera partículas elementales que entran en un sistema y se difunden en el espacio hasta que “*se pegan*” al primer objeto fijo que tocan,

momento en el que se convierten en partículas fijas. El modelo ha sido interpretado como agentes que migran en busca de un lugar de asentamiento, y los fractales generados por estos modelos (figura 40) han sido comparados en términos de densidades con mapas de ciudades reales. La densidad de ocupación del espacio respecto a la distancia al centro de la ciudad  $\rho$  en estos modelos decrece de acuerdo a una ley de potencia.

$$\text{Densidad}(\rho) \sim \rho^{D-2} \quad (26)$$

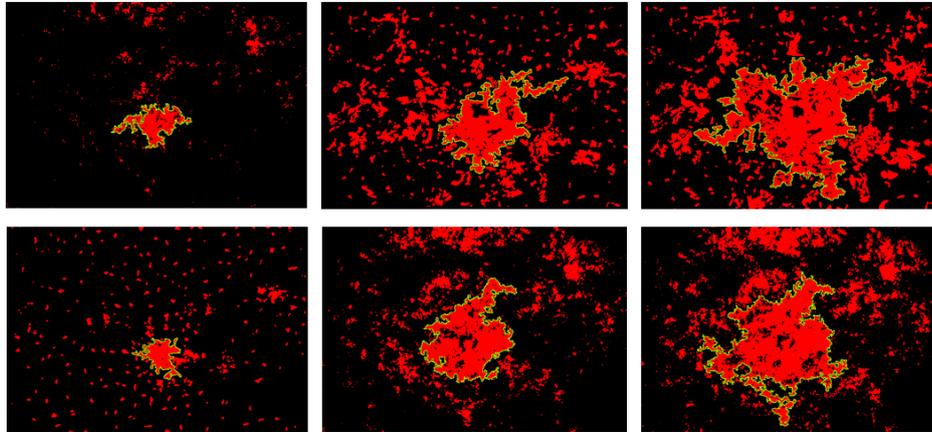


**Figura 40.** Fractal generado mediante el modelo DLA<sup>93</sup>

Aún con más éxito que el modelo DLA está el modelo de percolación, basado en un grid bidimensional. Cada nodo está ocupado o no, de acuerdo con una probabilidad dada  $p$ . Por debajo de un valor crítico  $p < p_c$ , los nodos ocupados forman pequeños clusters. Para un valor crítico  $p = p_c$  se forma un agregado grande que conecta dos lados opuestos de la malla. Cuando una estructura cambia desde una colección de muchas partes desconectadas a un gran conglomerado, se dice que tiene lugar un fenómeno de percolación. Makse *et al.* (1995; 1998) han empleado modelos de este tipo para describir el crecimiento de ciudades como Berlín y Londres (figura 41). En este caso, el decrecimiento de la densidad con la distancia no es una ley de potencia, sino una exponencial.

<sup>93</sup> Imagen generada a partir del applet de Chi-Hang Lam <http://apricot.polyu.edu.hk/~lam/dla/dla.html> [Último acceso 15 de mayo de 2006].

$$\rho(r) \approx \rho_0 e^{-\lambda r} \quad (27)$$



**Figura 41.** Diferencias entre la estructura de la ciudad de Berlín en los años 1875, 1920, 1945 (imágenes de arriba) y la estructura generada por los modelos de percolación altamente correlada de Maksy (imágenes de abajo)<sup>94</sup>

A pesar del indudable interés de este tipo de modelos, para los objetivos de nuestra aplicación no resultan útiles por varias razones. Primero por su elevado nivel de abstracción. En estos modelos se ignoran las capacidades cognitivas de los agentes, la heterogeneidad, los diferentes grupos sociales, la clusterización entre los grupos o los diferentes tipos de viviendas. Segundo, el horizonte temporal de estos modelos es excesivamente grande. Y tercero, nuestro interés no está en la función de densidad de ocupación de las ciudades, sino más bien en las dinámicas internas que se generan dentro de ellas. Por todo ello, el submodelo que deseamos implementar necesita un menor nivel de abstracción.

Un segundo nivel de modelos se corresponde a modelos abstractos que han sido construidos para explorar la dinámica colectiva de un fenómeno urbano. En estos modelos nos movemos respecto a los anteriores desde dinámicas generales a contextos inherentemente urbanos, con explicaciones socioeconómicas y de un mayor nivel cognitivo. Quizá el ejemplo paradigmático de este tipo de modelos sea el modelo de Schelling-Sakoda<sup>95</sup> (Schelling, 1971; Sakoda, 1971) que muestra como determinadas reglas sociales locales pueden generar un proceso macroscópico de

<sup>94</sup> Composición a partir de <http://lisci1.engr.cuny.cuny.edu/~makse/urban.html>.

<sup>95</sup> Este modelo se conoce de forma mucho más popular simplemente como modelo de Schelling, si bien Sakoda lo había desarrollado con anterioridad en el año 1949 aunque no lo publicó hasta 1971 (Hegselmann y Flache, 1998). Aunque ambos modelos son muy similares, basados ambos en tableros de ajedrez, difieren en la forma en la que calculan la disonancia y las reglas de reacción (Benenson, 2004).

segregación. Existen muchos más modelos en este nivel aparte del de Schelling, desde generalizaciones de modelos de segregación, hasta modelos más sofisticados.

El tercer nivel de abstracción se correspondería a las aplicaciones de modelado basado en agentes destinadas al estudio de situaciones urbanas reales. A pesar del avance de los SIG como herramientas base para aplicaciones con muy alto nivel de detalle, lo cierto es que hoy en día todavía este tipo de ejercicio es infrecuente (ver por ejemplo en Benenson y Torrens (2004) un interesante recorrido por las aplicaciones más interesantes).

Una de las aplicaciones de dinámicas urbanas en sistemas reales es el modelo de Yaffo-Tel Aviv desarrollado por Benenson *et al.* (2002; 2004). En este modelo, a partir de la hipótesis de estrés-resistencia (Wolpert, 1965; Speare, 1974) como motor dinámico, los autores explican los movimientos y los fenómenos de segregación originados en la ciudad entre judíos, musulmanes y cristianos. El modelo es por supuesto muy específico de la región, pero es un interesante ejemplo de adaptación del metamodelo de segundo nivel de abstracción propuesto también por Benenson (1998; 1999) y que probablemente constituye en la actualidad el modelo más relevante de dinámicas urbanas basadas en agentes. El modelo que hemos elegido como submodelo urbano está precisamente basado en el modelo original de Benenson, pero adaptado a la Región Metropolitana de Valladolid.

#### **4.1.2 Modelo general. El modelo original de Benenson**

El modelo de Benenson (1998; 1999) opera en una estructura de dos capas. La primera capa, la infraestructura de las viviendas de las ciudades, representa las propiedades de las viviendas urbanas. La segunda capa, la capa de agentes, representa ciudadanos individuales de los que se refleja su movimiento migratorio. A los agentes se les dota de la posibilidad de estimar el estado de la ciudad en sus dos capas y de tomar decisiones de acuerdo a información que obtienen en tres niveles de organización urbana:

1. El individuo.
2. El local, refiriéndose a las características de la vecindad y los estados de los vecinos.

3. El global, referida al estado de la ciudad completa.

### *El submodelo de infraestructuras de las viviendas*

En el modelo se define una superficie reticular cuadrada de  $M \times M$  celdas, cada una simbolizando una vivienda. Cada casa  $H_{ij}$ ,  $i, j \in [1, M]$ , puede estar ocupada por un individuo o permanecer vacía. Se define  $U(H_{ij})$  vecindad de una casa  $H_{ij}$  como el cuadrado  $5 \times 5$  de celdas centradas en  $H_{ij}$ . El valor de cada vivienda  $V_{ij}$  es diferente y cambia en cada período. Cuando un agente  $A$  ocupa una vivienda  $H_{ij}$ , el valor de la vivienda  $V_{ij}$  se actualiza de acuerdo a su estatus económico  $S_A$ , que definiremos más adelante, y el valor medio de su vecindad de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$V_{ij}^{t+1} = S_A^t + (N(U(H_{ij})) - 1) \cdot \langle V_{ij}^t \rangle_U / N(U(H_{ij})) \quad (28)$$

donde  $\langle V_{ij}^t \rangle_U$  es el promedio del valor de las viviendas en la vecindad  $U(H_{ij})$  excluyendo a  $H_{ij}$ , y  $N(U(H_{ij}))$  es el número de viviendas en  $U(H_{ij})$ . O expresado de otra forma,

$$\langle V_{ij}^t \rangle_U \equiv \sum_{(i', j') \in \bar{U}_{ij}} V_{i'j'}^t / (N(U(H_{ij})) - 1) \quad (29)$$

donde  $\bar{U}_{ij} = U(H_{ij}) - \{H_{ij}\}$

Cuando un agente abandona una vivienda  $H_{ij}$ , y esta permanece desocupada, su valor  $V_{ij}$  decrece a una tasa constante,  $d$ , que se considera un parámetro exógeno del modelo:

$$V_{ij}^{t+1} = d \cdot V_{ij}^t \quad (30)$$

### *Dinámica de las propiedades económicas de los agentes*

Las características económicas de un agente  $A$  son su estado económico  $S_A^t$ , y la tasa de crecimiento del estado económico  $R_A$ . La dinámica del estado económico de un agente  $A$  que ocupa una casa  $H_{ij}$  queda definida por la siguiente ecuación:

$$S_A^{t+1} = (R_A \cdot S_A^t \cdot (1 - S_A^t) - m \cdot V_H^t) / \langle V^t \rangle_{city} \quad (31)$$

donde  $R_A$  no depende del tiempo,  $m \cdot V_H^t$  representa un pago por ocupar una determinada vivienda  $H$  y  $\langle V^t \rangle_{city} \equiv \frac{1}{M^2} \cdot \sum_{ij=1}^m V_{ij}^t$  es el promedio del valor de las viviendas en la ciudad.

La información económica local  $P_{ij}^t$  disponible para el agente  $A$ , que ocupa la vivienda  $H_{ij}$ , viene dada por el estado económico de los vecinos de  $A$  y los valores de sus casas en  $U(H_{ij})$ .  $P_{ij}^t$  se define como el promedio del estado económico de los vecinos que ocupan las viviendas en  $U(H_{ij})$  más los valores de aquellas viviendas en esa vecindad que están desocupadas:

$$P_{ij}^t = \left( \sum_{B \in \bar{U}_{ij}^o} S_B^t + \sum_{(i',j') \in \bar{U}_{ij} - \bar{U}_{ij}^o} V_{i'j'}^t \right) / (N(U(H_{ij})) - 1) \quad (32)$$

donde  $B$  es un vecino de  $A$  y  $\bar{U}_{ij}^o$  es el conjunto de viviendas en la vecindad  $H_{ij}$  que están ocupadas.

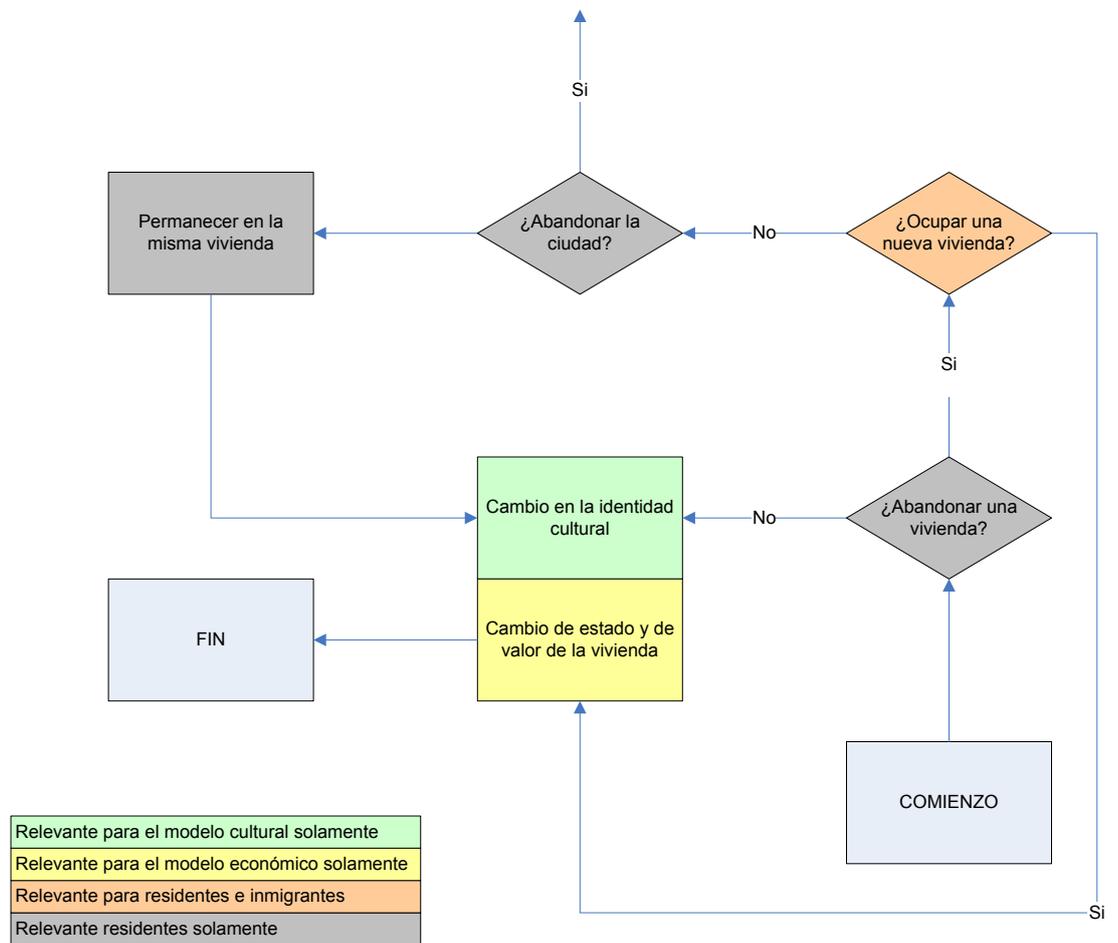
La decisión de moverse de un agente  $A$  depende del valor absoluto de la diferencia  $SD$ , entre el estado de  $A$ ,  $S_A^t$ , y la información económica local  $P^t$  disponible para  $A$ , formalmente:

$$SD_A^t = \left| S_A^t - P^t \right| \quad (33)$$

La variable  $SD_A^t$  se interpreta como la tensión económica local del agente  $A$  en la localización  $H_{ij}$  en el instante de tiempo  $t$ . El valor medio del valor de las viviendas a lo largo de la ciudad da la información global disponible a cada uno de los individuos en el instante  $t$ .

*Dinámica de las propiedades culturales de los agentes*

Para la toma de decisiones de los agentes, Benenson les dota no sólo de características económicas sino también de un “código cultural” individual que define sus posibilidades de comportamiento residencial y en las interacciones con otros agentes (en la figura 42 se muestra el algoritmo de decisión de un agente en el metamodelo de Benenson). Para ello, utilizan el genotipo individual de cada agente como un vector binario multidimensional, cuyos valores pueden cambiar durante las interacciones individuales, locales o globales (Portugali y Benenson, 1997).



**Figura 42.** Decisiones y consecuencias de los diferentes tipos de agentes en los submodelos de decisión económica y cultural de Benenson (1998).

Formalmente, la identidad cultural de un individuo  $A$  se describe por un vector  $K$ -dimensional booleano  $C_A = (c_{A,1}, \dots, c_{A,K})$  donde  $c_{A,k} \in \{0,1\}$  y  $k = 1, \dots, K$ . Nótese que bajo esta definición existirían  $2^K$  identidades culturales diferentes, considerando como dos identidades culturales diferentes aquellas que corresponden a

dos vectores  $C_A$  y  $C_B$  que al menos difieren en un componente. Y para cuantificar esa diferencia se establece una magnitud de distancia medida como la fracción de componentes diferentes entre las  $K$  componentes del código cultural.

$$\rho(C_A, C_B) = \frac{\sum_k |C_{Ak} - C_{Bk}|}{K} \quad (34)$$

Este concepto se relaciona con la noción de disonancia cognitiva espacial local de un agente (Portugali y Benenson, 1995; Haken y Portugali, 1995). De hecho, en este modelo se define disonancia cognitiva local espacial  $CD_A$  de un agente  $A$  que ocupa una vivienda  $H_{ij}$  como la media de las diferencias entre la identidad de  $A$  y las identidades de su vecindad:

$$CD_A^t = \frac{\sum_{B \in \bar{U}_{ij}^o} \rho(C_A^t, C_B^t)}{(N^{ot}(U(H_{ij})) - 1)} \quad (35)$$

donde  $(N^{ot}(U(H_{ij}))$  es el número de viviendas ocupadas en  $U(H_{ij})$  en el instante de tiempo  $t$ .

Por otra parte, la influencia de la estructura global de la ciudad en el comportamiento residencial de un individuo aumenta a medida que se produce un aumento en los niveles de segregación residencial. La información cultural global  $GD_A$  disponible para un agente  $A$  se determina mediante el valor del índice de segregación de Lieberson  $LS_X$  (Lieberson, 1981), expresado como la probabilidad de que un miembro de un grupo culturalmente homogéneo  $X$  localizado en una vivienda  $H_{ij}$  se encuentre un miembro de su propio grupo en  $U(H_{ij})$ <sup>96</sup>. Formalmente, para agentes de identidad  $C_A$ ,

$$GD_A^t = \max \{0, (LS_A^t - LS^*)\} / (1 - LS^*) \quad (36)$$

<sup>96</sup> Visualmente, valores de  $LS_X$  por debajo de 0.3 ó 0.4 se corresponden a distribuciones aleatorias de los agentes del grupo  $X$  mientras que valores por encima de 0.7 ó 0.8 corresponden a dominios dominados casi exclusivamente por miembros de ese grupo (Benenson, 1998).

donde  $LS^*$  es el valor del índice de Lieberman que corresponde al modelo visualmente segregado (por debajo se establece un valor de 0.4).

La información local y global de la identidad cultural influye de diferentes maneras. Una disonancia cognitiva  $CD_A^t$  alta, fuerza al agente  $A$  a cambiar su identidad cultural. Por contraste, un alto nivel de segregación  $GD_A^t$  de agentes que poseen una identidad  $C_A$  fuerzan a  $A$  a preservar su identidad, a pesar de que no se encuentren necesariamente cerca de la localización de  $A$ . La sensibilidad de un agente  $A$  a la disonancia cultural cognitiva  $L_A$  y a la segregación global  $G_A$ , donde  $L_A, G_A \in [0,1]$ , son propiedades inherentes a  $A$  e independientes de  $t$ .

### 4.1.3 Modelo específico. Adaptación del modelo de Benenson

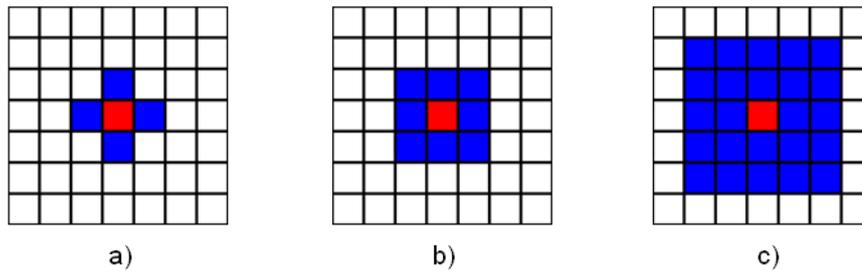
#### *De autómatas regulares a diagramas de Voronoi sobre SIG*

El modelo de Benenson se basa fuertemente en un tipo de modelos bottom-up utilizados en las ciencias sociales: en los modelos de autómatas celulares que ya comentamos. La razón más importante de su uso es que los autómatas celulares se pueden concebir como sistemas multiagente basados en estructuras de interacción local (Flache y Hegselmann, 2001). Sin embargo, muchos científicos consideran esta aproximación excesivamente abstracta y demasiado idealizada para modelar procesos sociales realistas. Las características que definen un autómata celular: celdas situadas en un grid regular de dimensión  $D$ , un conjunto finito de estados de cada celda, tiempo discreto, cambios en las celdas de acuerdo a reglas locales, mismas reglas de transición en las celdas (Hegselmann y Flache, 1998), etc., pueden ser consideradas excesivamente simplistas y de difícil generalización e interpretación en sistemas reales.

Quizá una de las hipótesis más criticables de los sistemas basados en autómatas celulares es la utilización de estructuras regulares. En particular, la aproximación habitual es la utilización de grids rectangulares<sup>97</sup> (figura 43), que implícitamente implican homogeneidad geográfica en todos los puntos del espacio.

<sup>97</sup> También existen otros tipos de vecindades regulares hexagonales, triangulares, etc. (Hegselmann y Flache, 1998; Wolfram, 2002).

Esta hipótesis no parece excesivamente apropiada en los casos en los que el objetivo del modelo es precisamente captar la heterogeneidad espacial.



**Figura 43.** La vecindad se refiere al conjunto de celdas con las que otra celda interactúa. Existen dos tipos de vecindades rectangulares clásicas, la vecindad de Von Neumann y la vecindad de Moore. En la vecindad de Von Neumann a), cada celda interactúa con sus cuatro vecinos más cercanos al norte, sur, este y oeste. En la vecindad de Moore b) también se incluyen las celdas diagonales más cercanas. La figura c) muestra una vecindad de Moore extendida. La principal diferencia topológica entre estos tipos de vecindades es la transitividad.

Una aproximación frecuente para modelar estructuras reticulares irregulares es la utilización de diagramas de Voronoi<sup>98</sup> (O'Sullivan, 2001; Flache y Hegselmann, 2001; Halls *et al.*, 2001; Benenson *et al.*, 2002) o la triangulación de Delaunay, su problema dual asociado. La triangulación de Delaunay fue introducida inicialmente por Voronoi (1908) y extendida por Delaunay (1934) por medio de métodos de circunferencias vacías y actualmente cuenta con multitud de aplicaciones.

De manera formal estos conceptos se definen como sigue<sup>99</sup>:

Un subconjunto de puntos  $A$  en el plano<sup>100</sup> es **convexo** si para todo par de puntos  $p, q \in A$  el segmento  $pq$  está también contenido en  $A$ . La **envolvente convexa** de un conjunto  $A$  es el menor conjunto convexo conteniendo a  $A$ .

Sea  $S = \{p_1, \dots, p_n\}$  un conjunto de  $n$  puntos en el plano. Se define **celda de Voronoi**  $V(p_i)$  de un punto  $p_i \in S$  como:

<sup>98</sup> Dependiendo del contexto, al diagrama de Voronoi se le conoce como subdivisión de Dirichlet, subdivisión en regiones de Thiessen o polígonos de Thiessen.

<sup>99</sup> Se pueden encontrar referencias que cubren de forma mucho más extensa y rigurosa el tratamiento que hacemos aquí de estos conceptos. Por ejemplo libros de geometría computacional como Berg *et al.* (2000) o en libros monográficos sobre diagramas de Voronoi como Okabe *et al.* (1992).

<sup>100</sup> Las definiciones que hacen referencia a los conceptos que utilizamos en esta tesis son el caso particular para el plano de la generalización en  $\mathbb{R}^d$ .

$$V(p_i) \equiv \{q \in \mathbb{R}^2 : d(p_i, q) \leq d(p_j, q), i \neq j\} \quad (37)$$

donde  $d(p, q)$  denota la distancia euclídea ordinaria<sup>101</sup> entre los puntos  $p$  y  $q$ . Se define **diagrama de Voronoi**  $V(S)$  de  $S$  a la familia de subconjuntos de  $\mathbb{R}^2$  consistentes en las celdas de Voronoi y en sus intersecciones. El contorno de las celdas de Voronoi consiste en los lados de Voronoi y los vértices de Voronoi. Un punto  $q \in \mathbb{R}^2$  pertenece a un **lado de Voronoi**  $e(p_i, p_j)$  si  $d(q, p_i) = d(q, p_j)$  y  $d(q, p_k) \geq d(q, p_i)$  si  $k \neq i, j$

Un punto  $q \in \mathbb{R}^2$  es un **vértice de Voronoi**  $v$ , si pertenece al menos a dos lados de Voronoi.

La idea intuitiva que encierra esta definición formal es la construcción de un diagrama teselado a partir de un conjunto de puntos situados en el plano y representativos de las celdas que se quieren construir. A estos puntos también se les conoce como puntos generadores y corresponden al conjunto  $S$ . De acuerdo a la definición de la ecuación (37), entonces una celda de Voronoi de un generador  $p_i$  es el área del plano que contiene todos los puntos que están más cerca (en distancia euclídea) del generador  $p_i$  que de otro cualquier generador  $p_j$  (figura 44).

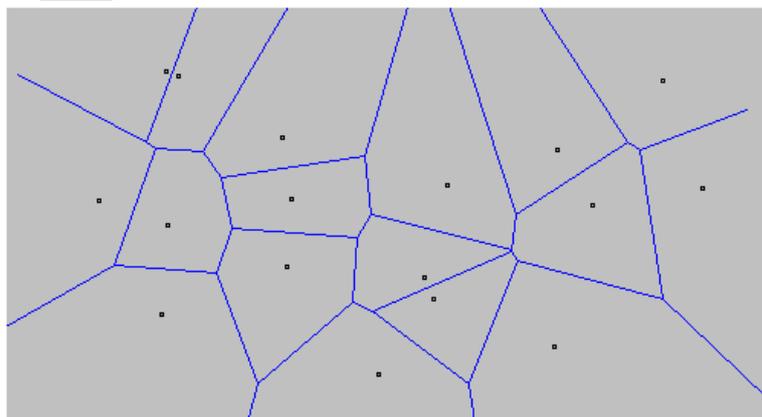
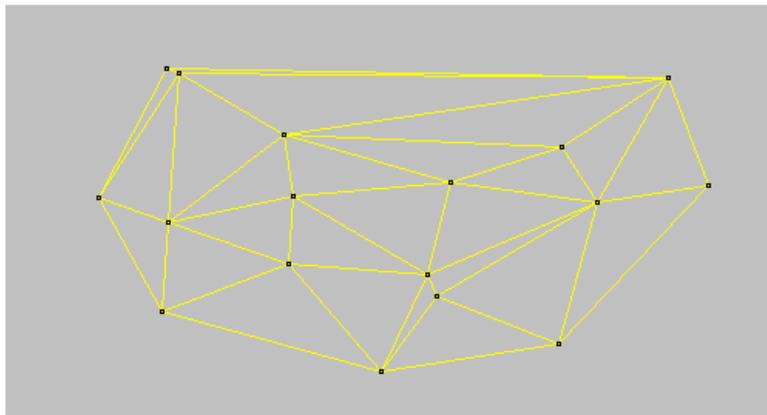


Figura 44. Diagrama de Voronoi y puntos generadores<sup>102</sup>

<sup>101</sup> Se pueden utilizar diferentes funciones de distancia entre puntos para definir diferentes variaciones de diagramas de Voronoi.

<sup>102</sup> Imagen generada a partir del applet de Zhiyuan Zhao y Alan Saalfeld <http://www.bath.ac.uk/~enscjb/voronoi/tri.html> [Último acceso 25 de julio de 2006].

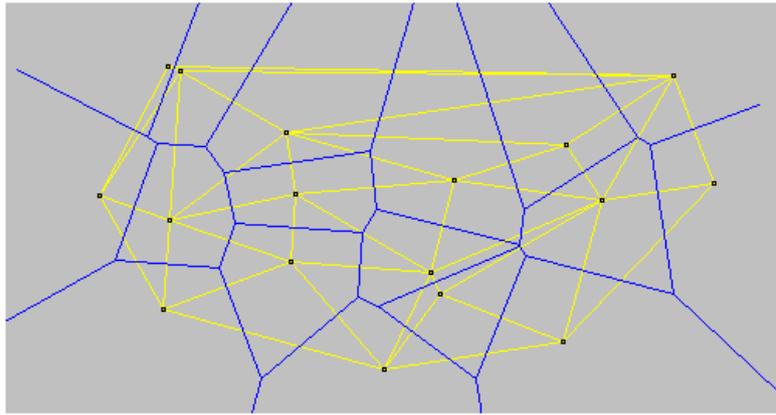
Sea  $S = \{p_1, \dots, p_n\}$  un conjunto de  $n$  puntos en el plano. Se define **celda de Delaunay** de  $v$  a la envolvente convexa del conjunto de vecinos más cercanos ( $\in S$ ) a un vértice de Voronoi  $v$ . Se denomina **grafo de Delaunay** o **triangulación de Delaunay** de  $S$  a la partición de la envolvente convexa de  $S$  en las celdas de Delaunay correspondientes a los vértices de Voronoi junto con sus lados (figura 45).



**Figura 45.** Grafo de Delaunay del mismo conjunto de puntos generadores que la figura anterior.

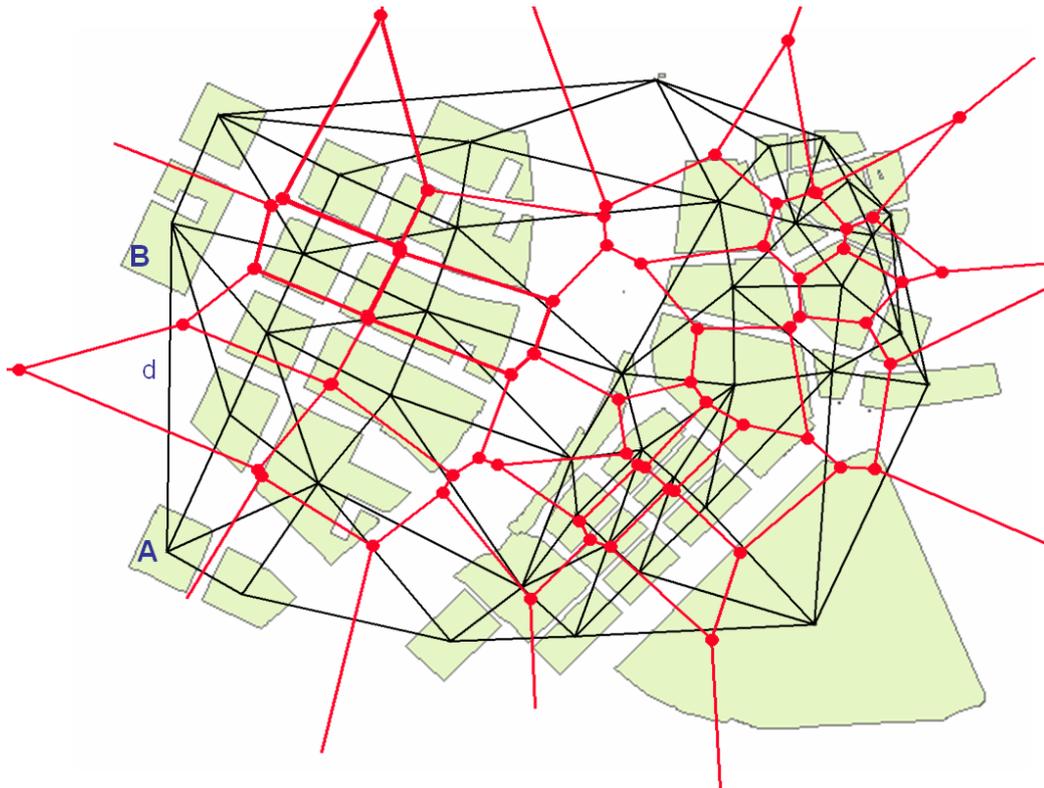
El grafo de Delaunay en general no es una triangulación a menos que los puntos de  $S$  se encuentren en una posición no degenerada, es decir que no exista ningún punto cuyo conjunto de vecinos tengan más de tres elementos.

La triangulación de Delaunay  $D(S)$  es el dual del diagrama de Voronoi  $V(S)$  en el sentido de que los vértices del diagrama de Voronoi corresponden a los lados de la triangulación de Delaunay, mientras que las celdas de Voronoi se corresponden con los vértices de  $D(S)$  (figura 46).



**Figura 46.** Imagen en la que se superponen el grafo de Delaunay y el diagrama de Voronoi. La triangulación de Delaunay es el dual del diagrama del Voronoi.

En nuestro modelo partimos de un modelo definido como un autómata regular como es el modelo de Benenson, sin embargo realizamos una adaptación del modelo mediante los conceptos asociados a la teselación de Voronoi. La estructura geográfica del modelo de esta tesis está importada de un SIG. Para evitar tener que hacer la hipótesis de regularidad, consideramos los puntos generadores de las celdas de Voronoi a los centroides de los bloques de viviendas (manzanas) importados del sistema. Diremos que dos manzanas son vecinas si comparten un lado de Voronoi. Además exigiremos una segunda condición, los centroides han de estar a una distancia menor de un determinado umbral máximo para que se les pueda considerar vecinos. Esta condición adicional se incluye para evitar efectos esquina de cierre de grafo, que pueden situar como vecinos a viviendas espacialmente muy lejanas (figura 47).



**Figura 47.** La figura muestra en verde la superficie que representa un conjunto dado de bloques de viviendas importadas de un SIG. Las líneas negras representan la triangulación asociada de Delaunay, donde los nodos son los centroides de las manzanas y los puntos generadores de la partición de Voronoi. Las celdas de Voronoi resultantes se representan con la malla roja. A pesar de que los Bloques A y B serían considerados vecinos puesto que sus celdas asociadas comparten un lado de Voronoi, si la distancia  $d$  que se para sus centros es superior a un cierto umbral no se consideran vecinos<sup>103</sup>.

### *Estructura de la dinámica del submodelo urbano*

La adaptación del modelo que hemos realizado en esta tesis, igual que el modelo original, se basa en la hipótesis de estrés-resistencia. Esto implica asumir que la probabilidad de cambiar de vivienda aumenta y la de ocupar otra nueva decrece con el aumento de la disonancia residencial de los agentes. Al igual que en el modelo original, la disonancia es una variable estocástica<sup>104</sup> dependiente de las propiedades de los agentes y su contexto.

<sup>103</sup> En el modelo implementado se ha considerado como distancia umbral 300 metros. Este efecto puede ser muy importante y resulta necesaria la condición adicional. En el anexo C de este documento se puede ver la triangulación de Delaunay completa de la ciudad de Valladolid sin depurar por distancias entre centroides, que da como resultado vecinos alejados entre sí varios kilómetros para cerrar la superficie convexa.

<sup>104</sup> Conviene tener en cuenta que dos agentes en un mismo contexto y con las mismas propiedades pueden tener un nivel de disonancia residencial diferente.

Puesto que el modelo adaptado no depende sólo de variables económicas, sino que se concibe como dependiente de varios factores de influencia, en nuestro modelo consideramos independientemente la disonancia individual de cada factor y agregamos cada una de ellas para obtener la disonancia residencial total, siguiendo la adaptación de Benenson de su propio modelo al caso de Yaffo (Benenson *et al.*, 2002).

La disonancia residencial parcial de un agente  $A$  que habita una vivienda  $H$  en el vecindario  $U(H)$  dado el factor  $f$ ,  $D_f(A,U(H))$ , se calcula dependiendo del factor.

En los casos de valoración del factor en términos cualitativos, para reflejar la aleatoriedad de la reacción de disonancia del agente en un determinado factor, se considera como una variable normal, truncada en  $[0,1]$  con la media dada en la tabla 6 (parametrizable) y la desviación típica  $SD$  dada por la siguiente ecuación:

$$SD = \delta[D(1-D)]^{1/2} \quad (38)$$

**Tabla 6**

Parámetro del modelo	Evaluación cualitativa del nivel de disonancia	Valor representativo de la disonancia, D	Desviación típica (Para un $\delta = 0.05$ )
Zero	Cero	0,00	0,0000
Very Low	Muy Bajo	0,05	0,0109
Low	Bajo	0,20	0,0200
Intermediate	Intermedio	0,50	0,0250
High	Alto	0,80	0,0200
Very High	Muy Alto	0,95	0,0109

En el modelo específico de esta tesis cada agente calcula tres factores de disonancia. Dos de ellos son factores de disonancia agente-vecindad y el tercer factor es un factor de disonancia agente-vivienda<sup>105</sup>.

En la infraestructura definida en nuestro modelo se incluyen dos tipos de entidades: los bloques o manzanas, la entidad principal importada del SIG y que define las relaciones topológicas del modelo para las teselaciones, y un segundo tipo

<sup>105</sup> Siendo muy rigurosos, puesto que el valor de la vivienda calculada mediante la actualización de Benenson depende a su vez de los valores de la vecindad y de los agentes que la habitan, en realidad este valor de disonancia también depende indirectamente de la vecindad.

de entidades que son las viviendas contenidas en las manzanas. Una manzana puede tener una o más viviendas. Cada agente (familia) vive en una vivienda a su vez contenida en un bloque. Definimos vecindad de una vivienda como el resto de viviendas del bloque que la contiene, más el conjunto de las viviendas de los bloques incluidos en la vecindad de Voronoi (según el algoritmo anteriormente especificado) que definen los centroides de las manzanas importadas.

El primer factor de disonancia considerado es la nacionalidad de los agentes. En una primera aproximación se ha considerado que la nacionalidad de un agente puede dividirse en dos grupos, nacionalidad española y nacionalidad extranjera. Para este factor definimos una matriz de disonancias que se considerará como parámetro de definición en los escenarios que se analicen con el modelo. Esta matriz define la disonancia que tendría un agente de una nacionalidad dada si se encontrase en una vecindad homogénea, en la que la totalidad de los vecinos tienen la misma nacionalidad.

$$D_{Nationality} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & Zero & Intermediate \\ 0 & Low & Zero \end{pmatrix} \quad (39)$$

Por ejemplo en la matriz anterior, si consideramos la primera fila como la disonancia percibida por un agente de nacionalidad española (1) y la segunda como la percibida por un agente de nacionalidad extranjera (0), la matriz expresa que un agente español en una vecindad homogénea española no siente ninguna disonancia, un agente extranjero en una vecindad homogénea extranjera no tiene tampoco ningún valor de disonancia (elementos de la diagonal principal de la matriz). Un agente español en una vecindad homogénea extranjera percibiría una disonancia intermedia y un agente extranjero en una vecindad homogénea española tendría una disonancia baja.

Cuando se trata de una vecindad heterogénea, el cálculo de la disonancia se generaliza mediante la media ponderada por cada una de las fracciones, de acuerdo a la ecuación siguiente ecuación:

$$D_f(A_i, U(H)) = \sum_j D_f(A_i, U(H)_j) \cdot F_j \quad (40)$$

En el caso concreto del factor nacionalidad, simplemente es la particularización para dos factores de la ecuación general, asumiendo que la disonancia entre un agente y una vivienda vacía (y por tanto sin nacionalidad) es cero.

El segundo factor de disonancia considerado es el nivel de estudios. Se trata de un factor de disonancia que se calcula de forma completamente análoga al anterior, pero con tres posibles valores. Un agente en el modelo puede tener tres niveles de estudios considerados: analfabeto (0), nada (1) y bachillerato superior (2). Para este factor, al igual que en el caso de la nacionalidad, se puede definir una matriz de disonancia de un agente con cada nivel en una vecindad homogénea de un determinado valor.

$$D_{Studies} = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 2 & Zero & Low & Intermediate \\ 1 & VeryLow & Zero & Low \\ 0 & Low & VeryLow & Zero \end{pmatrix} \quad (41)$$

De forma análoga al factor de disonancia de nacionalidad, se generaliza la disonancia en vecindades heterogéneas mediante la media ponderada de las disonancias de las proporciones de la vecindad.

El tercer factor de disonancia que computamos en el modelo es el nivel de riqueza del agente, considerada como una variable real entre 0 y 4, y el valor de la vivienda, también considerada como un número real entre 0 y 4 y actualizada en cada iteración en el modelo mediante el algoritmo del metamodelo de Benenson (1998).

De forma parecida al caso anterior, definimos una matriz de disonancias entre la riqueza del agente y el valor de la vivienda. La matriz muestra la disonancia entre agentes con riqueza exactamente igual a un valor entero entre 0 y 4, y viviendas valoradas también exactamente con un valor entero entre 0 y 4. Nótese que esto no es

un caso general, puesto el valor de la vivienda se actualiza en cada iteración y típicamente su resultado no será un número entero<sup>106</sup>.

$$D_{\text{Wealth/Value}} = \begin{pmatrix} & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 \\ 4 & \text{Zero} & \text{VeryLow} & \text{Low} & \text{Intermediate} & \text{High} \\ 3 & \text{VeryLow} & \text{Zero} & \text{VeryLow} & \text{Low} & \text{Intermediate} \\ 2 & \text{Low} & \text{VeryLow} & \text{Zero} & \text{VeryLow} & \text{Low} \\ 1 & \text{Intermediate} & \text{Low} & \text{VeryLow} & \text{Zero} & \text{VeryLow} \\ 0 & \text{High} & \text{Intermediate} & \text{Low} & \text{VeryLow} & \text{Zero} \end{pmatrix}$$

Para calcular la disonancia general entre una riqueza cualquiera de un agente y un valor también cualquiera de una vivienda, hemos considerado un algoritmo de doble interpolación lineal. Básicamente el algoritmo hace la media entre los cuatro valores de disonancia más próximos a los valores reales de riqueza y valor de la vivienda, pero ponderándolos por la distancia relativa a cada uno de los vértices del cuadrado que formarían en la matriz.

Si denotamos  $w_i$  al valor de riqueza del agente  $i$ ,  $v_j$  al valor de la vivienda  $j$ ,  $w_i^+$  al entero inmediatamente superior de la riqueza del agente  $i$ ,  $w_i^-$  al entero inmediatamente inferior a la riqueza del agente  $i$ ,  $v_j^+$  al entero inmediatamente superior del valor de la vivienda  $j$  y  $v_j^-$  al entero inmediatamente inferior del valor de la vivienda  $j$ , entonces la disonancia del factor vivienda se puede calcular como:

$$\begin{aligned} D_{\text{Wealth/Value}}(w_i, v_j) &= D_{w_i^+ v_j^+} \cdot (w_i^+ - w_i) \cdot (v_j^+ - v_j) \\ &+ D_{w_i^+ v_j^-} \cdot (w_i^+ - w_i) \cdot (v_j - v_j^-) + D_{w_i^- v_j^+} \cdot (w_i - w_i^-) \cdot (v_j^+ - v_j) \\ &+ D_{w_i^- v_j^-} \cdot (w_i - w_i^-) \cdot (v_j - v_j^-) \end{aligned} \quad (42)$$

donde los valores de  $D_{ij}$  son los coeficientes asociados de la matriz de disonancias que hemos definido.

<sup>106</sup> Podría interpretarse estos valores como variables cualitativas de riqueza y valor desde el rango muy bajo a muy alto.

En un segundo paso y una vez conocido el valor de la disonancia de cada uno de los factores  $f_1, f_2, \dots, f_n$  se combina cada uno de esos valores para calcular la disonancia total del agente  $D(A, U(H))$  como<sup>107</sup>:

$$D(A, U(H)) = 1 - \prod_i [1 - \alpha_i D_{f_i}(A, U(H))] \quad (43)$$

donde  $\alpha_i \in [0, 1]$  refleja el peso de  $f_i$  en la disonancia total.

El algoritmo de elección residencial basado en la disonancia sigue un proceso en tres etapas.

En la etapa inicial, se seleccionan los posibles migrantes, los candidatos a moverse de residencia. Intuitivamente se da la opción a cada uno de los agentes  $A$  residentes en la ciudad a cambiar de residencia. Formalmente este proceso se traduce en una probabilidad  $P$  que depende del valor de la disonancia de cada agente  $D(A, U(H))$ . En el modelo se supone una dependencia lineal con la disonancia y con una probabilidad  $P_0$  constante e independiente del agente, parámetro del modelo, de acuerdo a la ecuación (44). El parámetro  $P_0$  representa un mínimo valor de posibilidad de movimiento residencial en la ciudad.

$$P(D) = P_0 + (1 - P_0)D \quad (44)$$

Una vez que todos los agentes de la ciudad han calculado su probabilidad de intentar cambiar de residencia, cada agente “*decide*” si permanece en su vivienda actual con probabilidad  $1 - P(D)$  o si cambia de residencia con probabilidad  $P(D)$ . En caso de que el agente decida cambiar de residencia se le incluye en el conjunto de potenciales emigrantes interiores  $M$ . Al conjunto  $M$  se le añade también los agentes inmigrantes que llegan a la ciudad por primera vez.

La segunda fase del algoritmo se encarga de estimar el atractivo de las viviendas disponibles para los posibles migrantes. Cada uno de los agentes  $A \in M$ , selecciona aleatoriamente un número dado por un parámetro del modelo de viviendas de la lista de viviendas vacías. Al conjunto de viviendas candidatas para cada agente

<sup>107</sup> La fórmula de la ecuación (43) representa la aproximación “negativista” de elección residencial, en la que un único factor de disonancia alto genera una disonancia total alta.

lo denominaremos  $H_A$ . A partir de la disonancia entre el agente  $A$  y la vivienda vacante se determina la probabilidad de que el agente  $A$  ocupe esa vivienda  $Q(D)$ . A la variable  $Q(D)$  la llamaremos atracción de  $H$  por  $A$  y se considerará que es el complementario de la disonancia de acuerdo a la ecuación (45).

$$Q(D) = 1 - P(D) = (1 - P_0)(1 - D) \quad (45)$$

El tercer paso del algoritmo gestiona la ocupación de las residencias vacantes de acuerdo al algoritmo descrito en la figura 48. En esta fase, cada potencial agente migrante, contenido en el conjunto  $M$ , decide ocupar una de las  $H_A$  viviendas candidatas. En este proceso el agente  $A$  elige aquella vivienda de las candidatas con mayor atractivo. Si la vivienda todavía está libre intenta ocuparla con una probabilidad dependiente del atractivo de la vivienda  $Q(D) = D(A, U(H_{A,1}))$ . Si  $A$  ocupa la nueva vivienda deja vacía la antigua y también el conjunto  $M$ , si por el contrario la vivienda candidata ya está ocupada, o no es suficientemente atractiva, el agente  $A$  retira esa vivienda del conjunto  $H_A$  y permanece en el conjunto  $M$ . El proceso es iterativo tantas veces como viviendas candidatas existan por agente. En cada iteración, el orden de los agentes dentro del conjunto  $M$  es aleatorio para evitar posibles desviaciones.

El conjunto de agentes que al acabar la búsqueda de vivienda todavía están incluidos en el conjunto  $M$ , tienen dos alternativas dependiendo del tipo de agente que sean. Si eran residentes en la ciudad, con probabilidad  $L_A$  (parámetro del modelo) abandonan la ciudad o con probabilidad  $1 - L_A$  permanecen en la vivienda actual. En cambio, si eran emigrantes que no han sido capaces de encontrar una residencia, dejan la ciudad.

Los procesos de inmigración-emigración que son modelados cobran una influencia importante en esta fase. El proceso de emigración viene dado por el número de agentes emigrantes que se incluyen por iteración en el conjunto  $M$ , el proceso de inmigración viene calibrado por el parámetro  $L_A$ .

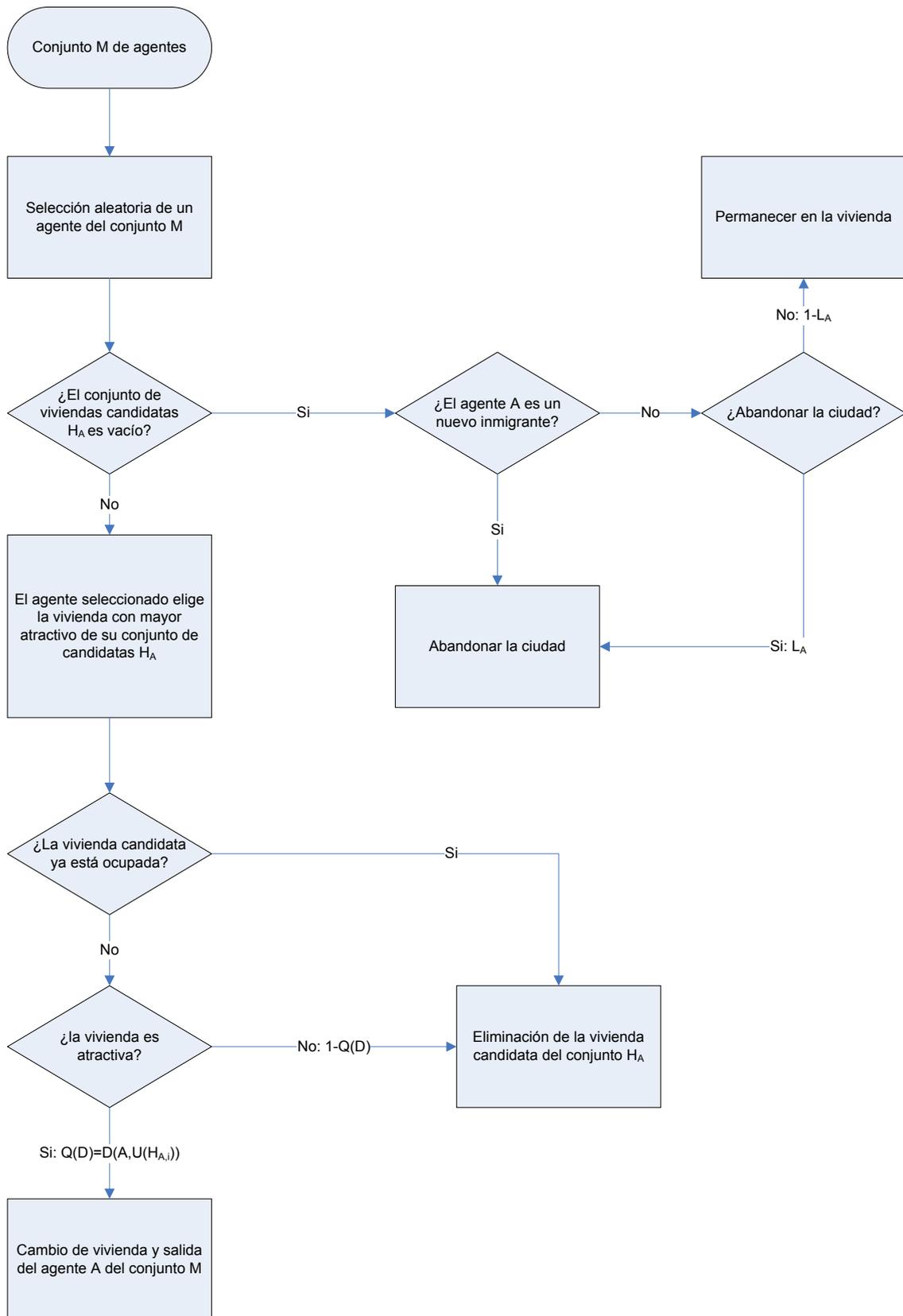


Figura 48. Diagrama de flujo del algoritmo de selección de vivienda.

## 4.2 El modelo de difusión de comportamiento

### 4.2.1 Los modelos de Young y Edwards *et al.*

Muchas de las normas sociales y de las formas de comportamiento habituales de los humanos en sociedad no se adoptan necesariamente de forma simultánea e inmediata, sino que con frecuencia son el resultado de un proceso de expansión gradual a través de redes sociales, conocido como proceso de difusión. En muchos casos la adopción de un tipo de comportamiento u otro está marcadamente influenciada por el número de vínculos y, por tanto, de refuerzos que tenga un individuo con un determinado tipo de comportamiento (Newman, 2003).

El modelo elegido en sustitución del modelo de adaptación cultural de Benenson es precisamente un modelo reversible estocástico de un proceso de difusión que depende de la información hecha pública del recurso, en este caso el agua.

El modelo está inspirado en el modelo de sociología de difusión de la innovación de Young (1999) adoptado y adaptado por Edwards *et al.* (2005). Pero en nuestro caso está ligeramente modificado para incluir mayor heterogeneidad de comportamientos individuales frente a la presión social, como detallaremos a continuación.

El modelo considera  $N$  agentes que han de decidir entre dos comportamientos a lo largo del tiempo, el comportamiento  $S$  y el comportamiento  $NS$ . Cada agente  $A$  posee una red social  $V(A)$ . En nuestro modelo la red social del agente  $A$  que ocupa la vivienda  $H_{ij}$  se construye con los agentes que ocupan las viviendas en  $U(H_{ij})$ , por tanto el número de vínculos sociales varía de un agente a otro.

La elección de adoptar un comportamiento  $S$  o  $NS$  recae en una función de utilidad que depende del comportamiento actual del agente, del comportamiento mayoritario de su red social y de la información pública. La utilidad  $v_A(S)$  y  $v_A(NS)$  de adoptar un comportamiento  $S$  o  $NS$  por parte de un agente  $A$  queda definida por las siguientes expresiones:

$$v_A(S \rightarrow S) = a \cdot V(A, S) + e_S \quad (46)$$

$$v_A(S \rightarrow NS) = b \cdot V(A, NS) \quad (47)$$

$$v_A(NS \rightarrow S) = a' \cdot V(A, S) + e_S \quad (48)$$

$$v_A(NS \rightarrow NS) = b' \cdot V(A, NS) \quad (49)$$

donde  $V(A, S)$  y  $V(A, NS)$  son las proporciones de vecinos del agente  $A$  que han adoptado el comportamiento  $S$  o  $NS$ , y  $a$ ,  $b$ ,  $a'$  y  $b'$  son parámetros del modelo. El término exógeno  $e_S$  depende de la información sobre el recurso:

$$e_S = c_E \cdot f(\text{InfWater}) \quad (50)$$

Para tener en cuenta la variabilidad individual, al igual que en Young (1999) y en Edwards *et al.* (2005), se introduce una respuesta estocástica en el modelo. La elección de comportamiento dependerá por supuesto de la función de utilidad, pero el que por ejemplo  $v_A(S) > v_A(NS)$  no implica necesariamente que el agente  $A$  vaya a adoptar el comportamiento  $S$ <sup>108</sup>.

La probabilidad de adoptar el comportamiento  $S$  o  $NS$  por parte de un agente  $A$  que sigue un comportamiento  $S$ , quedará definida por:

$$P(A \text{ elige } S / S) = \frac{e^{\beta \cdot v_A(S \rightarrow S)}}{e^{\beta \cdot v_A(S \rightarrow S)} + e^{\beta \cdot v_A(S \rightarrow NS)}} \quad (51)$$

$$P(A \text{ elige } NS / S) = \frac{e^{\beta \cdot v_A(S \rightarrow NS)}}{e^{\beta \cdot v_A(S \rightarrow S)} + e^{\beta \cdot v_A(S \rightarrow NS)}} \quad (52)$$

La mayor o menor dependencia de la utilidad para la elección del comportamiento, es decir la aleatoriedad de la decisión, dependerá del parámetro  $\beta$ .

Análogamente, la probabilidad de adoptar el comportamiento  $S$  o  $NS$  por parte de un agente  $A$  que sigue un comportamiento  $NS$ , quedará definida por:

<sup>108</sup> Si que implicará que  $P(S) > P(NS)$ .

$$P(A \text{ elige } S / NS) = \frac{e^{\beta \cdot v_A(NS \rightarrow S)}}{e^{\beta \cdot v_A(NS \rightarrow S)} + e^{\beta \cdot v_A(NS \rightarrow NS)}} \quad (53)$$

$$P(A \text{ elige } NS / NS) = \frac{e^{\beta \cdot v_A(NS \rightarrow NS)}}{e^{\beta \cdot v_A(NS \rightarrow S)} + e^{\beta \cdot v_A(NS \rightarrow NS)}} \quad (54)$$

#### 4.2.2 Adaptación del modelo

El modelo de Young-Edwards hace una hipótesis implícita de homogeneidad al considerar que todos los agentes están influenciados de la misma forma en el modelo y que es simplemente el contexto (y una función de aleatorización de la respuesta) lo que determina su comportamiento. Esta hipótesis es relajada por diferentes autores (Benenson y Torrens, 2004; Barthélemy, 2006) que demuestran la influencia que puede tener en el comportamiento global del sistema si incluimos diferentes proporciones de individuos influenciados por distintos motivos. Para analizar escenarios que permitan relajar esta hipótesis, incluimos una componente de comportamiento intrínseco del agente en las ecuaciones (51)-(54). De esta forma se puede evaluar el modelo mediante el modelo clásico de Young-Edwards o mediante nuestra adaptación y ver cómo de robusto es el sistema al modelo de difusión de opinión.

La representación del proceso del modelo adaptado se basa en el mecanismo de *endorsement* propuesto por Cohen (1985) y utilizado ocasionalmente en modelos de simulación social (Moss, 1998; Moss, 2002a; Pajares *et al.*, 2003a; Pajares *et al.*, 2004). En el modelo, los agentes toman decisiones de acuerdo a la percepción subjetiva de una situación, y es precisamente esa subjetividad la que se implementa mediante el mecanismo.

La información percibida por el agente es almacenada para la toma de decisiones. En el caso del modelo inicial de Young-Edwards, esta información viene dada por el comportamiento de la vecindad, la información externa del recurso y el propio estado del agente. Mientras que el peso de cada uno de los orígenes de información a la hora de tomar una decisión en este modelo es equivalente para cada uno de los agentes, en la adaptación del modelo no. Mediante la combinación de los diferentes orígenes de información con los pesos propios que da el agente a las

diferentes fuentes se computa un valor subjetivo y heterogéneo (en el proceso) para cada agente.

En la adaptación se utilizan específicamente tres parámetros para caracterizar a la población: el porcentaje de población principalmente influenciada por el nivel del recurso, el porcentaje influenciado principalmente por el comportamiento de la vecindad y un porcentaje principalmente influenciado por su propio comportamiento que presenta una mayor inercia al cambio de opinión. Estos tres parámetros no son independientes, sino que su suma ha de representar la totalidad de la población. La inercia de la población al cambio es modelada por el parámetro  $c$ .

Los diferentes *endorsements* que determinan el valor subjetivo de cada agente se clasifican en función de la importancia, y por tanto influencia, que tenga para cada agente el origen de la información. De esta forma, los términos de las funciones de utilidad se modifican en función de los pesos que dé cada agente a sus fuentes (ver la ecuación (55)). Esta idea contrasta levemente con la utilización habitual del mecanismo de *endorsements* como alternativa a los sistemas basados en funciones de utilidad, puesto que en nuestro caso la complementa y no la sustituye.

$$v_A = \sum_{e_i} \psi^{e_i} \cdot \xi_i, \quad e_i \geq 0 \quad (55)$$

donde  $\xi_i$  es cada uno de los sumandos dependientes de cada origen para obtener la función de utilidad, y  $e_i$  es un valor positivo (típicamente entero) asociado a la importancia que el agente da al término  $i$ . Cuanto mayor sea el valor de  $e_i$  (índice del *endorsement*) mayor será la influencia asociada a ese término en la función de utilidad. El valor de  $\psi$  determina la importancia que tiene un índice de *endorsement* respecto al valor de otro índice.

De manera explícita, las funciones de utilidad de los diferentes cambios de comportamiento del agente quedarían expresadas bajo este modelo de la siguiente manera:

$$v_A(S \rightarrow S) = \psi^{e_1} \cdot a \cdot V(A, S) + \psi^{e_2} \cdot e_S + \psi^{e_3} \cdot c \quad (56)$$

$$v_A(S \rightarrow NS) = \psi^{e_1} \cdot b \cdot V(A, NS) \quad (57)$$

$$v_A(NS \rightarrow S) = \psi^{e_1} \cdot a' \cdot V(A, S) + \psi^{e_2} e_S \quad (58)$$

$$v_A(NS \rightarrow NS) = \psi^{e_1} \cdot b' \cdot V(A, NS) + \psi^{e_3} \cdot c \quad (59)$$

donde  $\psi$  es un parámetro del modelo, y los valores de los índices del *endorsement* dependen de cada agente de acuerdo a los parámetros que caracterizan la influencia de la población.

### 4.3 El modelo de difusión tecnológica

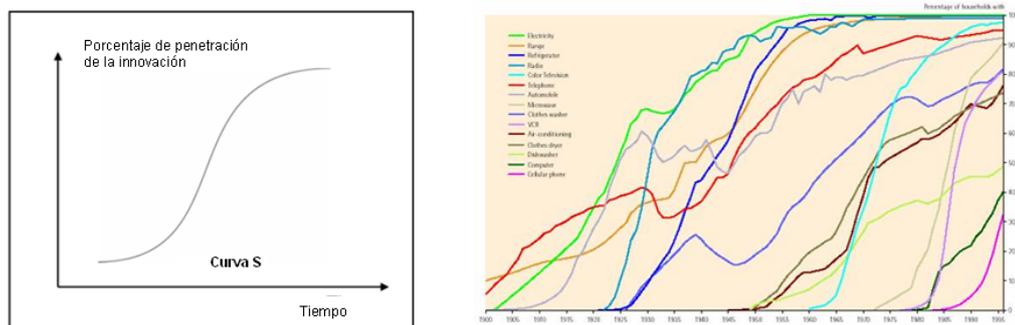
#### 4.3.1 Modelo clásico de difusión de la innovación

Se define una innovación como una idea, práctica u objetivo que es percibido como nuevo. Como apunta Rogers (1962), una de las razones del gran interés en el estudio de los mecanismos de difusión tecnológicos y de la innovación radica en que con frecuencia la adopción de una nueva idea, incluso cuando aporta beneficios y ventajas objetivas a quien la adopte, no se produce de manera instantánea. De hecho, se puede considerar que existe un proceso de rechazo inicial hacia la nueva idea. Decía Walter Bagehot en *Physics and Politics* (1872) que “*uno de los mayores daños a la naturaleza humana es una nueva idea. Te hace pensar que después de todo, tus ideas favoritas pueden ser falsas, tus más firmes creencias erróneamente fundadas... Naturalmente, y por tanto, la gente común odia las nuevas ideas y están dispuestos a tratar como equivocado al hombre que la originó.*”<sup>109</sup>

Sin necesidad de pensar en una oposición radical a la innovación de Bagehot, el proceso de difusión es aún más complejo cuando la nueva idea no supone un beneficio egoísta para el que lo adopta de forma inmediata, sino que el beneficio se produce a partir de determinados niveles de aceptación de la idea. Por ejemplo, cuando existen externalidades de red positivas o en la adopción de medidas de ahorro.

<sup>109</sup> Traducción propia y libre de “*One of the greatest pains to human nature is the pain of a new idea. It...makes you think that after all, your favorite notions may be wrong, your firmest beliefs ill-founded... Naturally, therefore, common men hate a new idea, and are disposed more or less to ill-treat the original man who brings it*”.

El inicio de la investigación sobre los mecanismos de difusión de la innovación se suelen establecer en 1903 a partir de los trabajos del sociólogo francés Gabriel Tarde. Tarde sostenía que la sociología de estos procesos estaba basada en un muy reducido conjunto de interacciones psicológicas entre los individuos, básicamente imitación e innovación. Fue quien introdujo la famosa curva S de difusión. La idea es que la mayoría de los procesos de difusión de este tipo tenía forma de S (figura 49), la diferencia entre unos y otros dependía de que la pendiente de la curva fuese mayor o menor.



**Figura 49.** Curva S idealizando el proceso de difusión de la innovación típico (a la derecha) y curvas reales de diferentes tasas de adopción de tecnologías a lo largo del siglo (a la izquierda). Fuente: Federal Reserve of Dallas<sup>110</sup>.

Sin embargo no es hasta el año 1962 cuando, basándose también en los trabajos de los sociólogos Ryan y Gross, Everett M. Rogers establece el modelo clásico de difusión de la innovación a través de su libro *Difusión of Innovations* (Rogers, 1962).

Según Rogers, la difusión de la innovación costa de cuatro elementos fundamentales, la propia innovación, el canal de comunicación, el sistema social al que se comunica y el tiempo. A su vez, cada uno de estos elementos depende de multitud de factores de influencia que determinan su respuesta y de las categorías de los potenciales adoptantes de la innovación que se establezcan.

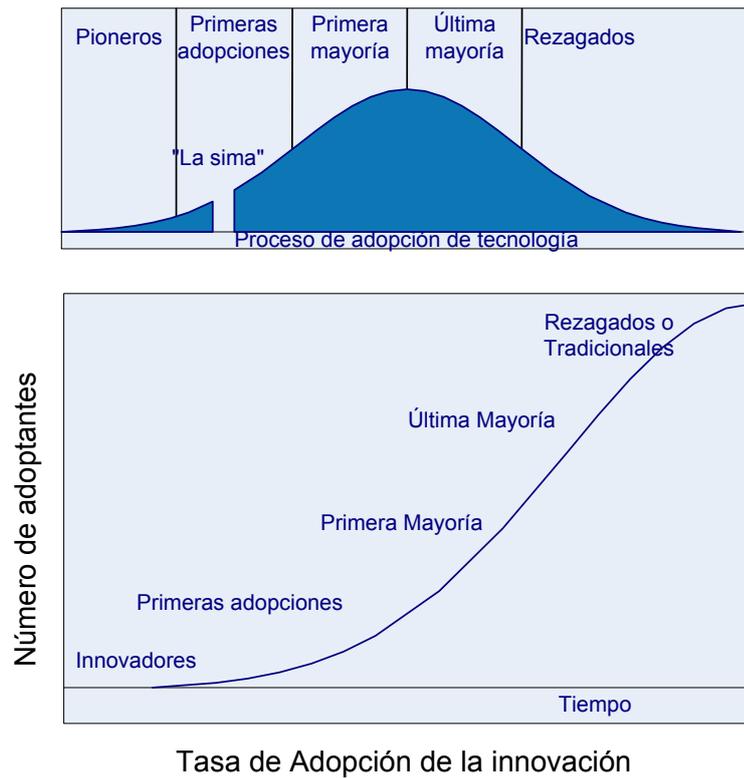
Así por ejemplo y en cuanto a la propia innovación, Rogers considera que la velocidad de adopción de una innovación, y que explica en parte la variabilidad de la pendiente de la curva S, depende de la innovación en cinco factores de adopción:

<sup>110</sup> <http://www.dallasfed.org/fed/annual/1999p/ar96.pdf> [Último acceso el 1 de Septiembre de 2006].

1. Ventaja. De la ventaja relativa que la nueva innovación tenga sobre la que la precede.
2. Compatibilidad. Capacidad de pervivir con los valores existentes y sistema social.
3. Complejidad. Percepción de la dificultad de entendimiento de uso.
4. Experimentación. De la posibilidad de experimentar con la nueva innovación.
5. Visibilidad. De la observabilidad de los resultados de la innovación hacia otros que todavía no han adoptado la idea.

Pese a que inicialmente se pensaba que el canal de comunicación era un proceso en un único paso, principalmente de los canales de información masiva al individuo, en la actualidad y también en deuda con Rogers, se considera que no es así. Hoy en día resulta obvia la influencia de la interacción entre individuos en el proceso de difusión de la innovación, mediante la transmisión de información entre ellos. Es más, es frecuente hacer referencia a la diversa capacidad de cada individuo para influir en ese proceso y se habla de líderes de opinión, etc.

En cuanto a la categoría de adoptantes y el tiempo de adopción (figura 50) Rogers considera que se pueden clasificar en innovadores (2,5%) con alta propensión a asumir riesgos, capaces de importar la idea y de incorporarla al sistema; primeros adoptantes (13,5%) que aceptan la nueva innovación antes que los demás y suelen poseer cualidades de liderazgo y peso en la toma de decisiones locales; mayoría precoz (34%) que necesitan más tiempo para aceptar la innovación y suelen controlar los canales informales; mayoría rezagada (34%) caracterizada por aceptar nuevas ideas por presiones del entorno y necesitar más información; y tradicionales (16%) que representan el conjunto de individuos que plantean reservas en cuanto a la adopción y al papel de los intermediarios.



**Figura 50.** Categorías de adoptantes respecto al tiempo de adopción.

En cuanto al sistema social, Rogers se refiere al grupo o grupos a través de los cuales la innovación se difunde. Considera los sistemas sociales divididos en dos categorías extremas: tradicionales y modernos. Los sistemas tradicionales tienen un menor desarrollo tecnológico, de educación, falta de racionalidad económica, etc., mientras que los modernos se caracterizan por un alto desarrollo tecnológico, cultural, con habilidad para entender otras situaciones, etc. Los sistemas modernos son capaces de aceptar con mayor facilidad las innovaciones y adaptarse al cambio, además de poseer con frecuencia mayor conjunto de individuos innovadores.

A partir de los cuatro elementos que determinan la difusión de la innovación, Rogers propone un modelo para cada individuo con cinco niveles para el proceso de adopción (o rechazo) de una innovación:

1. Conocimiento (*Knowledge*). Aprendizaje sobre la existencia y la función de la innovación.
2. Persuasión (*Persuasion*). Convencimiento del valor de la innovación.
3. Decisión (*Decision*). Compromiso a la adopción de la innovación.

4. Implementación (*Implementation*). Puesta en uso.
5. Confirmación (*Confirmation*). La última aceptación o rechazo de la innovación.

A pesar de las pinceladas que hemos dado sobre el modelo clásico, hoy en día existen innumerables artículos con refinamientos, críticas o alternativas a este modelo, y a muchos otros que abordan el mismo problema. No existe una teoría comúnmente aceptada sobre los modelos de difusión tecnológicos y de la innovación.

Resulta interesante ver que el proceso de difusión es un proceso sociológico, es un proceso que depende del grupo. No obstante, el proceso de adopción es un proceso que depende del individuo. Sin más que pararse a pensar un poco en este hecho, resulta casi inmediato intentar estudiar los mecanismos micro-macro que generan estos procesos, y qué mejor metodología para establecer este vínculo que el modelado basado en agentes.

Si se buscan modelos de difusión de la innovación basados en agentes con influencia geográfica, veremos que no hay demasiados (Boccaro y Fuks, 1998; Goldenberg *et al.*, 2001; Strang y Macy, 2001). En general son modelos que estudian la influencia de un determinado factor en autómatas celulares o redes sociales, pero con un nivel de detalle que no es comparable al modelo de Rogers. En los modelos formales de difusión de la innovación resulta mucho más frecuente encontrar modelos de ecuaciones diferenciales de estos fenómenos como el modelo de Bass (1969), que comentaremos a continuación con cierto detalle, o sofisticaciones de su modelo para incluir aprendizaje, aversión al riesgo, naturaleza de la innovación, etc. (Mahajan *et al.*, 1990; Meade y Islam, 2006) o incluso incorporar distribución espacial (Haynes *et al.*, 1977).

A pesar de la riqueza descriptiva del modelo de Rogers, no se trata de un modelo formal, por lo que no es válido en su estado actual para integrarlo en el modelo general de consumo objeto de esta tesis. Intentar formalizar su modelo resulta difícil y probablemente inútil para nuestros propósitos, puesto que no se posee un conocimiento tan detallado y asociado al espacio de la población en el que se pueda calibrar sus parámetros. Pese a ello, consideramos interesante dotar a nuestro

modelo con la posibilidad de analizar escenarios con difusión de innovaciones tecnológicas relacionadas con el consumo doméstico de agua.

La aproximación que hemos decidido utilizar para incorporar esta capacidad es la de integrar el modelo de Bass como paso inicial del modelo y a partir de ahí añadir hipótesis que contextualicen los escenarios de estudio. Las razones de elegir este modelo son básicamente dos: se trata de un modelo relativamente sencillo de entender con parámetros con cierta significación real, y es quizá el modelo de difusión de la innovación y la tecnología más utilizado y con buenos resultados del mundo (Meade y Islam, 2006; Ilonen *et al.*, 2006).

El primer problema que se plantea para cumplir con nuestros objetivos es que, como veremos en el siguiente apartado, el modelo de Bass es un modelo en ecuaciones diferenciales que estudia variables agregadas y continuas, justo lo contrario de los modelos basados en agentes. Es decir, tendremos que adaptarlo para permitir la integración.

### 4.3.2 El modelo de Bass

En las últimas décadas se han desarrollado muchos modelos de difusión de nuevos productos. La principal utilidad de estos modelos es que pueden ayudar a comprender el éxito o el tiempo de implantación de la innovación. Como comentábamos en el apartado anterior, mucho del trabajo hecho en éste área es herencia directa del artículo de Bass (1969).

Su trabajo ha tenido esa influencia extraordinaria porque a partir de un modelo sencillo es capaz de describir la curva de acumulación de adoptantes de una nueva innovación, la curva S, extremadamente bien. El modelo de Bass asume que la tasa instantánea de adopción de un nuevo producto, innovación o tecnología, en cualquier instante de tiempo, depende de dos fuerzas: la tendencia intrínseca en el individuo (bajo el supuesto de que no haya adoptado ya la innovación) de adoptar la nueva idea, independientemente del número de adoptantes previos en la población, y la influencia positiva generada por los adoptantes hacia el conjunto de la población que todavía no la adoptado.

La formalización matemática de las hipótesis del modelo es como sigue. Sean  $p$  y  $q$  los dos parámetros que representan la influencia de cada una de las fuerzas mencionadas, sea  $m$  el tamaño de la población objetivo y sea  $N(t)$  el número acumulado de adoptantes de la nueva innovación en el tiempo  $t$ . Entonces, bajo la hipótesis de que  $N(t)$  es una función continua y con la condición inicial de que  $N(0) = 0$ , el proceso sigue la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dN(t)}{dt} = [m - N(t)][p + \frac{q}{m} N(t)], \quad t \geq 0 \quad (60)$$

Es decir, la tasa de crecimiento de  $N(t)$  en el instante  $t$  es proporcional al producto de  $m - N(t)$ , el tamaño de la población que todavía no ha adoptado la innovación, y de  $p + (q/m)N(t)$ , la tasa de adopción instantánea de cada individuo de la población remanente.

Bass (1969) se refiere al parámetro  $p$  como *coeficiente de innovación* y al parámetro  $q$  como *coeficiente de imitación*. Otros investigadores como Niu (2002) o Ilonen *et al.* (2006) se refieren a  $p$  como coeficiente de “*influencia externa*” y a  $q$  como coeficiente de “*influencia interna*”, de tal manera que los coeficientes se pueden interpretar como las respectivas intensidades de la transmisión de la información por parte de una fuente o transmisor externo, un canal de televisión o cualquier otro medio de masas en el caso de  $p$ , y como la intensidad de transmisión de información “*boca a boca*” o comunicación interpersonal en el caso de  $q$ .

Nótese que si llamamos  $F(t)$  a la fracción de individuos del conjunto  $m$  que han adoptado el producto en el instante  $t$ ,

$$F(t) \equiv \frac{N(t)}{m} \quad (61)$$

Entonces, pasando a esta nomenclatura, podemos escribir el modelo diferencial de Bass de la siguiente forma:

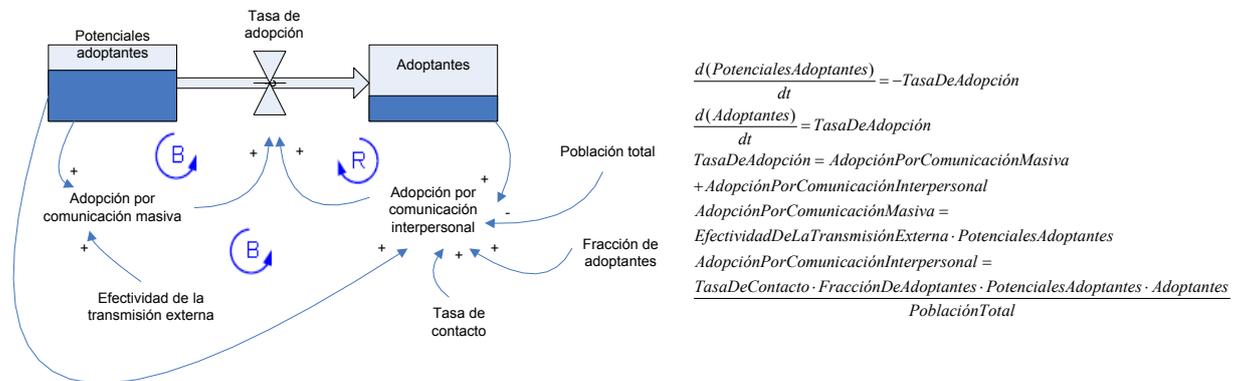
$$\frac{f(t)}{1 - F(t)} = p + q \cdot F(t), \quad t \geq 0 \quad (62)$$

donde  $f(t)$  es la derivada de  $F(t)$ .

Bass (1969) demuestra que la solución de la ecuación anterior viene dada por

$$F(t) = \frac{1 - e^{-(p+q)t}}{1 + \frac{q}{p} e^{-(p+q)t}}, \quad t \geq 0 \tag{63}$$

solución con forma de S que proporciona un ajuste empírico excelente para multitud de productos (Niu, 2002). Resulta también interesante hacer notar que la forma sigmoidea típica dada por la solución al modelo de Bass presenta ventajas frente a otras funciones que también pueden generar formas parecidas. Por un lado es capaz de capturar un rango más amplio de formas que por ejemplo la función logística, que asume simetría de la función a partir del punto de inflexión (Franses, 2006); por otro lado y como estamos viendo, los parámetros de la ecuación son fácilmente interpretables. Se puede ver, por ejemplo, en la figura 51 la representación del modelo expresado como modelo de dinámica de sistemas. Por ambas razones el modelo de Bass parece una elección interesante.



**Figura 51.** Niveles flujos y relaciones causales en el modelo de difusión de Bass expresado como modelo de dinámica de sistemas y su modelo matemático asociado. A partir de Borshchev y Filippov (2004).

Sin embargo, y como comentábamos en la introducción a este apartado, el principal inconveniente que tiene la elección de este modelo para representar procesos de difusión de nuevos productos, no está en la representatividad del modelo para el proceso, que en nuestra opinión está bastante justificada, sino en que se trata

de un modelo expresado en ecuaciones diferenciales sobre variables agregadas, exactamente lo contrario a nuestra aproximación. La dificultad aparece entonces en el proceso de integración. Nuestra propuesta es adaptar el modelo de Bass para convertirlo en un modelo basado en agentes y poder integrarlo al resto de submodelos.

### 4.3.3 Adaptación del modelo de Bass

Los modelos basados en agentes frente a las aproximaciones en ecuaciones diferenciales, son esencialmente descentralizados. No se define el comportamiento global del sistema mediante la evolución de las variables agregadas, sino que se define el comportamiento del sistema a nivel del individuo y se deja que el comportamiento global de las variables agregadas emerja. Por tanto, en el proceso de adaptación, el comportamiento del modelo se deberá definir desde el individuo.

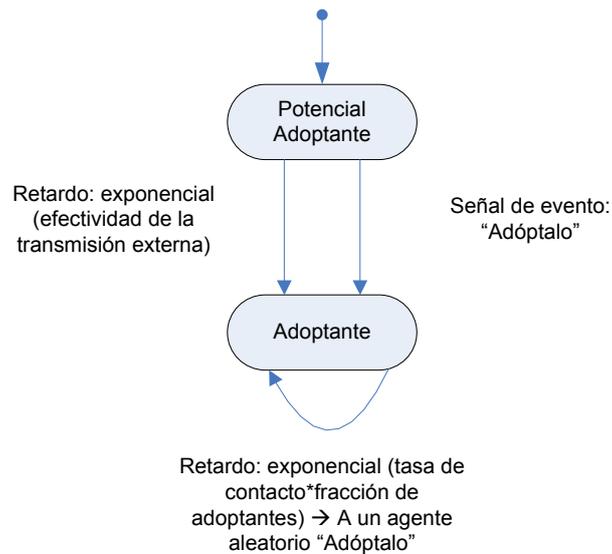
Para realizar este proceso, aprovechamos el marco general propuesto por Borshchev y Filippov (2004) para transformar modelos expresados mediante dinámica de sistemas en modelos basados en agentes. La idea general de este proceso se basa en “discretizar” las variables que simulan los niveles en los modelos de dinámica de sistemas y representar los saltos entre niveles como cambios de estado en cada una de las “partes discretas” de las variables. Siguiendo la reconceptualización del modelo de Bass propuesta precisamente por Borshchev y Filippov (2004) a partir de la figura 52, entonces:

1. Se crean dos estados de los agentes a partir de los dos niveles definidos, adoptantes y potenciales adoptantes.
2. Los dos sumandos de la tasa de adopción se modelan separadamente. Para modelar el proceso de adopción a partir de la comunicación masiva se crea una transición entre el estado de potencial adoptante a adoptante que se dispara a través de un retardo exponencial cuya media es el parámetro de efectividad de la transmisión externa<sup>111</sup>.

---

<sup>111</sup> Un retardo exponencial de este tipo equivale a asumir un porcentaje constante de adoptantes por unidad de tiempo (Borshchev y Filippov, 2004).

3. Para modelar la adopción por comunicación interpersonal se crea una transición periódica para cada persona que ya es un adoptante. La transición modela el contacto con otra gente mediante el parámetro tasa de contacto. En caso de que el contacto sea todavía un potencial adoptante, cambiara su estado al estado de adoptante con una probabilidad correspondiente, y en caso de que ya fuese un adoptante ignorará el mensaje.

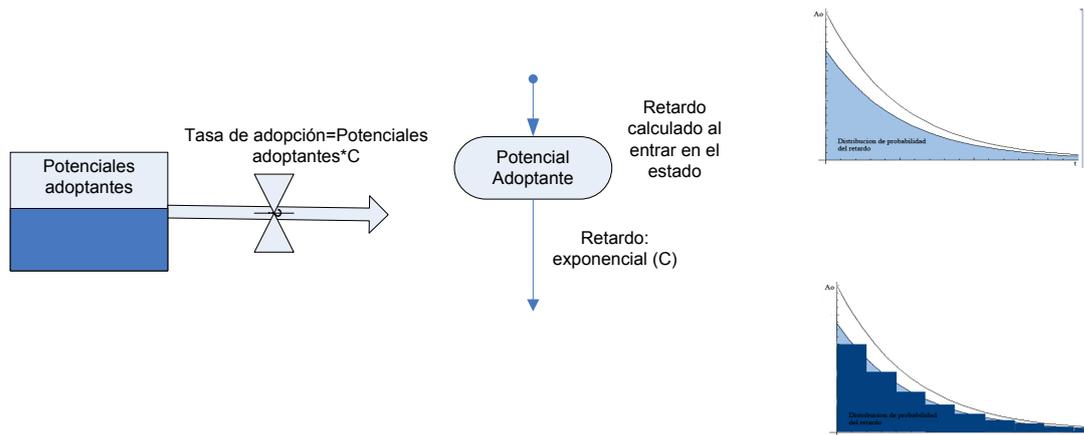


**Figura 52.** Diagrama de estados para la adaptación del modelo de Bass como modelo basado en agentes propuesto por Borshchev y Filippov (2004).

A pesar del indudable interés y utilidad de esta adaptación inspirada por Borshchev y Filippov (2004), la posibilidad de integrarla directamente en el modelo general pasa por adaptar los niveles temporales del submodelo. Conviene tener en cuenta que la transición entre los estados propuesta es asíncrona; es decir, los retardos asociados a la transición se calculan en el cambio de estado. En este caso no tiene sentido la noción de paso de tiempo en el modelo. Esto contrasta con la filosofía del resto del modelo, en la que cada decisión se realiza cada *tick* de tiempo  $dt$ , y dificulta su adaptación.

En el modelo de Bass la tasa es proporcional al valor del nivel y por tanto implica un retardo modelado como una función exponencial. El proceso de adaptación que hemos incluido se basa en aproximar la función de distribución de probabilidad exponencial del modelo continuo, a su aproximación discreta en función del tamaño del *tick*. Esta aproximación es tanto mejor cuanto menor es el

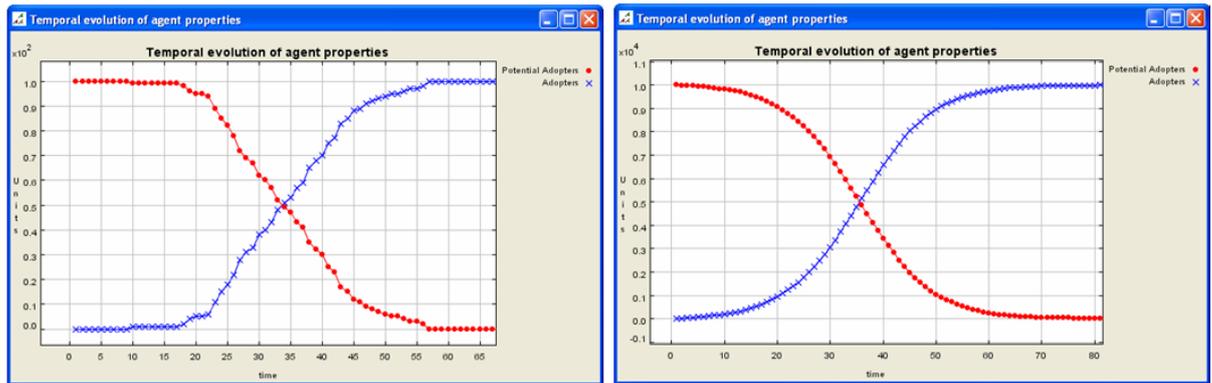
paso del *tick*, como cabría esperar por otro lado (figura 53). Al hacer esto, conseguimos pasar el modelo a síncrono, evaluando en cada iteración el cambio de estado de cada agente para comprobar si la realización propia de la función exponencial pertenece al intervalo discreto de tiempo<sup>112</sup>.



**Figura 53.** Correspondencia entre un proceso de dinámica de sistemas y modelo de estados para modelar con agentes en el caso de una tasa proporcional al nivel. En la parte de la derecha arriba, se muestra la aproximación asíncrona del modelo, en la parte de la derecha se muestra la función de distribución con nuestra aproximación síncrona para un *tick* dado.

La aproximación discreta implementada genera las curvas de Bass en función del parámetro de efectividad de la transmisión externa y en función de la tasa de contacto (figura 54).

<sup>112</sup> El proceso de discretización de la exponencial se ha llevado a cabo en el término de adopción por influencia externa. Podría no haberse utilizado esta aproximación y haberse utilizado tasas probabilísticas constantes en la población no adoptante en cada *tick*. En la implementación del modelo acoplado de Bass se adopta esta última alternativa encontrando resultados similares. El propósito de comparar ambas alternativas es hacer un pequeño ejercicio para comprobar la generalidad de la aproximación de Borshchev y Filippov (2004). En el término de contagio, la aproximación de Borshchev y Filippov conlleva más dificultad técnica y menor eficiencia computacional, por lo que no se ha utilizado y se ha implementado un proceso aleatorio de interacción y contagio probabilístico.



**Figura 54.** Ejemplo de las curvas de difusión de la innovación en la aproximación discreta para 100 agentes (a la izquierda) y 10000 agentes (a la derecha), efectividad de la transmisión externa de 0.01, una tasa de contacto de 10.0 y una fracción de adopción de 0.015. Nótese como a mayor número de agentes la aproximación continua del modelo de Bass representa más fielmente el proceso discreto implementado.

El proceso de reconceptualización del modelo de Bass llevado a cabo no tendría sentido si no fuésemos a añadir o mayor nivel de detalle en el proceso individual de adopción, línea futura de investigación que dejaremos abierta en esta tesis, o bien para permitir acoplar este submodelo a otros aspectos del resto de submodelos. Si no fuésemos a ir más allá de los límites del modelo de dinámica de sistemas, hubiese sido suficiente, y más eficiente, modelar el proceso de adopción de forma aislada y añadirlo al resto de submodelos simplemente por superposición.

Pero en nuestro caso, y puesto que los escenarios que queremos analizar con el modelo buscan evaluar la difusión de dispositivos de ahorro de agua, acoplaremos el modelo de Bass con el modelo (adaptado) de difusión de opinión de Young, con la hipótesis de que la adopción de una nueva medida depende del estado de opinión y conducta del agente. Es decir, supondremos que un agente con una actitud solidaria respecto al ahorro adoptará más fácilmente una innovación para el ahorro que uno que no. Formalmente, se añade un término de probabilidad adicional al parámetro  $p$  del modelo de Bass, definido como parámetro.

#### 4.4 El modelo de consumo

Para calcular el consumo de cada agente, inicialmente se pensó en utilizar la misma estructura que el modelo FIRMABAR (López-Paredes *et al.*, 2005) y calcular los consumos en función de los diferentes usos, realizando modelos de cada uso en función de los estados de los agentes del modelo. El principal problema que

encontramos para sofisticar la primera aproximación del modelo de Barcelona de forma rigurosa era la falta de datos fiables de los usos de consumo. El modelo de Barcelona se basaba en los datos de uso obtenidos mediante encuestas. Una solución ideal para sustituir esos datos con rigor era buscar modelos de uso final en España para utilizarlos como base que caracterizase el comportamiento de los agentes. Sin embargo en España, y prácticamente en Europa, hasta donde alcanza nuestro conocimiento, no existen estudios de uso final comparables a los modelos de California y Australia.

Una vez constatado este hecho, surgían dos opciones, hacer la hipótesis, a nuestro entender extremadamente fuerte, de considerar los modelos de uso final de esas regiones exportables a España, o bien utilizar otra aproximación para caracterizar el comportamiento de los agentes. Finalmente nos decantamos por esta última opción, y puesto que contamos con la colaboración de Aquagest y Aguas de Valladolid, empresas suministradoras de agua doméstica en la región, decidimos utilizar sus bases de datos para intentar caracterizar el consumo doméstico de los agentes. Las bases de datos de estas empresas recogen por supuesto consumos totales y no por usos dentro de las unidades domésticas, por lo que consideramos que la mejor opción para este submodelo, al menos en esta primera versión del modelo y hasta que contemos con información que nos permita sofisticar el modelo, era realizar un estudio estadístico de los consumos que se recoge en el Anexo C.

Utilizar un submodelo estadístico en el consumo implica un modelo global híbrido. Estos modelos híbridos son bastante infrecuentes aunque existen antecedentes precisamente en la literatura de consumos de agua doméstica, como el modelo DAWN que analizamos con cierto detalle en la parte de fundamentos de este mismo trabajo (Athaniadis *et al.*, 2005; Athaniadis y Mitkas, 2005).

De forma más específica, la implementación final considera cuatro factores para calcular el consumo trimestral de cada agente. El factor fundamental en el consumo, como se justifica en el anexo C, es la tipología de vivienda. Por esta razón, para calcular el consumo del agente se evalúa la tipología y el trimestre de consumo para considerar el efecto estacional. El efecto estacional se ha calculado en el modelo estadístico tanto como un factor aditivo como multiplicativo para cada tipología de vivienda.

Al factor tipología y estacional se le añaden dos factores adicionales consecuencia de los submodelos de difusión. Uno de los factores que influyen en el consumo es la actitud social de los agentes respecto al recurso. Si el comportamiento del agente es un comportamiento solidario (comportamiento S en el modelo de difusión de opinión), el consumo disminuye respecto al valor medio en cada trimestre de acuerdo a una distribución normal de media la desviación típica del consumo y de desviación la propia desviación. Para hacer el modelo equilibrado, si la actitud es no solidaria (comportamiento NS en el modelo de difusión de opinión) se suma una variable estocástica igual. El último efecto que se tiene en cuenta en el consumo es la adopción o no de la innovación tecnológica por parte del agente. El efecto de la innovación se introduce como parámetro aditivo o multiplicativo sobre el consumo total.

El modelo integrado general del consumo se sintetiza en la figura 55. El modelo de dinámica urbana determina la tipología de vivienda que influye sobre el consumo, el *tick* de la simulación determina la estacionalidad en el consumo, las decisiones en el modelo de difusión de opinión determinan el comportamiento conservador o no del agente sobre el recurso y el modelo de difusión tecnológica modifica los valores de consumo en función de la adopción o no de la innovación que se incluya.

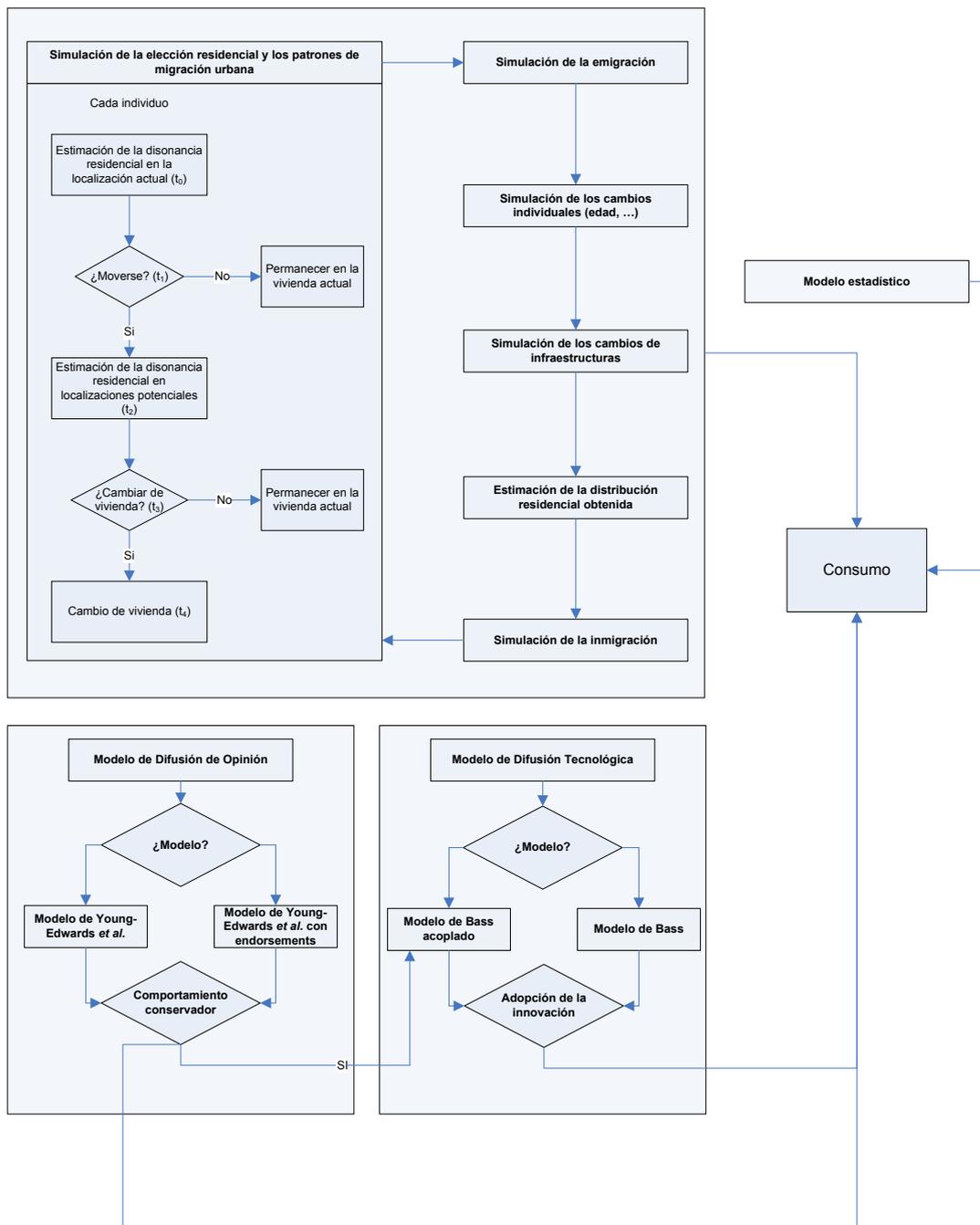


Figura 55. Esquema sintetizado del modelo integrado.

## 5. Resultados y discusión

Aplicación

*Scenarios are stories about the future, but their purpose is to make better decisions about the present*

Shell

### Resumen

*Analizar y discutir los resultados de las simulaciones obtenidas particularizando el modelo en la Región Metropolitana de Valladolid es el objeto de este capítulo.*

- *Como consecuencia de la imposibilidad de analizar todas las posibles combinaciones de resultados obtenibles con el modelo, estudiamos su dinámica en diferentes escenarios que reflejan situaciones urbanas plausibles. Cada escenario se define por los parámetros de dinámica urbana y se analiza bajo distintos perfiles y combinaciones de parámetros del resto de submodelos.*
- *El primer escenario que definimos es un escenario conservador que modela la posible evolución del sistema bajo la hipótesis de ningún cambio exógeno en la región. Tiene como objetivo establecer un referente con el que comparar el resto de escenarios y analizar el comportamiento de los modelos de difusión, tanto de opinión como de innovación tecnológica.*
- *A continuación, en el segundo escenario, evaluamos los efectos sobre el consumo doméstico ocasionados por un flujo constante de inmigración en la región. En el último escenario analizamos cómo puede influir el mercado de vivienda en la dinámica de consumo de agua. En particular, estudiamos el efecto de una inflación mayor de la vivienda en los barrios del centro de la ciudad.*





## 5.1 Configuración de escenarios

En este capítulo analizamos el comportamiento de nuestro modelo particularizado en la Región Metropolitana de Valladolid. Al ser un modelo complejo, con numerosos parámetros, resulta muy difícil (en términos prácticos, imposible) analizarlo de forma completa y para todas las posibles combinaciones de parámetros. En cualquier caso, no es este el objetivo de diseño del modelo. Su finalidad es proporcionar una herramienta que permita entender aspectos sobre la estructura de comportamiento global del sistema, integrando todos los subsistemas, pero sólo en las situaciones que consideremos de especial interés, por su plausibilidad, por su criticidad y por alguna otra razón que consideremos que merezca el esfuerzo de un estudio pormenorizado.

Para configurar inicialmente la simulación utilizamos diferentes hipótesis, algoritmos y bases de datos, tanto alfanuméricas como gráficas, que resumimos en el Anexo C. Poseemos bastante información sobre la ciudad de Valladolid. Sin embargo, la información cartográfica y social de los pueblos del alfoz es muchísimo menor, la mayoría de los Ayuntamientos de estos municipios carecen, por ejemplo, de departamentos que lleven un control cartográfico del urbanismo de forma digital, y mucha de la información censal no está actualizada. No obstante, puesto que los movimientos urbanos núcleo-periferia han demostrado ser muy relevantes para determinar el consumo (Saurí, 2003; Domene y Saurí, 2003; Parés *et al.*, 2004; López-Paredes *et al.*, 2005), consideramos necesario incluir la infraestructura del alfoz en las simulaciones, a pesar de que carezcamos de un SIG para representarla gráficamente. Puesto que parte de la información sobre la tipología de viviendas de todos los municipios del alfoz no es conocida (ni su evolución futura), consideraremos precisamente esta infraestructura como parámetro de definición de los escenarios.

En cuanto a las simulaciones existe un problema de escala. Si intentamos simular de forma explícita las cerca de 125.000 familias que habitan en la región como agentes del modelo, más sus diferentes viviendas y bloques, etc., la mayoría de los ordenadores que poseemos tienen problemas de memoria para llevar a cabo las simulaciones (aparte del tiempo de simulación que llevan), por lo que nos veríamos

obligados a reducir el número de simulaciones y el estudio del efecto de los diferentes parámetros. Como consecuencia, hemos reducido la escala del problema reduciendo el número de viviendas por bloque y el número de familias a un décimo, de manera que una simulación típica costa de unos 12.500 agentes representando las familias de la región (más o menos los efectos de emigración-inmigración que incluyamos en los escenarios).

Otro aspecto que se nos planteaba era determinar la representación temporal de la simulación: el valor del paso de en la simulación (*tick*) y el horizonte temporal que queríamos simular. El valor del *tick* de simulación casi nos viene dado por la información de que disponemos en las bases de datos de consumo. Como la información es trimestral, no tiene sentido incluir un *tick* menor, con mayor nivel de detalle y mayor tiempo de simulación, si no tenemos información más precisa que la de ese nivel. Por otro lado, en cuanto al horizonte temporal, decidimos hacer simulaciones a 10 años. La razón es que consideramos que los resultados con tiempos mayores pierden validez de forma muy importante, puesto que en horizontes temporales mayores se pueden producir cambios en las infraestructuras tan importantes que las hipótesis de los escenarios pierdan significado.

En cada ejercicio de simulación se han ejecutado 10 simulaciones para intentar reducir el efecto estocástico que tiene el proceso. A pesar de que se trata de un número no muy alto, hemos preferido utilizar nuestros recursos computacionales para analizar más diversidad de casos que para suavizar el efecto aleatorio de la simulación. Cuando en los escenarios analizamos mapas, éstos corresponden a simulaciones en concreto y no a medias de simulaciones con los mismos parámetros.

Para demostrar las posibilidades de la aproximación hemos analizado tres escenarios. Cada escenario se define por las hipótesis que determinan el comportamiento del submodelo urbano, y sobre cada escenario comprobamos el efecto de diferentes medidas y parámetros en los otros submodelos que hemos integrado. El escenario 1 tiene como objetivo establecer una situación conservadora, con la que comparar el efecto de los otros dos escenarios, y analizar los modelos de difusión, tanto de comportamiento como de innovación tecnológica. En el escenario 2 se analiza el efecto en el consumo generado por un flujo constante de inmigración,

y el tercer escenario evalúa el efecto de la inercia que puedan tener los precios de la vivienda en los barrios del centro de la ciudad.

En la definición de cada uno de los escenarios especificamos los parámetros por defecto de las simulaciones. Posteriormente modificamos muchos de ellos para entender el efecto que tienen en el sistema. Aparte de los parámetros, en cada simulación es necesario definir las matrices de disonancia que se han considerado. A continuación resumimos las matrices por defecto utilizadas en las simulaciones, aunque en algunos de los escenarios, donde se modifican, se especifican los nuevos valores de configuración de la simulación.

$$D_{Nationality} = \begin{pmatrix} & 1 & 0 \\ 1 & Zero & VeryHigh \\ 0 & Intermediate & Zero \end{pmatrix} \quad (64)$$

$$D_{Studies} = \begin{pmatrix} & 2 & 1 & 0 \\ 2 & Zero & High & VeryHigh \\ 1 & VeryLow & Zero & High \\ 0 & Intermediate & Low & Zero \end{pmatrix} \quad (65)$$

$$D_{Wealth/Value} = \begin{pmatrix} & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 \\ 4 & Zero & VeryLow & Low & Intermediate & High \\ 3 & VeryLow & Zero & VeryLow & Low & Intermediate \\ 2 & Low & VeryLow & Zero & VeryLow & Low \\ 1 & Intermediate & Low & VeryLow & Zero & VeryLow \\ 0 & High & Intermediate & Low & VeryLow & Zero \end{pmatrix} \quad (66)$$

## 5.2 Escenario 1

Este escenario representa un análisis conservador de la evolución de la región. Su estudio se justifica básicamente por dos razones. La primera, para servir de umbral con el que comparar el resto de simulaciones hechas con los otros escenarios; y la segunda razón, para estudiar el efecto de algunos de los parámetros de los submodelos con la menor interferencia ocasionada por efectos exógenos.

El escenario 1 se caracteriza por una configuración de la dinámica urbana sin intervención alguna. No se incluye ningún parámetro de inmigración, ni ningún

mecanismo que interfiera con el modelo básico de dinámica urbana que hemos adaptado para esta aplicación y que se ha definido en el capítulo anterior. Por tratarse de un escenario conservador, se ha considerado la construcción de la infraestructura del alfoz como viviendas bajas de consumo medio (ver Anexo C).

### 5.2.1 Escenario básico

Dentro de las simulaciones en este escenario, primero mostramos los resultados de la situación más básica. Estudiamos la evolución de las diferentes variables bajo la hipótesis de ninguna presión externa de información sobre el recurso que pueda afectar al modelo de difusión de comportamiento,  $e_s = 0$  (inicialmente bajo el modelo de Young-Edwards). Tampoco incluimos el efecto que pudiese tener la difusión de ninguna innovación tecnológica de consumo o ahorro.

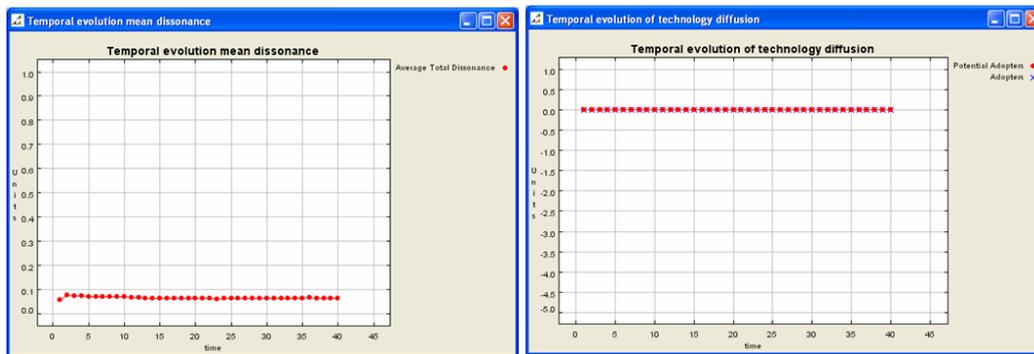
En la tabla 7 se muestran los parámetros utilizados en la configuración de la simulación.

**Tabla 7.** Parámetros utilizados para las simulaciones básicas del escenario 1<sup>113</sup>.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
p0	0.05	aP	0.3
IA	0.05	bP	0.7
numberOfCandidates	10	eS	0.0
zero	0.0	beta	5.0
veryLow	0.05	diffusion	YOUNG-EDWARDS
low	0.2	phi	2.0
intermediate	0.5	c	3.0
high	0.8	diffTechnology	BASS
veryHigh	0.95	advertisingEffectiveness	0.0010
delta	0.05	adoptionFraction	0.015
selfInfluence	0.3	tickOfInclusion	43.0
globalInfluence	0.3	probAdvEffBassCoupledAdd	0.05
localInfluence	0.4	multiplicative	true
decreaseRate_d	0.98	multiplicativeSave	0.9
weightStudies	0.2	additiveSave	-5.0
weightNationality	0.4	seasonal	MULTIPLICATIVE
weightWealthValue	0.4		
a	0.7		
b	0.3		

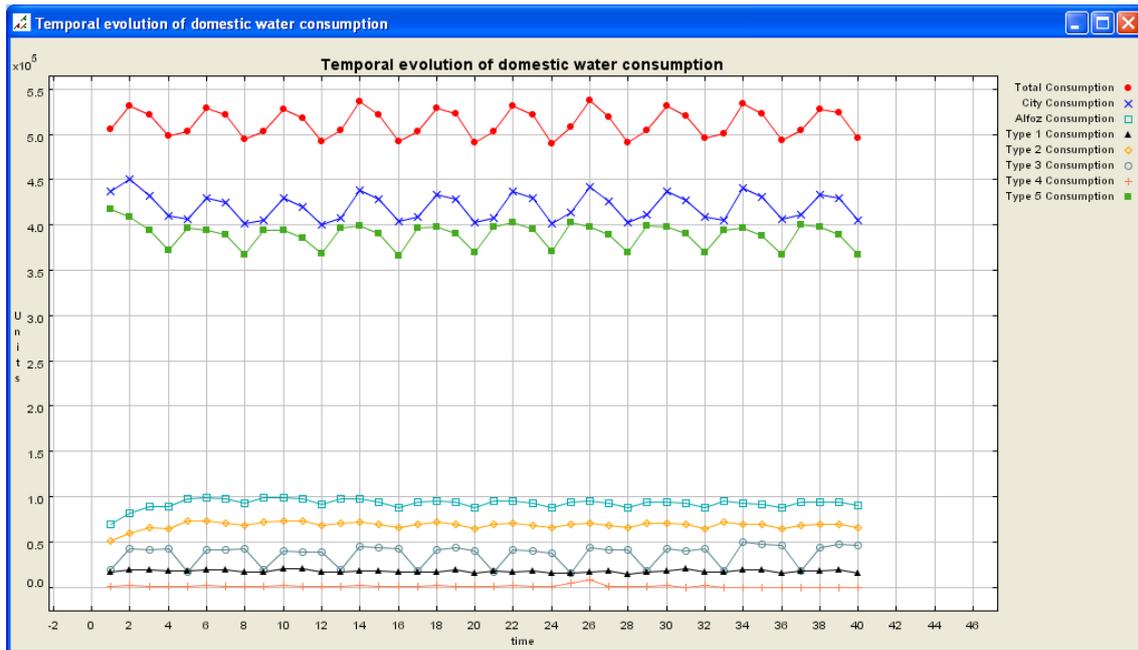
<sup>113</sup> Algunos de los valores de los parámetros, como todos aquellos relacionados con el modelo de difusión tecnológica, no tienen ningún efecto en el modelo puesto que no se incluye ninguna durante la simulación. Aun así, hemos decidido incluir todo el conjunto de parámetros para poder compararlos con simulaciones futuras.

Las siguientes imágenes muestran los principales resultados de una simulación típica efectuada bajo estos parámetros en este escenario. La figura 56 muestra los valores de disonancia a lo largo de la simulación, algo menores a 0.1, y la evolución de la adopción de una tecnología, obviamente cero puesto que hemos definido los parámetros bajo esta hipótesis.



**Figura 56.** Evolución de la disonancia media (izquierda) y de la difusión de la tecnología (derecha) en el escenario 1 básico.

La figura 57 resulta de mayor interés. En ella se muestra la evolución de consumo total en el núcleo urbano de Valladolid y en el alfoz, y su desagregación por tipologías de vivienda. La gráfica muestra un gradual aumento de consumo en el alfoz y de lento descenso en la ciudad. Este hecho se explica prácticamente en su totalidad por el aumento de la población en el alfoz a costa de población de la ciudad hasta un punto de saturación y equilibrio (figura 58).



**Figura 57.** Evolución temporal del consumo de agua doméstico en el Escenario 1 básico.

El movimiento urbano generado es consecuencia de valores bajos de disonancia de identidad cultural y de estudios, sobre todo en el segundo cinturón de la ciudad (figura 59), que gradualmente se cambian al alfoz. El consumo total permanece en valores estables como consecuencia de la definición de infraestructuras del alfoz, con tipologías de vivienda equivalentes a las de la ciudad en cuanto a consumo. Como analizaremos más adelante, este mismo escenario con tipologías de vivienda en el alfoz de mayor consumo explica aumentos de consumo totales en la región sin variación poblacional neta.

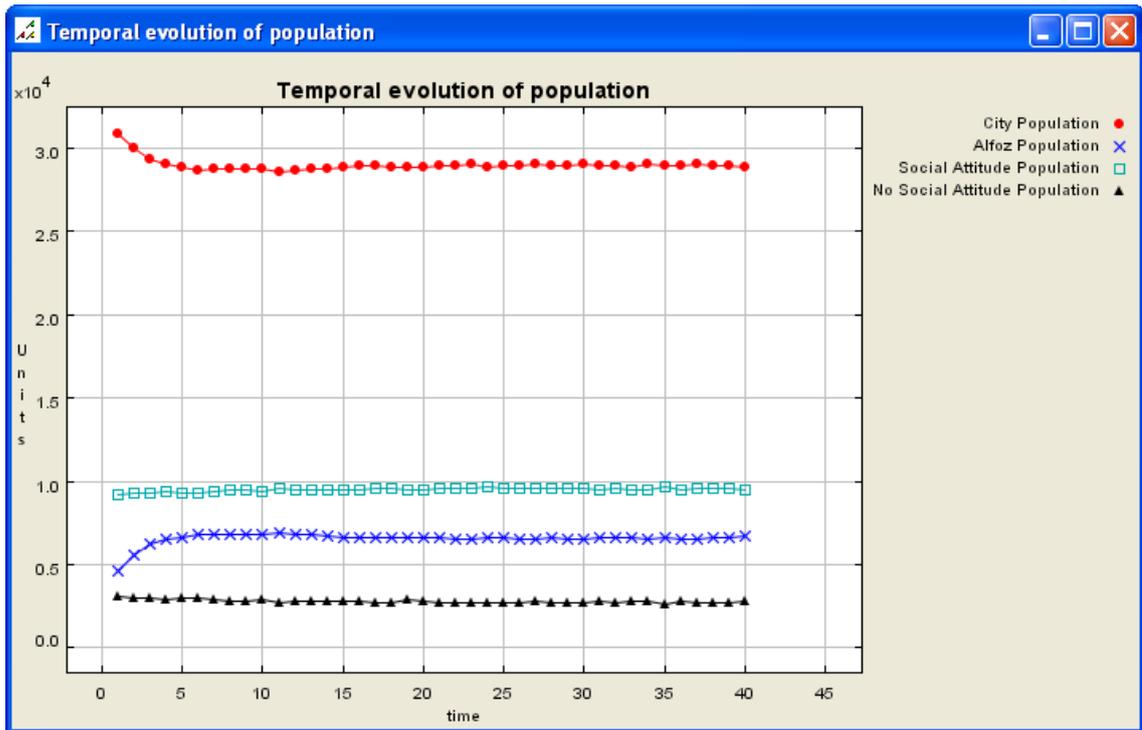


Figura 58. Evolución temporal de la población en el Escenario 1 básico.

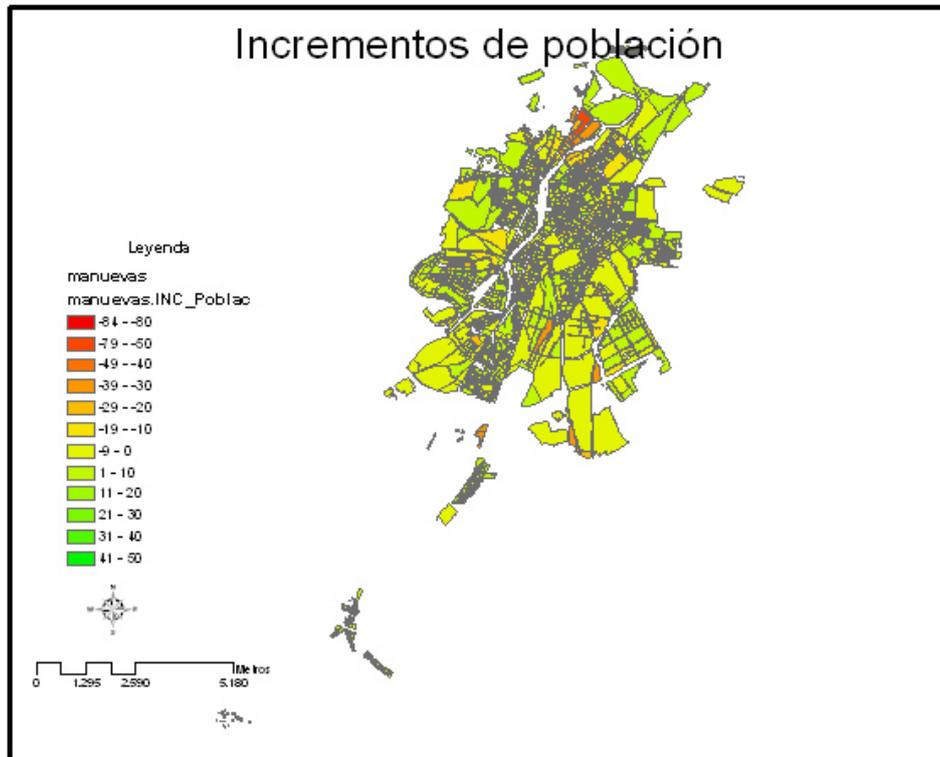
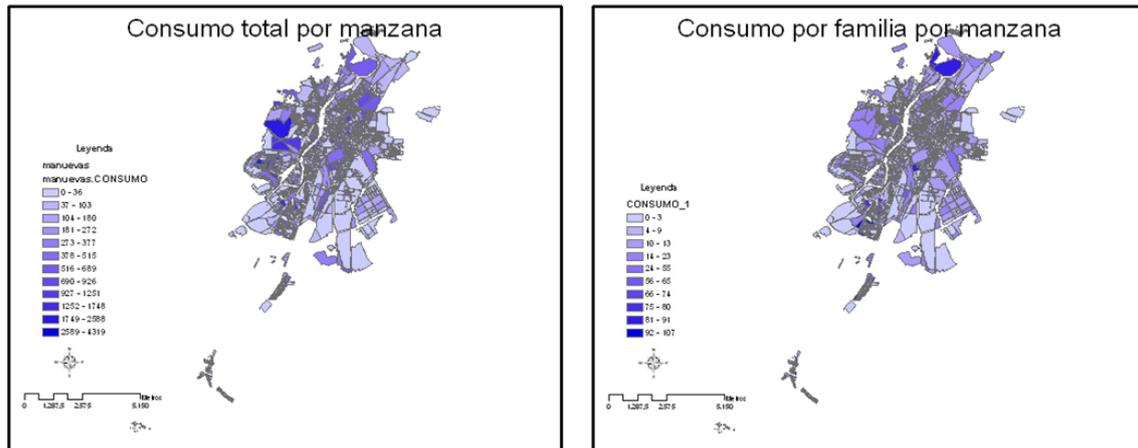


Figura 59. Mapa de los incrementos de población medidos en número de familias desde la situación inicial de la simulación a los resultados obtenidos bajo las hipótesis del Escenario 1 básico.

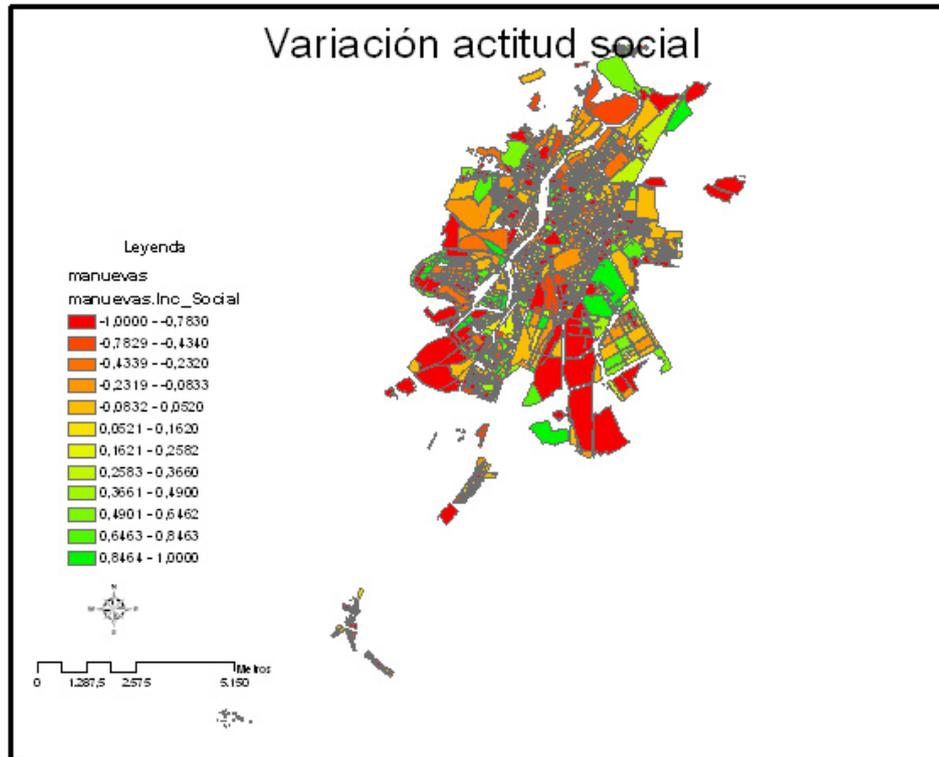
En la parte izquierda de la figura 60 se muestran los consumos absolutos por trimestre obtenidos tras las simulaciones. Estos consumos se explican principalmente por la densidad en cada manzana. En la parte derecha de la misma figura representamos el consumo normalizado por el número de agentes (familias) en cada manzana.



**Figura 60.** Mapa de consumo total por manzana (derecha) y de densidad por familia (izquierda) obtenidos en el Escenario 1 básico.

La figura 61 representa la variación media de actitud social frente a la configuración inicial<sup>114</sup> producida como resultado de las simulaciones. En ella se intuye cierta clusterización, que sería consecuencia del modelo de difusión de opinión de Young-Edwards, pero de la mera inspección visual no se pueden sacar conclusiones muy fuertes al respecto.

<sup>114</sup> Ver en el anexo C el proceso de configuración inicial.



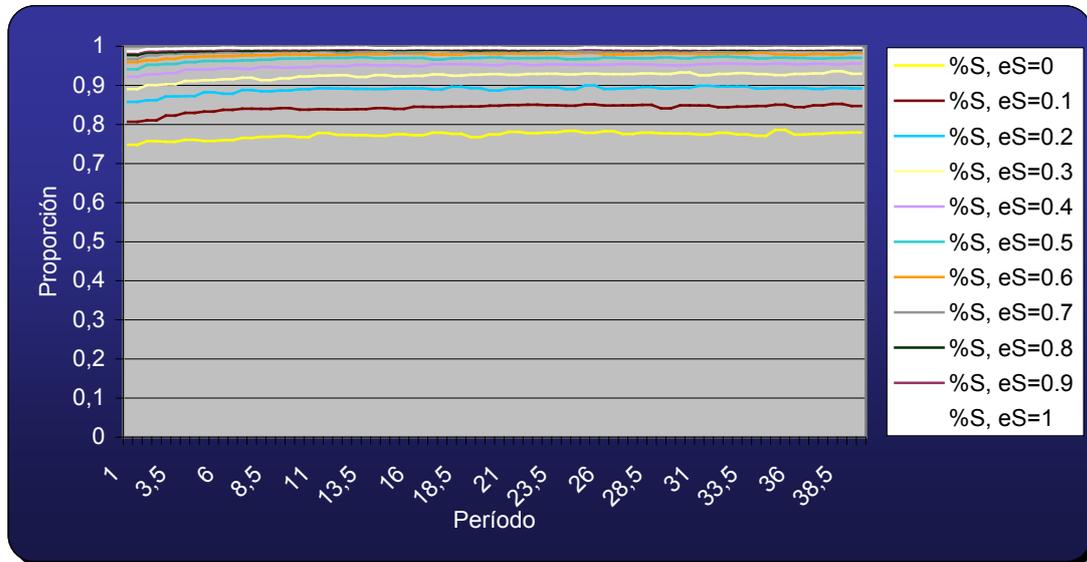
**Figura 61.** Mapa de variación de actitud social respecto a la situación inicial en el Escenario 1 básico.

### 5.2.2 Efecto del parámetro $e_S$ en la difusión de comportamiento

Un aspecto interesante para evaluar en este escenario es el efecto del parámetro de presión externa general sobre el recurso (que podría representar el efecto de los programas de conservación y eficiencia, educación y concienciación que vimos como instrumentos de gestión de la demanda en el primer capítulo de este trabajo). Además, resulta también de interés el efecto de ese mismo parámetro bajo diferentes submodelos de difusión de comportamiento para evaluar cómo de robusto resulta el sistema al cambio de submodelo.

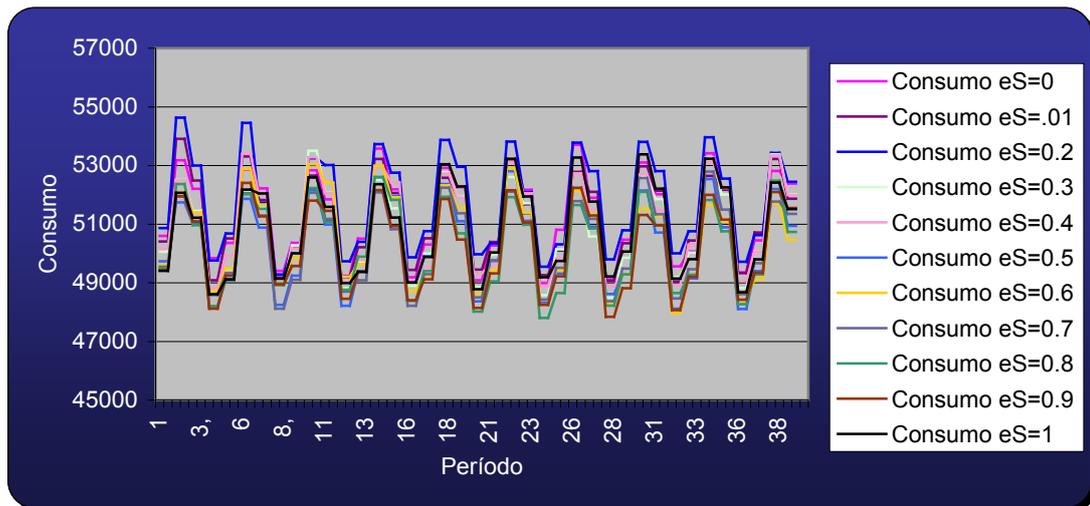
En la figura 62 se muestran los resultados obtenidos en el comportamiento respecto a la conservación del recurso. El estudio se ha realizado mediante el análisis de la variación del efecto de  $e_S$  de forma sistemática desde 0 hasta 1.0, en intervalos de 0.1, bajo el modelo de Young-Edwards con diez ejecuciones para cada parámetro. Se observa que a medida que aumenta el valor de  $e_S$ , mayor es la proporción de agentes con comportamiento solidario en el modelo. De hecho, para valores del

parámetro cercanos a 0.6, prácticamente la totalidad de la población adopta un comportamiento S.



**Figura 62.** Proporción de familias con comportamiento S en el Escenario 1 dependiendo del valor del parámetro  $e_s$ , y bajo la hipótesis de modelo de difusión de comportamiento de Young-Edwards.

La adopción de un comportamiento S (y por tanto indirectamente mayores valores del parámetro) implica un ahorro en el modelo debido al menor consumo de los agentes como se muestra en la figura 63. Pese a que las variaciones estocásticas no han sido eliminadas completamente con diez simulaciones, sí que existe una clara tendencia de ahorro, dependiendo del valor del parámetro respecto al escenario básico, que llega a suponer valores alrededor de un 2-3% en cuanto se alcanzan proporciones de comportamiento S cercanas a 1.



**Figura 63.** Efecto del parámetro  $e_s$  sobre el consumo a lo largo de los 40 trimestres en el Escenario 1 con el modelo de difusión de comportamiento de Young-Edwards.

Si estudiamos estos mismos efectos en el otro modelo de difusión de comportamiento que hemos implementado, toman importancia tres nuevos parámetros<sup>115</sup>: la proporción de agentes que consideramos influenciados localmente, la proporción que consideramos autoinfluciados y la proporción que consideramos influenciados globalmente. El valor de estos parámetros determina el *índice del endorsement*  $e_i$ , que tomará el valor 3 para el término que más influya al agente, y 1 y 2 con probabilidad 1/2 para cada uno de los otros factores de influencia. La escala de importancia de cada factor respecto a los demás se modela con el parámetro  $\psi$ . También toma importancia el valor  $c$  que determina la inercia de la población autoinfluciada.

Para estudiar posibles diferencias entre la adaptación del modelo basado en *endorsements* respecto al modelo de Young-Edwards, hemos considerado una población equilibrada con los parámetros que se recogen en la tabla 8:

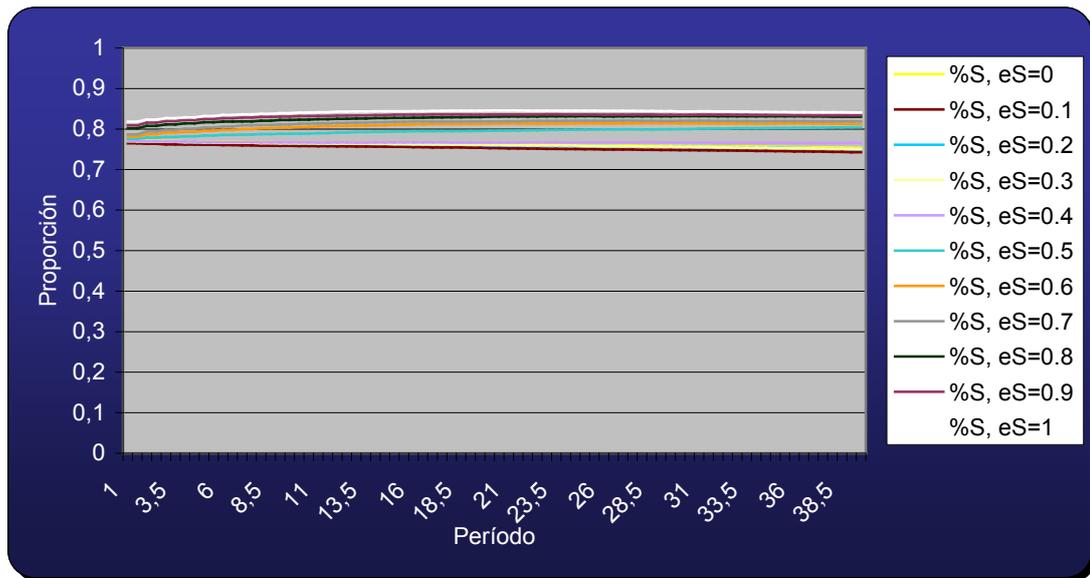
**Tabla 8.** Parámetros de configuración del modelo de difusión del comportamiento basado en el mecanismo de *endorsement*.

Parámetro	Valor
selfInfluence	0.3
globalInfluence	0.3
localInfluence	0.4

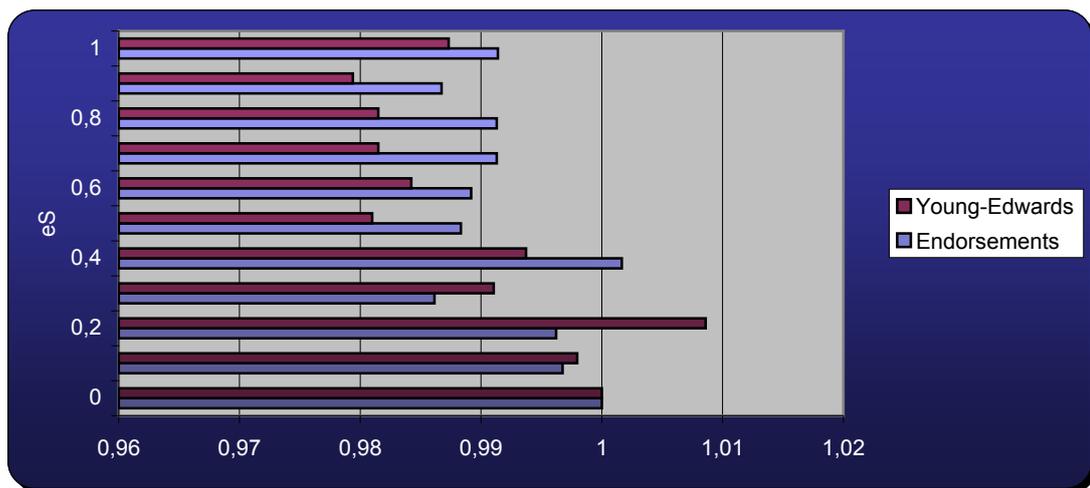
<sup>115</sup>En realidad son dos, el tercero queda determinado por el valor de los otros dos.

diffusion	ENDORSEMENT
phi	2.0
c	3.0

Con estos valores de los parámetros, y haciendo un estudio análogo al realizado con el modelo de Young-Edwards, obtenemos los siguientes resultados de adopción del comportamiento S a medida que varía el parámetro  $e_s$ . Se observa en la figura 64 que se encuentra la misma relación monótonica que en el caso anterior, a mayor presión mediática sobre el recurso mayor adopción de comportamiento S. Sin embargo, en este caso, el crecimiento es mucho menor que en el caso anterior. Mientras que en el modelo de Young-Edwards el parámetro actúa como un factor directo de empuje equivalente en todos los agentes del modelo, en nuestro modelo, sobre todo para valores altos de  $\psi$ , sólo actúa de forma directa en los agentes con influencia principal global. En el resto actúa de forma indirecta a través de la influencia local que generen los influenciados globalmente que ya han adoptado el comportamiento S, por lo que el efecto es menor. Además, como muestra la figura 65, el valor porcentual respecto a la situación en la que el parámetro es cero, para valores bajos de  $e_s$  el modelo de *endorsements* produce un ahorro mayor que el modelo de Young-Edwards. Este crecimiento se invierte para valores altos de  $e_s$ , donde la influencia directa del parámetro en todos los agentes consigue la difusión del comportamiento S de forma más fácil que en el modelo de *endorsement* a través de la influencia indirecta y con la dificultad de cambiar comportamientos en agentes autoinfluciados.

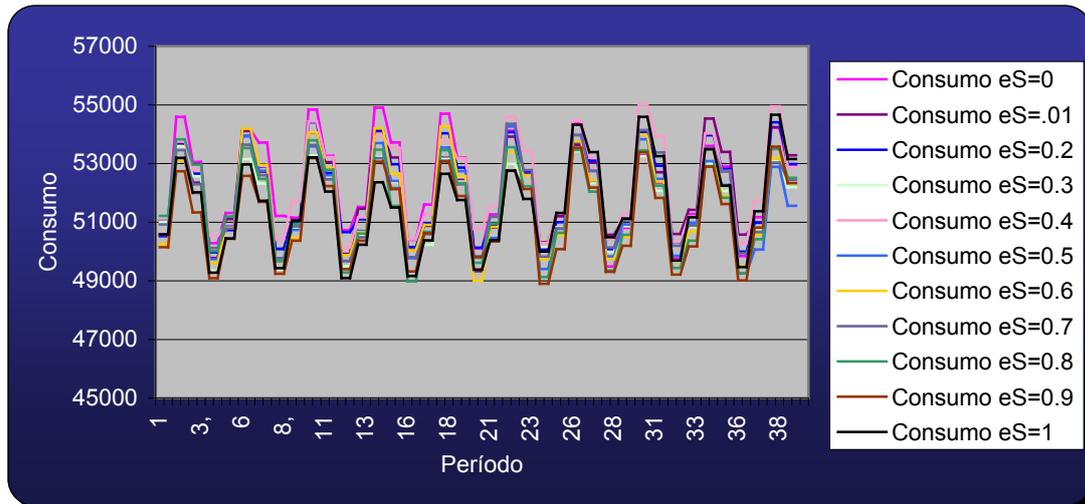


**Figura 64.** Proporción de familias con comportamiento S en el Escenario 1 dependiendo del valor del parámetro  $e_s$ , y bajo la hipótesis de modelo de difusión de comportamiento basado en *endorsements*.



**Figura 65.** Ahorro porcentual respecto a la situación  $e_s = 0.0$  en función del modelo de difusión del comportamiento y de  $e_s$ .

Vemos en la figura 66 el efecto sobre el consumo del valor del parámetro. El resultado en el modelo adaptado basado en *endorsement* es un descenso del consumo a medida que crece  $e_s$  (a pesar de que en determinados períodos las variaciones estocásticas del modelo pueden romper esa tendencia).



**Figura 66.** Efecto del parámetro  $e_s$  sobre el consumo a lo largo de los 40 trimestres en el Escenario 1 con el modelo de difusión de comportamiento basado en *endorsements*.

### 5.2.3 Efecto de los modelos de difusión tecnológica

En este escenario decidimos estudiar el efecto de la difusión de una innovación tecnológica doméstica de ahorro aditiva, bajo los diferentes modelos de difusión y con diferentes parámetros para comparar el efecto en el consumo que originan. Más concretamente, vamos a simular la adopción de cabezales de ducha de bajo consumo.

Estos dispositivos consisten en cabezales de ducha capaces de reducir el flujo de agua consumida de 12 litros por minuto, que típicamente tienen los grifos normales, a aproximadamente la mitad, sin disminuir la presión. Existen multitud de modelos que se pueden clasificar en dos tipos: los aireados o de burbujas y los de sistema de masaje. Los primeros se basan en mezclar el agua con aire para aumentar la presión y tienen como inconveniente que bajan la temperatura del agua muy rápido según cae. El segundo sistema mantiene el agua con presión y caliente haciendo que el agua no salga de forma continua sino mediante pulsaciones. Estos últimos suelen ser algo más caros.

En cualquiera de los casos, bajo la hipótesis de una ducha de cinco minutos diarios por persona, un dispositivo de este tipo podría suponer un ahorro de

aproximadamente  $2,7m^3$  por persona y trimestre. Vamos a estudiar el efecto de esta medida en el escenario 1 bajo diferentes modelos de difusión del producto.

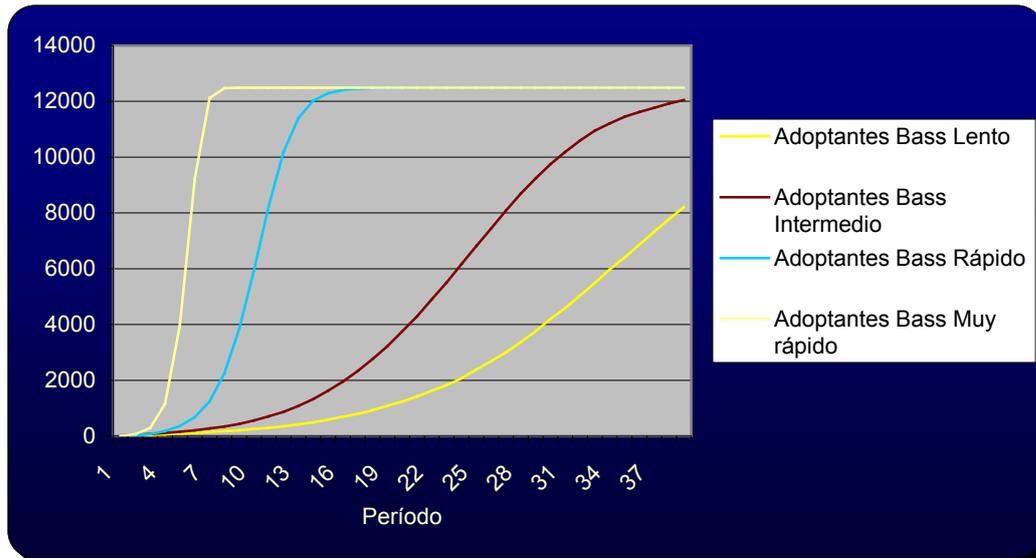
Un primer estudio es analizar el efecto sobre el consumo que tiene la adopción del dispositivo mediante el modelo de Bass con cuatro perfiles de velocidad de adopción diferentes: perfil lento, medio, rápido y muy rápido (tabla 9). Hemos considerado que el proceso de difusión comienza en el período (trimestre) 1.

**Tabla 9.** Parámetros de definición de los diferentes perfiles de adopción de una innovación tecnológica en el modelo de Bass<sup>116</sup>.

Perfil de adopción lento		Perfil de adopción intermedio	
diffTechnology	BASS	diffTechnology	BASS
advertisingEffectiveness	0.0010	advertisingEffectiveness	0.0015
contactRate	10.0	contactRate	10.0
adoptionFraction	0.015	adoptionFraction	0.015
tickOfInclusion	1.0	tickOfInclusion	1.0
Perfil de adopción rápido		Perfil de adopción muy rápido	
diffTechnology	BASS	diffTechnology	BASS
advertisingEffectiveness	0.0010	advertisingEffectiveness	0.0010
contactRate	30.0	contactRate	10.0
adoptionFraction	0.03	adoptionFraction	0.3
tickOfInclusion	1.0	tickOfInclusion	1.0

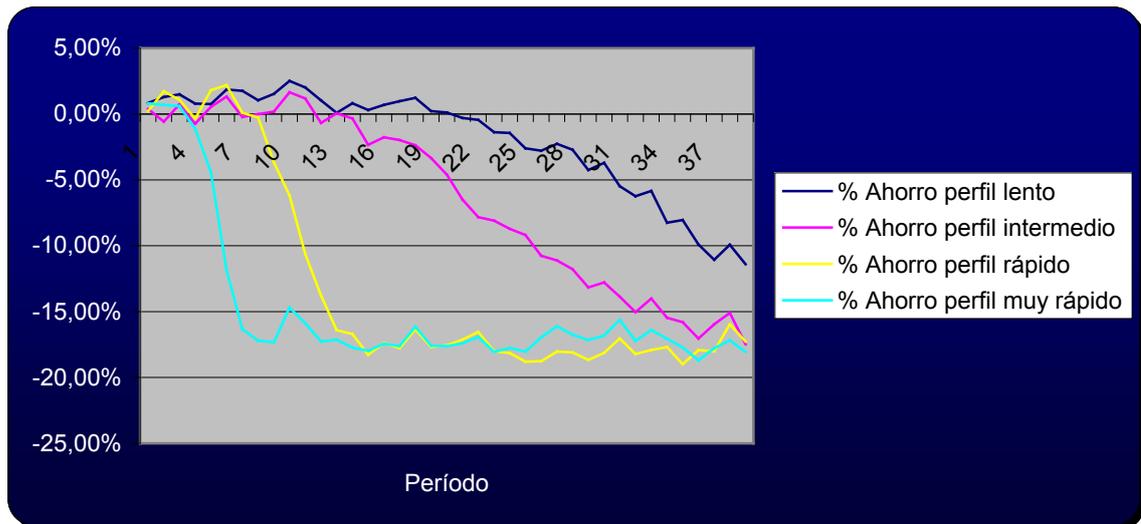
Los resultados obtenidos son consecuentes con los resultados predichos por el modelo diferencial de Bass. Se alcanza la forma sigmoïdal predicha con mayor o menor velocidad en función de los parámetros que determinan el perfil (figura 67).

<sup>116</sup> El parámetro  $q$  corresponde a  $contactRate * adptionFraction$ , el factor  $p$  corresponde a  $advertisingEffectiveness$ .



**Figura 67.** Curvas de adopción de la innovación tecnológica bajo los diferentes perfiles en el Escenario 1.

Estos perfiles de adopción a su vez generan modificaciones en el consumo respecto al escenario básico 1. Para cuantificar el efecto de la adopción de una medida de conservación como la utilización de cabezales de bajo flujo, en la figura 68 representamos el porcentaje de ahorro alcanzado frente al escenario sin adopción tecnológica. Vemos que existen desviaciones estocásticas que pueden llegar a  $\pm 2\%$  del valor de referencia. Sin embargo el efecto de la adopción es patente en el modelo de forma muy importante. En cuanto el proceso de adopción tecnológico se generaliza, el ahorro total respecto al escenario inicial llega a ser del orden del 15%-20% trimestral del consumo doméstico total, que en términos globales supone un ahorro muy considerable.



**Figura 68.** Porcentaje de ahorro en el consumo total respecto al Escenario 1 básico generado por la innovación tecnológica en el Escenario 1 bajo diferentes perfiles de velocidad de adopción.

Integrar el modelo de Bass con el resto del modelo general tiene mucho más interés cuando estudiamos el acoplamiento del proceso de adopción con el proceso de difusión del comportamiento. Así, cabe pensar que un aumento de la presión para la concienciación general sobre el estado del recurso, modelado por el parámetro  $e_s$ , tenga efecto en la adopción tecnológica, sin necesidad de perfiles altos de adopción específica de la innovación.

Es decir, puede ocurrir que el efecto general de concienciación repercuta de manera indirecta sobre la adopción de la medida de ahorro, aunque la presión mediática específica de adopción de esa medida en concreto no tenga valores muy altos. Para estudiar nuestra hipótesis, y puesto que ya se ha demostrado que el modelo de difusión de comportamiento utilizado marca la inercia del sistema a la respuesta del parámetro general de información del recurso, hemos ideado una batería de simulaciones con diferentes parámetros y bajo la hipótesis del modelo de Bass acoplado.

La tabla 10 muestra los parámetros respecto al escenario 1 que definen el análisis que hemos realizado del modelo de Bass acoplado:

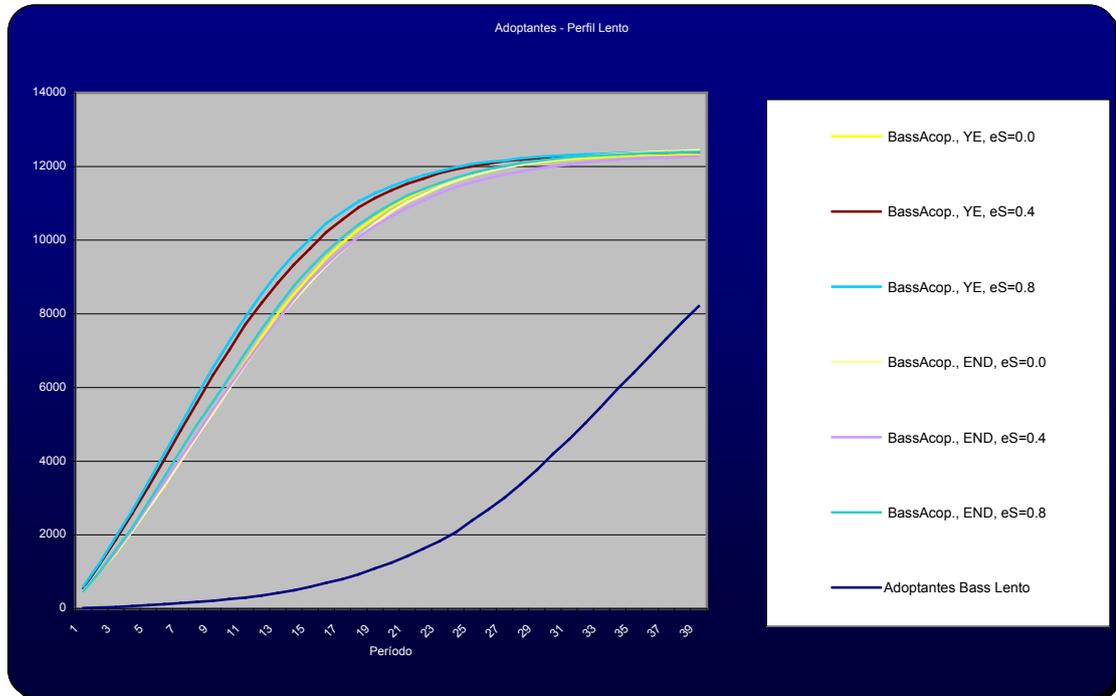
**Tabla 10.** Parámetros de definición del perfil de velocidad de adopción del modelo de difusión de la innovación en el modelo de Bass acoplado. En cada perfil se estudia el efecto del modelo de difusión del comportamiento y de  $e_s$ .

Perfil de adopción lento			
diffTechnology	BASS COUPLED	diffusion	YOUNG-EDWARDS
advertisingEffectiveness	0.0010		ENDORSEMENT
contactRate	10.0	eS	0
adoptionFraction	0.015		0,4
tickOfInclusion	1.0		0,8
probAdvEffBassCoupledAdd	0.05		
Perfil de adopción intermedio			
diffTechnology	BASS COUPLED	diffusion	YOUNG-EDWARDS
advertisingEffectiveness	0.0015		ENDORSEMENT
contactRate	10.0	eS	0
adoptionFraction	0.015		0,4
tickOfInclusion	1.0		0,8
probAdvEffBassCoupledAdd	0.05		
Perfil de adopción rápido			
diffTechnology	BASS COUPLED	diffusion	YOUNG-EDWARDS
advertisingEffectiveness	0.0010		ENDORSEMENT
contactRate	30.0	eS	0
adoptionFraction	0.03		0,4
tickOfInclusion	1.0		0,8
probAdvEffBassCoupledAdd	0.05		

El primer resultado del análisis del efecto del modelo de Bass acoplado se muestra en la figura 69. Las simulaciones reflejan un cambio de convexidad en las curvas de adopción. Las altas proporciones de agentes con comportamiento S en el modelo tienen una tasa de adopción más alta, generando un doble efecto positivo: un efecto directo de mayor adopción, pero también un segundo efecto indirecto a través de la tasa de contagio.

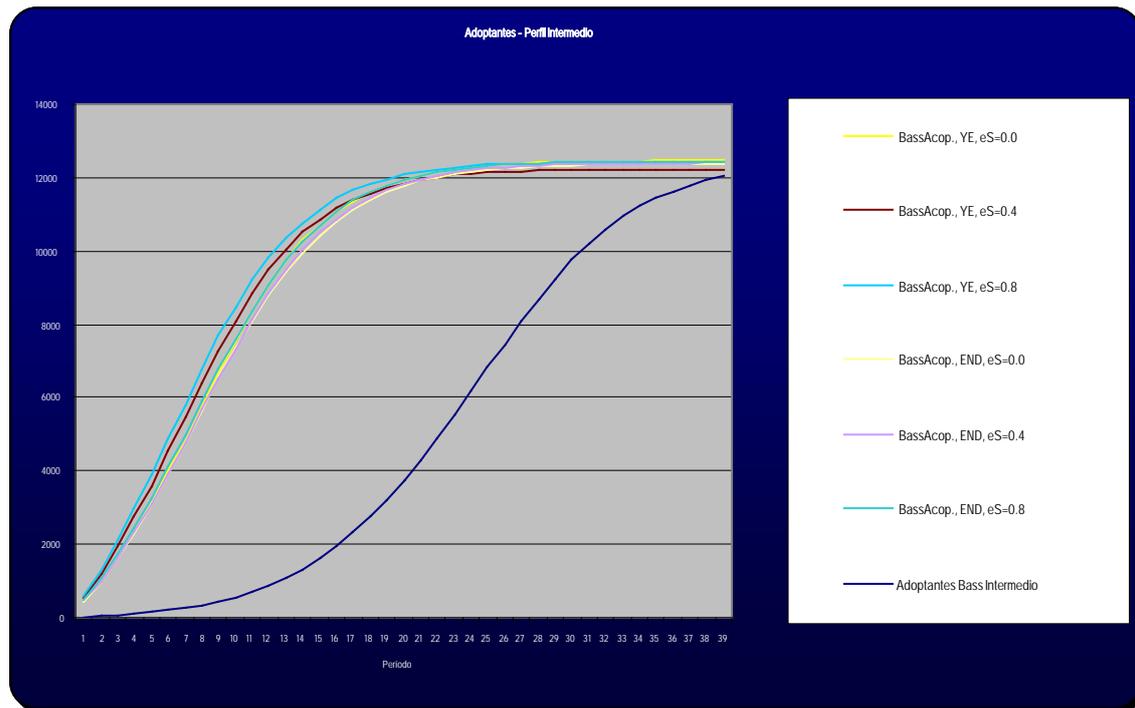
En la misma figura se observa que las tasas de adopción más altas se producen, para cada modelo de difusión de comportamiento, con mayores valores del parámetro  $e_s$ . Este efecto se puede explicar fácilmente, puesto que mayores valores del parámetro implican mayor crecimiento del comportamiento S y por tanto mayor probabilidad de adoptar la innovación tecnológica. Este efecto, a su vez, genera mayor velocidad de adopción por contagio. Además se puede observar que la tasa de adopción es mayor con el modelo de comportamiento de Young-Edwards que con el modelo basado en el comportamiento de *endorsement*, y que el efecto se agudiza para mayores valores de presión mediática sobre el recurso. Este hecho también tiene

sentido puesto que la mayor inercia que genera el comportamiento autoinfluido en el modelo de *endorsements* frente al parámetro  $e_s$ , también ralentiza el proceso de adopción.



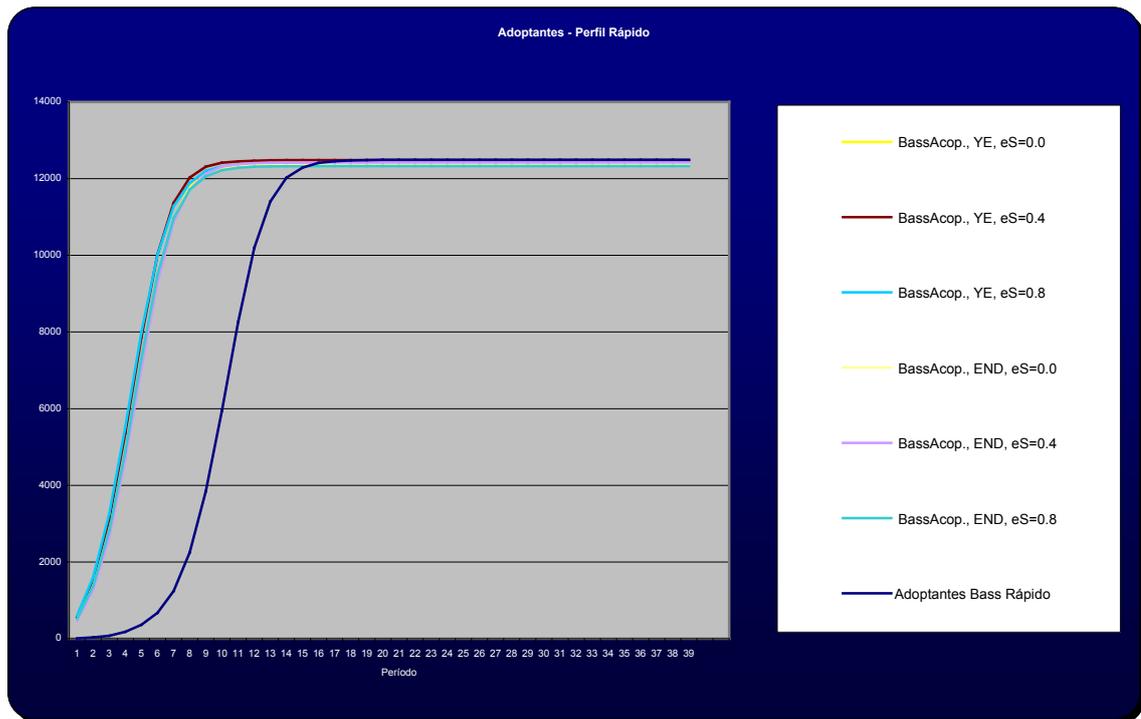
**Figura 69.** Curvas de adopción de la innovación tecnológica en el modelo de Bass acoplado, con perfil de adopción lento, para los diferentes modelos de difusión de comportamiento y de  $e_s$  en el Escenario 1.

En la figura 70 se hace un análisis análogo al anterior, pero para un perfil de velocidad de adopción intermedio. Las conclusiones generales para el perfil de velocidad de adopción lenta se mantienen en este caso. El modelo de Bass acoplado aumenta la velocidad de adopción hasta cambiar la convexidad de la curva S, y el efecto del parámetro  $e_s$  y del modelo de difusión del comportamiento tienen la misma tendencia.



**Figura 70.** Curvas de adopción de la innovación tecnológica en el modelo de Bass acoplado, con perfil de adopción intermedio, para los diferentes modelos de difusión de comportamiento y de  $e_s$  en el Escenario 1.

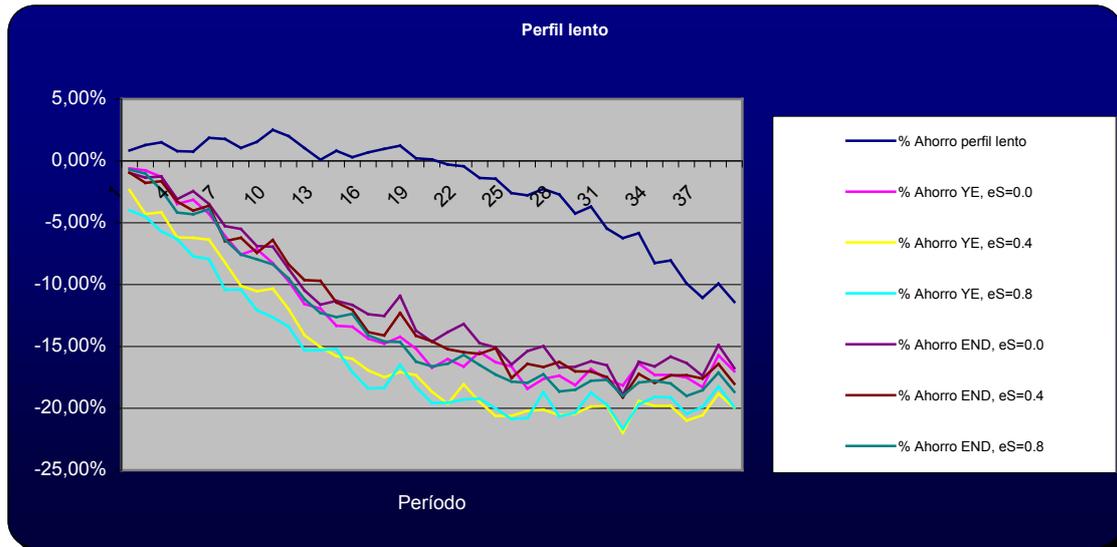
Cuando el perfil de adopción de la innovación tecnológica es rápido de por sí (figura 71), el efecto del modelo de Bass acoplado, aunque sensible, es menos influyente. Aunque se conservan las conclusiones del resto de perfiles de velocidad analizados, las diferencias generadas entre los diferentes parámetros no son tan importantes como en los otros casos. Esto se debe a que independientemente de la presión mediática sobre el recurso, e independientemente del modelo de difusión del comportamiento, la adopción se produce en muy poco tiempo y por tanto sus efectos también.



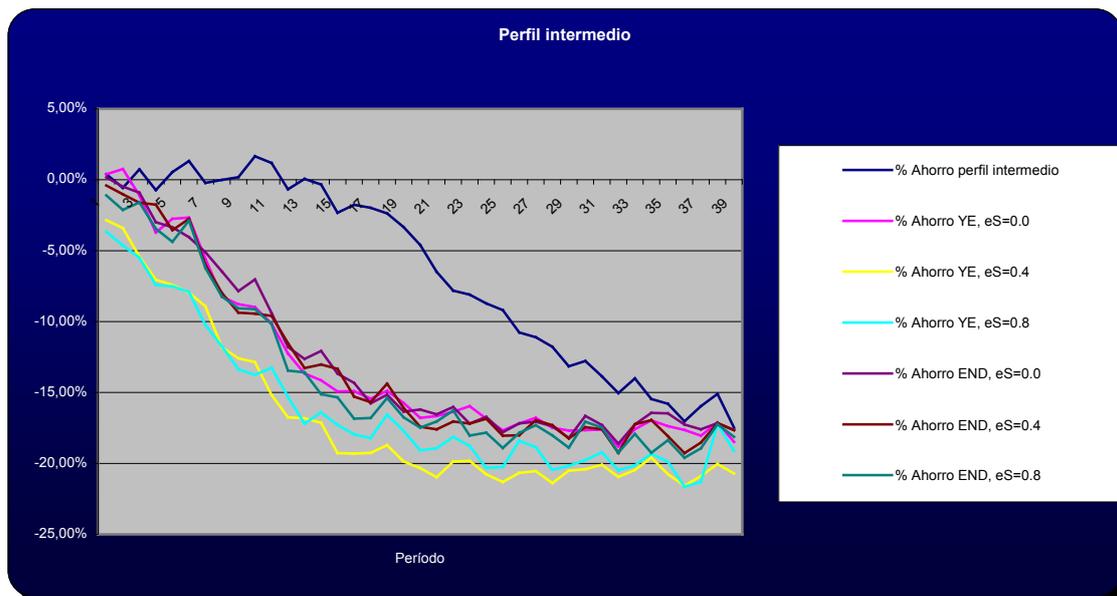
**Figura 71.** Curvas de adopción de la innovación tecnológica en el modelo de Bass acoplado, con perfil de adopción rápido, para los diferentes modelos de difusión de comportamiento y de  $e_s$  en el Escenario 1.

Si analizamos no sólo la difusión, sino también el efecto que provoca sobre el consumo total, veremos que el efecto del modelo de Bass acoplado es muy significativo. Bajo un perfil de adopción lento (figura 72) las diferencias son muy importantes. Mientras que con el modelo de Bass se podían conseguir al cabo de 10 años ahorros cercanos al 10% anual debido a la adopción, con el modelo de Bass acoplado, el ahorro alcanza un mínimo del 15% al cabo de ese tiempo (además obtenido mucho antes, por lo que el ahorro total es mucho mayor).

Asimismo, tanto en esta figura como en las siguientes (figura 73 y figura 74) se aprecia el efecto combinado de los dos modelos de difusión. A la vez que la adopción tecnológica en este escenario genera un ahorro del 15%, el efecto sobre el comportamiento de altos valores de  $e_s$  aumenta el ahorro, no sólo acelerando el proceso de adopción, sino también reduciendo propiamente los hábitos de consumo. De esta forma pueden conseguirse, en los casos más favorables (mayores valores de  $e_s$  bajo el modelo de difusión del comportamiento de Young-Edwards) ahorros de hasta un 20% sobre el escenario 1 básico.



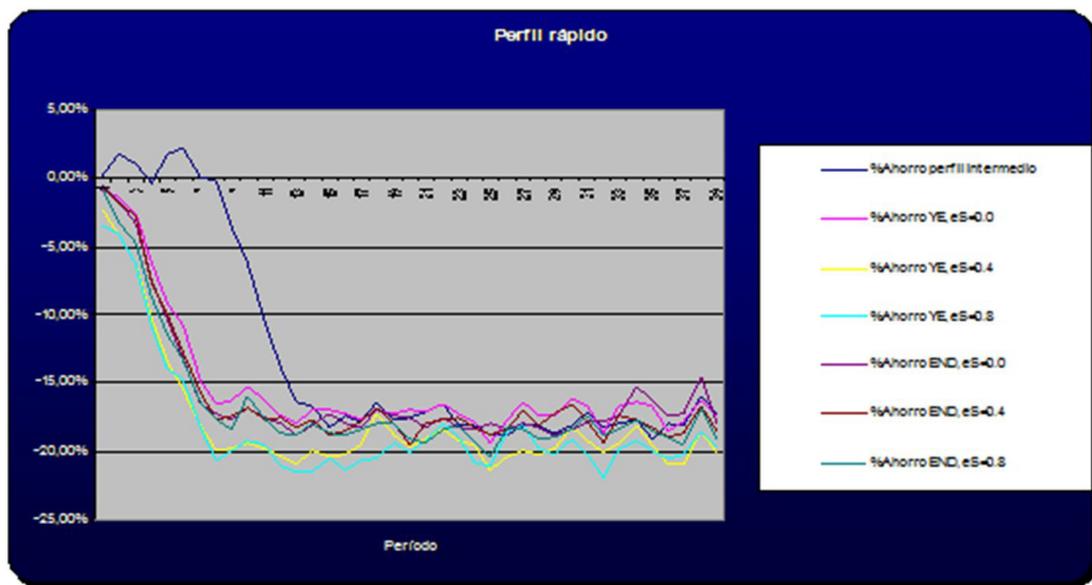
**Figura 72.** Porcentaje de ahorro en el consumo total respecto al Escenario 1 básico, generado por la innovación tecnológica en el modelo de Bass acoplado con perfil de adopción lento, en el Escenario 1 y bajo diferentes modelos de difusión de comportamiento y valores de  $e_s$ .



**Figura 73.** Porcentaje de ahorro en el consumo total respecto al Escenario 1 básico, generado por la innovación tecnológica en el modelo de Bass acoplado con perfil de adopción intermedio, en el Escenario 1 y bajo diferentes modelos de difusión de comportamiento y valores de  $e_s$ .

Como ya habíamos intuido, en el caso de un perfil de adopción de la medida tecnológica de ahorro rápido, es donde el efecto del modelo de Bass acoplado a una campaña de concienciación tiene una menor importancia. El ahorro se produce en poco tiempo con independencia del modelo de difusión de comportamiento y de

presión sobre el recurso, aunque este parámetro influye en el ahorro final alcanzado igual que con el resto de perfiles.



**Figura 74.** Porcentaje de ahorro en el consumo total respecto al Escenario 1 básico, generado por la innovación tecnológica en el modelo de Bass acoplado con perfil de adopción rápido, en el Escenario 1 y bajo diferentes modelos de difusión de comportamiento y valores de  $e_s$ .

Un resultado importante que podemos obtener del análisis global de todos los perfiles de adopción para todos los conjuntos de parámetros simulados (figura 75 y figura 76), es que en muchos casos, sobre todo cuando no se trata de perfiles de adopción ya de por sí muy rápidos, y bajo el modelo de Bass acoplado, la velocidad de adopción de una innovación se puede acelerar incrementando la velocidad del perfil de adopción específica de la innovación, mediante campañas específicas por ejemplo del producto del que se trate, o bien mediante campañas más generales de concienciación que de forma indirecta generan efectos equivalentes.

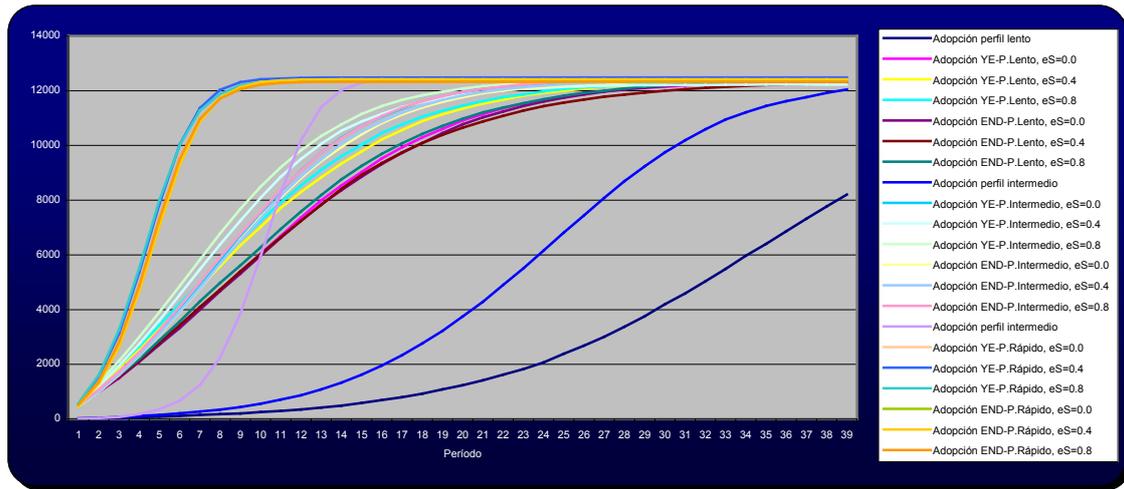


Figura 75. Curvas de adopción tecnológica en el Escenario 1.

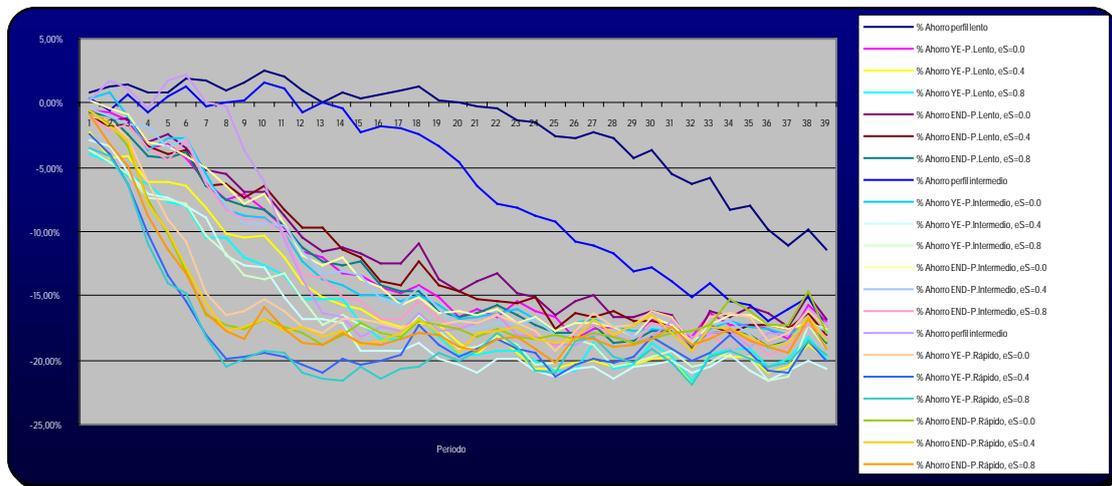


Figura 76. Ahorro sobre el Escenario básico 1.

### 5.3 Escenario 2

En el segundo escenario analizamos el efecto de la llegada de inmigración extranjera a la ciudad, la dinámica urbana que generaría este tipo de inmigración, así como el efecto sobre el consumo.

El escenario se caracteriza por la misma configuración que el escenario anterior pero con la llegada de 25 familias inmigrantes por trimestre, que se añaden al conjunto M de potenciales migrantes del modelo de dinámica urbana. Consideramos llegada de inmigración de niveles de riqueza bajos, puesto que quizá

sea este tipo el que pueda causar mayor disonancia en la dinámica urbana. Las características de la población inmigrante modelada se resumen en la tabla 11:

**Tabla 11.** Parámetros de configuración de la población inmigrante en el Escenario 2.

Parámetro	Valor
Familias por trimestre	25
probActSocial	0
probAnalf	0.15
probBachillerato	0.05
probExtranjero	1.0
Riqueza	1.3
Miembros	5

### 5.3.1 Escenario básico

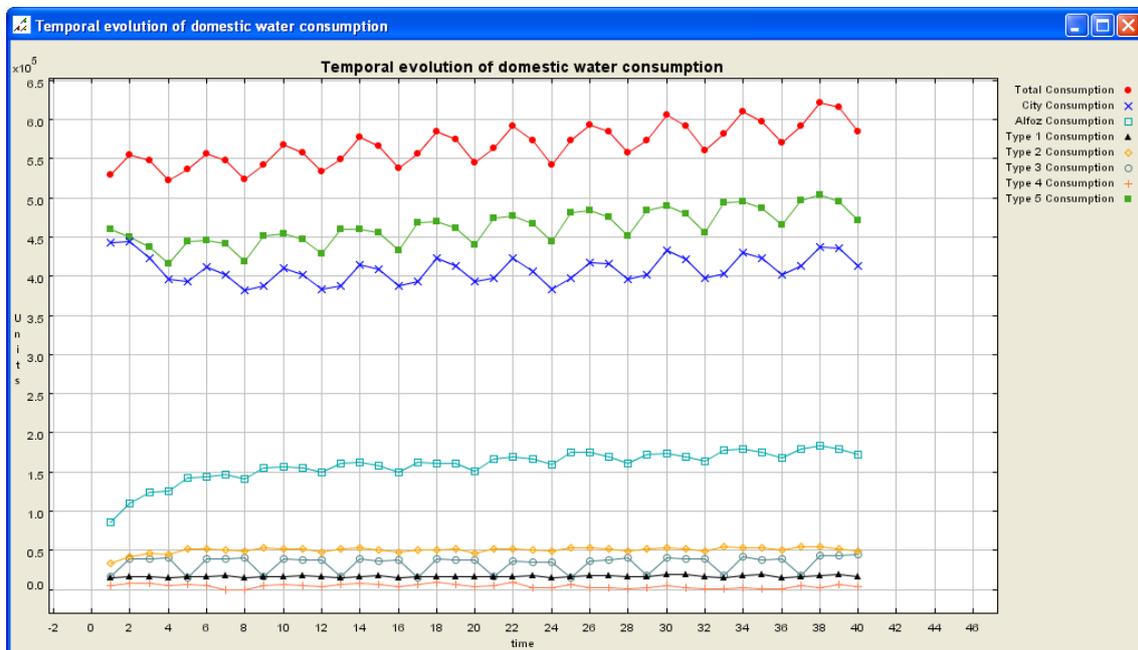
De la misma forma que en el análisis del escenario anterior, comenzábamos estudiando la evolución del escenario bajo las hipótesis de ninguna presión externa de información sobre el recurso que pudiese tener influencia en el modelo de difusión de comportamiento (inicialmente con el modelo de Young-Edwards y  $e_s = 0$ ), y de ausencia de cualquier tipo de innovación tecnológica. Así conseguiremos aislar, en cierta medida, el efecto de la inmigración que caracteriza este escenario, frente a los resultados del escenario 1 básico y posteriormente analizar de forma pormenorizada el efecto de otros parámetros en este mismo escenario. La tabla 12 recoge los parámetros utilizados por defecto en este escenario, se puede comprobar que corresponden al mismo conjunto de parámetros iniciales que en el escenario 1.

**Tabla 12.** Parámetros utilizados para las simulaciones básicas del escenario 2.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
p0	0.05	aP	0.3
IA	0.05	bP	0.7
numberOfCandidates	10	eS	0.0
zero	0.0	beta	5.0
veryLow	0.05	diffusion	YOUNG-EDWARDS
low	0.2	phi	2.0
intermediate	0.5	c	3.0
high	0.8	diffTechnology	BASS
veryHigh	0.95	advertisingEffectiveness	0.0010
delta	0.05	adoptionFraction	0.015
selfInfluence	0.3	tickOfInclusion	43.0
globalInfluence	0.3	probAdvEffBassCoupledAdd	0.05

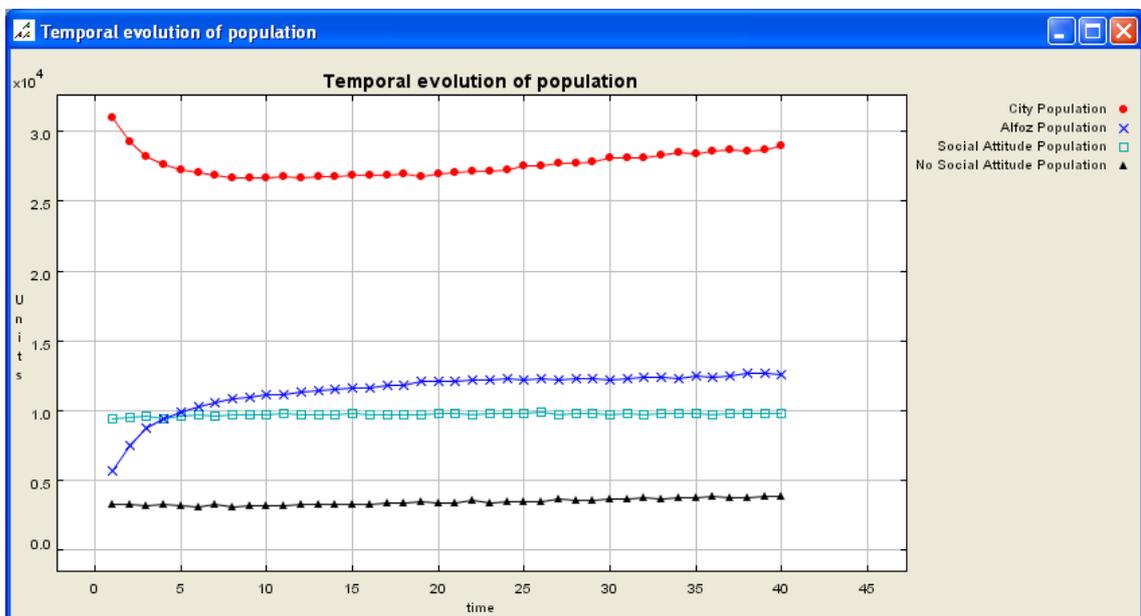
<b>localInfluence</b>	0.4	<b>multiplicative</b>	true
<b>decreaseRate_d</b>	0.98	<b>multiplicativeSave</b>	0.9
<b>weightStudies</b>	0.2	<b>additiveSave</b>	-5.0
<b>weightNationality</b>	0.4	<b>seasonal</b>	MULTIPLICATIVE
<b>weightWealthValue</b>	0.4		
<b>a</b>	0.7		
<b>b</b>	0.3		

La figura 77 muestra la evolución del consumo total por tipologías de vivienda, y dividido en alfoz y núcleo urbano de Valladolid. La gráfica muestra un consumo total en la región con una ligera tendencia ascendente. Este aumento se debe principalmente al aumento de consumo en el alfoz, puesto que el consumo en el núcleo urbano es mucho más constante. Si miramos la evolución de la población en este escenario (figura 78), vemos que respecto al escenario 1 se producen dos efectos: un aumento total de la población debido a la inmigración, y un movimiento de trasvase de la ciudad al alfoz, que ya teníamos en el primer escenario, pero que se ve ahora agudizado. La composición de ambos movimientos genera unos efectos netos de mantenimiento de la población en el núcleo de la ciudad, y un aumento mayor de la población en el alfoz (figura 78).



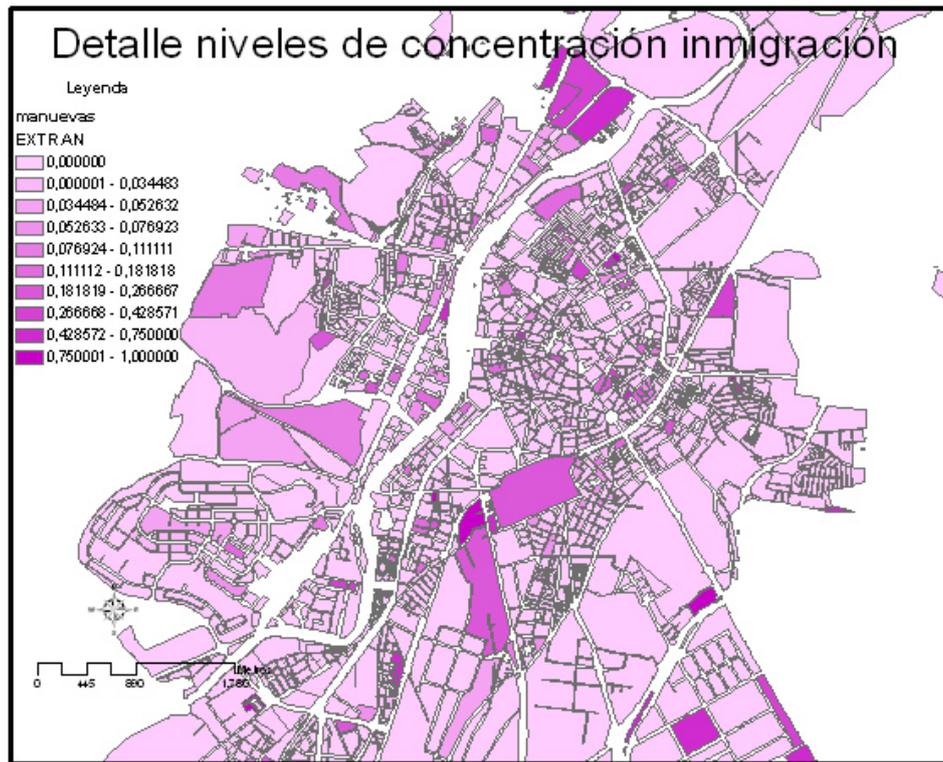
**Figura 77.** Evolución temporal del consumo de agua doméstico en el Escenario 2 básico.

El movimiento urbano generado, más acusado que en el primer escenario, es consecuencia de la llegada de población inmigrante, sobre todo en las zonas residenciales del núcleo de la ciudad en su segundo y tercer cinturón. Por ejemplo, en la figura 79 se muestra el detalle de los diferentes niveles<sup>117</sup> de concentración de inmigración en la ciudad, observando como se alcanzan altas concentraciones en barrios como Vadillos, Circular, La Rondilla, Barrio España, etc. Esta llegada, por un lado deprecia las zonas (porque estamos bajo el supuesto de inmigración de rentas bajas), de manera directa y a través de las vecindades, y por otro, aumenta la disonancia con la población no extranjera en función de la matriz de disonancias, que en este primer análisis tiene valores medios. El aumento de disonancia genera un movimiento rápido de población hacia el alfoz.



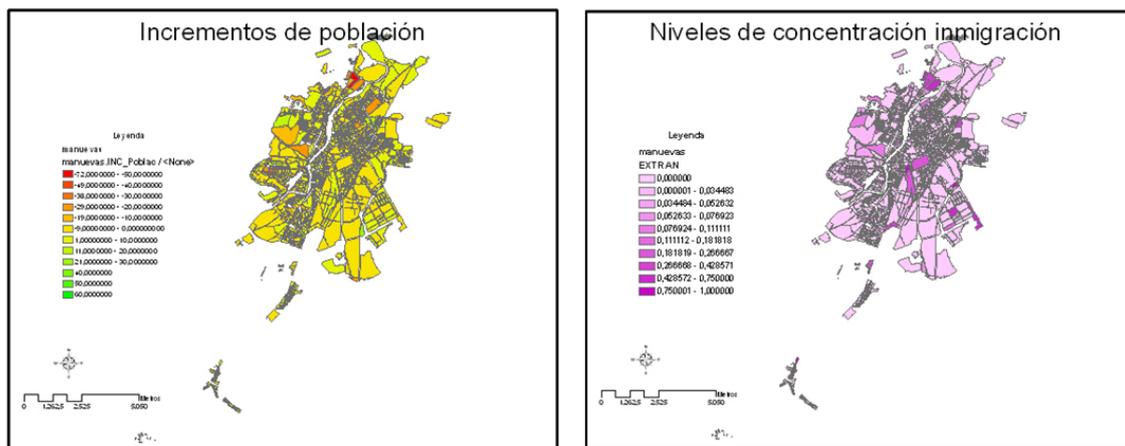
**Figura 78.** Evolución temporal de la población en el Escenario 2 básico.

<sup>117</sup> Los intervalos están configurados para maximizar el poder de discriminación de los grupos, no son intervalos regulares.



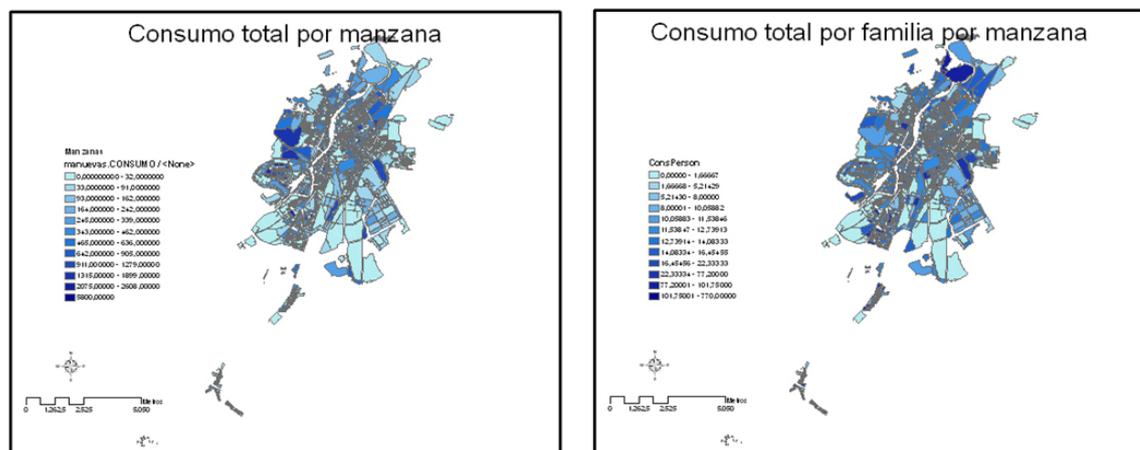
**Figura 79.** Mapa de una zona de Valladolid con los niveles de concentración de inmigración.

Si observamos los incrementos de población de la figura 80 (izquierda) y los comparamos con los que obteníamos en el escenario 1 básico, vemos que aunque los decrementos son menores, en muchas zonas no hay crecimiento, el crecimiento principal, en términos netos, se produce en el alfoz. En la parte izquierda de la misma figura, vemos el mapa general de proporción de inmigración en la ciudad de Valladolid, donde se observan las zonas de mayor concentración en los barrios de la periferia de menor poder adquisitivo y no en los barrios centrales ni en los nuevos barrios residenciales de mayor valor.



**Figura 80.** Mapa de los incrementos de población medidos en número de familias desde la situación inicial de la simulación a los resultados obtenidos bajo las hipótesis del Escenario 2 básico (izquierda), y de los niveles de concentración de inmigración (derecha).

En cuanto al consumo por manzana en la ciudad, los datos son un poco más altos que en el escenario 1, pero simplemente por el pequeño aumento de la población en la ciudad respecto al caso anterior.



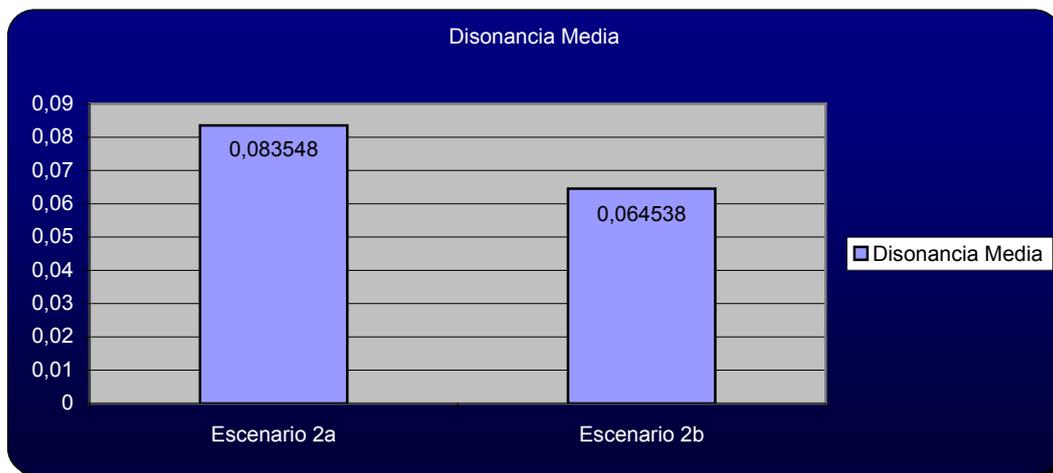
**Figura 81.** Mapa de consumo total por manzana (derecha) y de densidad por familia (izquierda) obtenidos en el Escenario 2 básico.

Un aspecto interesante que conviene analizar es la influencia en el proceso que tiene la disonancia debida exclusivamente a la diferente nacionalidad. En el escenario 2 básico hemos utilizado la matriz de disonancias que habíamos definido por defecto para las simulaciones. En ella los valores de disonancia son relativamente altos, lo cual podría explicar de manera importante la formación de clusters de

inmigración y la dinámica general centrífuga. pero ¿qué ocurre si consideramos matrices de disonancias por nacionalidad menores? Ese es el objetivo del siguiente análisis que hemos realizado con el escenario 2. Hemos sustituido la matriz por la siguiente:

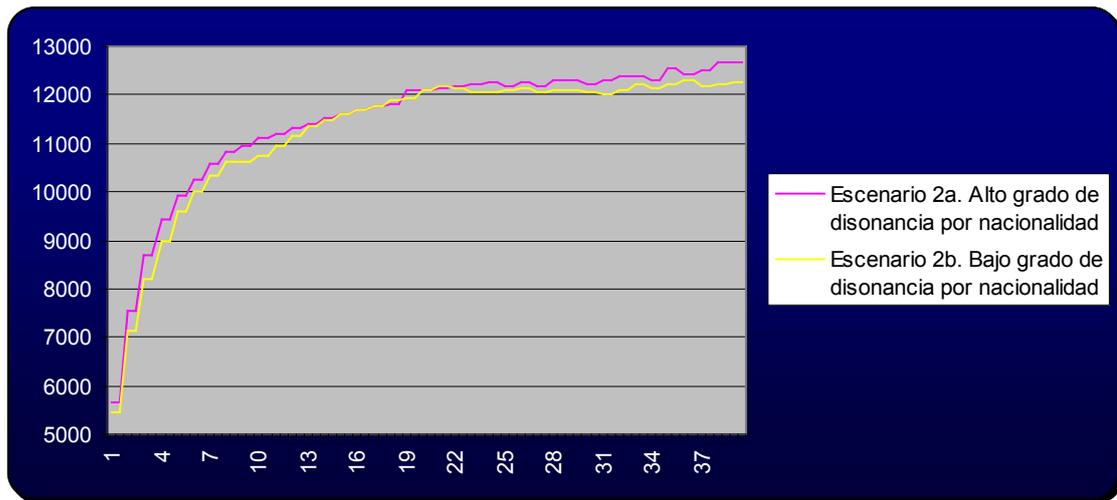
$$D_{Nationality} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & Zero & Intermediate \\ 0 & Low & Zero \end{pmatrix}$$

Bajo esta hipótesis, los valores de disonancia media bajan ligeramente (figura 82), y en consecuencia el número de cambios de vivienda y la velocidad de movimientos dinámicos.



**Figura 82.** Disonancia media en ambos escenarios.

Aparte de la menor disonancia, el resto de los efectos que se generan no son muy diferentes y el efecto centrífugo hacia el alfoz sigue siendo muy relevante. La razón del movimiento urbano se debe a que la disonancia de la nacionalidad pierde peso, pero entonces el movimiento urbano se rige por la disonancia riqueza-vivienda. Pero el valor de la vivienda viene determinado, a su vez, por la riqueza de la gente que la habita. Como hemos supuesto bajo hipótesis que la inmigración es de nivel de riqueza bajo, se produce el mismo efecto de clusterización, debido esta vez principalmente al efecto riqueza y no al efecto nacionalidad, pero generando un patrón similar pero ligeramente más lento (figura 83).

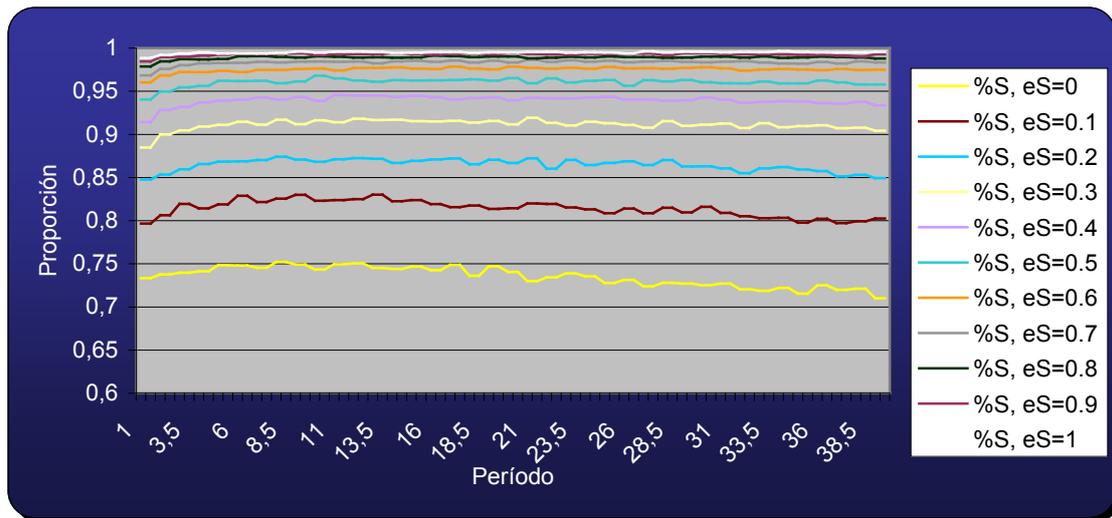


**Figura 83.** Diferencias en el crecimiento del alfoz con mayor y menor nivel de disonancia por nacionalidad.

### 5.3.2 Efecto del parámetro $e_s$ en la difusión de comportamiento

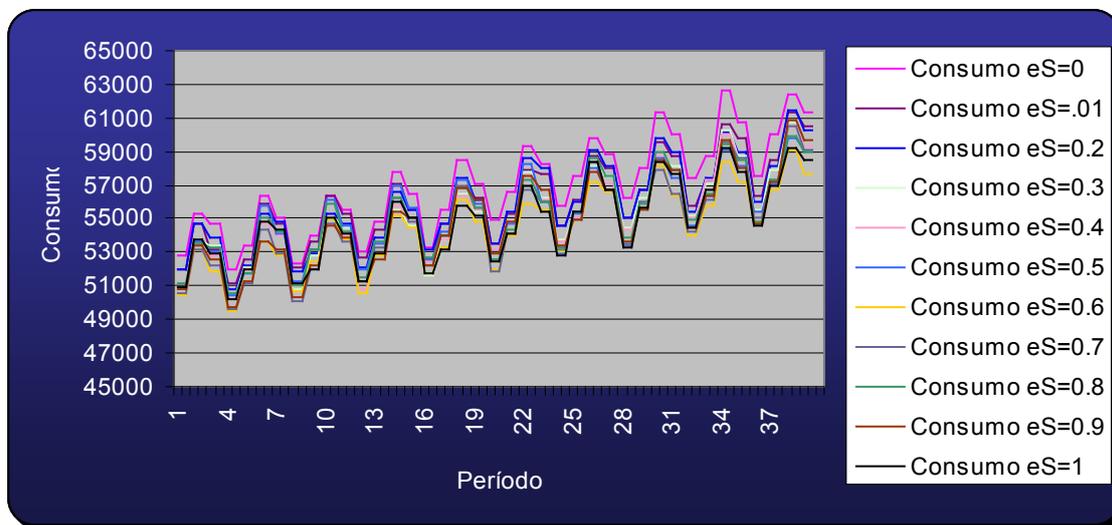
Al igual que en el primer escenario, consideramos interesante evaluar el efecto del parámetro de presión externa general sobre el recurso bajo diferentes submodelos de difusión de comportamiento.

En la figura 84 se muestran los resultados obtenidos en el comportamiento respecto a la conservación del recurso con el modelo de Young-Edwards. Se ha hecho la variación sistemática del parámetro desde 0 hasta 1.0 en intervalos de 0.1. La conclusión que anticipábamos en el primer escenario se mantiene también en este segundo: a medida que aumenta el valor de  $e_s$ , mayor es la proporción de agentes con comportamiento solidario en el modelo.



**Figura 84.** Proporción de familias con comportamiento S en el Escenario 2 dependiendo del valor del parámetro  $e_s$ , y bajo la hipótesis de modelo de difusión de comportamiento de Young-Edwards.

El efecto de un mayor comportamiento S, ocasionado por mayores valores del parámetro  $e_s$ , implica un ahorro en el modelo debido al menor consumo de los agentes. Sin embargo, en este caso, el ahorro no es suficiente para compensar el aumento de población como muestra la figura 83.



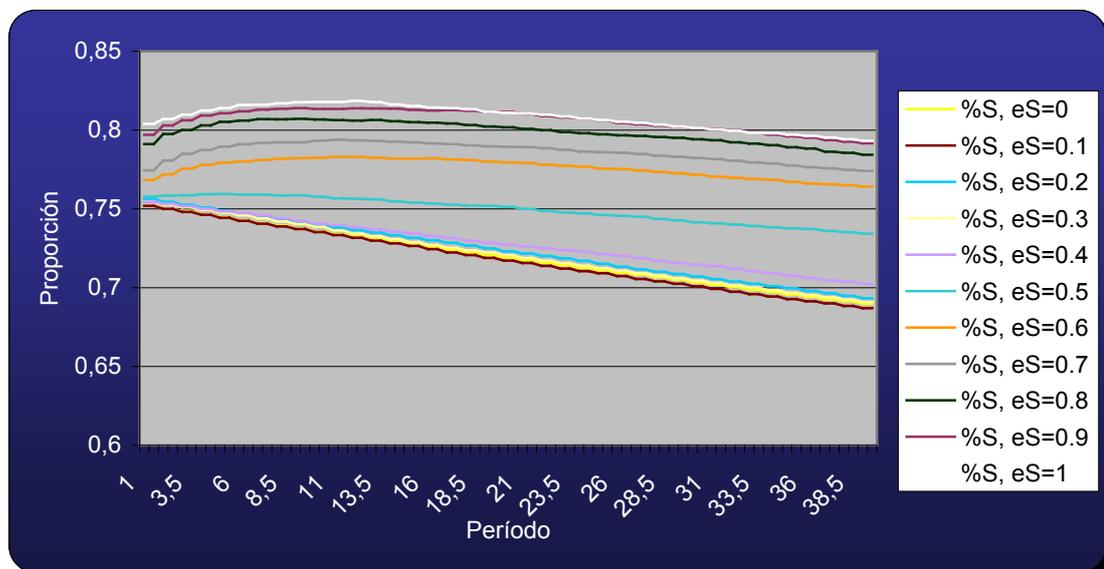
**Figura 85.** Efecto del parámetro  $e_s$  sobre el consumo a lo largo de los 40 trimestres en el Escenario 2 con el modelo de difusión de comportamiento de Young-Edwards.

Repetimos el análisis con el modelo de difusión de opinión de *endorsements* bajo una población equilibrada (tabla 13).

**Tabla 13.** Parámetros de configuración del modelo de difusión del comportamiento basado en el mecanismo de *endorsement*.

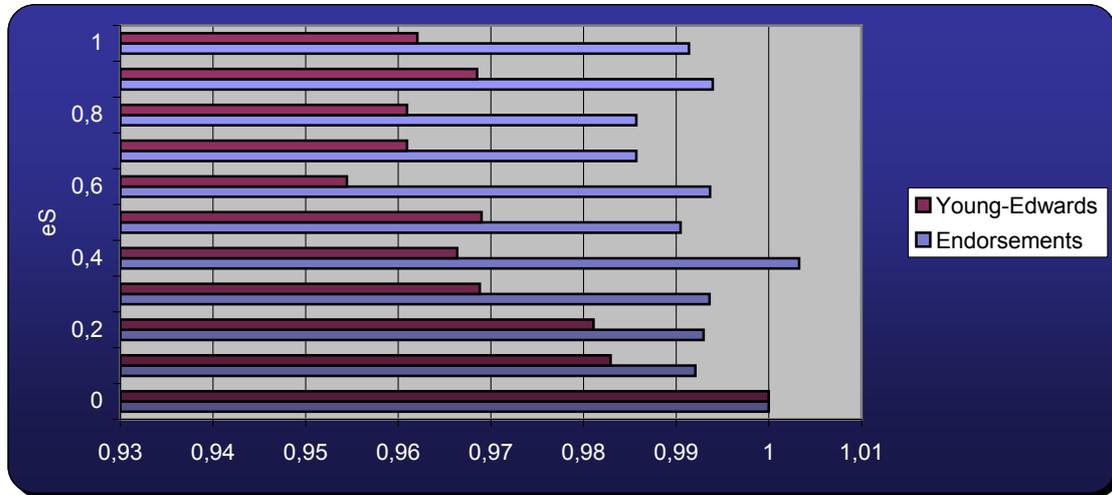
Parámetro	Valor
selfInfluence	0.3
globalInfluence	0.3
localInfluence	0.4
diffusion	ENDORSEMENT
phi	2.0
c	3.0

La figura 86 representa los resultados obtenidos al variar el parámetro  $e_s$  en el nuevo modelo de difusión. Seguimos encontrando una relación creciente de comportamiento S con el parámetro, pero por las mismas razones que en el escenario 1, el proceso crece menos deprisa que en el modelo de Young-Edwards. A diferencia de los resultados del escenario 1, la llegada de población definida con comportamiento NS ejerce suficiente presión como para que la evolución temporal sea decreciente. Este efecto, además, no ocurre tampoco en este mismo escenario con el modelo de Young-Edwards, sobre todo para valores altos de  $e_s$ , ya que en ese caso la influencia que genera el parámetro exterior y la menor inercia del proceso son capaces de compensar el efecto de la llegada de la población externa.



**Figura 86.** Proporción de familias con comportamiento S en el Escenario 2 dependiendo del valor del parámetro  $e_s$ , y bajo la hipótesis de modelo de difusión de comportamiento basado en *endorsements*.

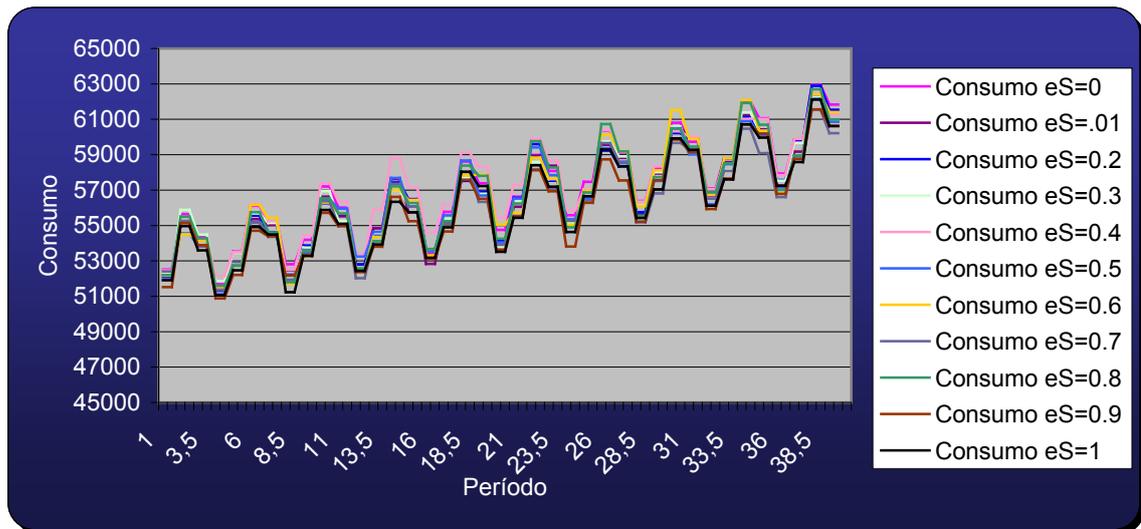
A pesar de que muchas de las conclusiones que obtenemos al variar  $e_s$  y el modelo de difusión de comportamiento en este escenario son muy similares a las del escenario anterior, existen diferencias como muestra la figura 87.



**Figura 87.** Ahorro porcentual respecto a la situación  $e_s = 0.0$  en función del modelo de difusión del comportamiento y de  $e_s$ .

Se observa que la diferencia de ahorro entre los dos modelos es mucho más apreciable que en el primer escenario. La razón del efecto es la misma que explicaba un descenso en la proporción de comportamiento S. Mientras que el comportamiento en Young-Edwards se puede influenciar globalmente de manera sencilla, el comportamiento con el mecanismo de *endorsement* es mucho más complejo. La población autoinfluyente muestra resistencia al cambio, además se produce un efecto de clusterización entre agentes NS, por lo que se producen focos de resistencia locales importantes y se agrava el problema: simplemente el efecto externo no es capaz de batir a los otros dos efectos combinados.

La representación del efecto sobre el consumo en función del valor del parámetro (figura 88) muestra que los valores de consumo no son tan diferentes en función del parámetro, y en muchos de ellos el efecto estocástico es superior a la tendencia que cabría esperar.



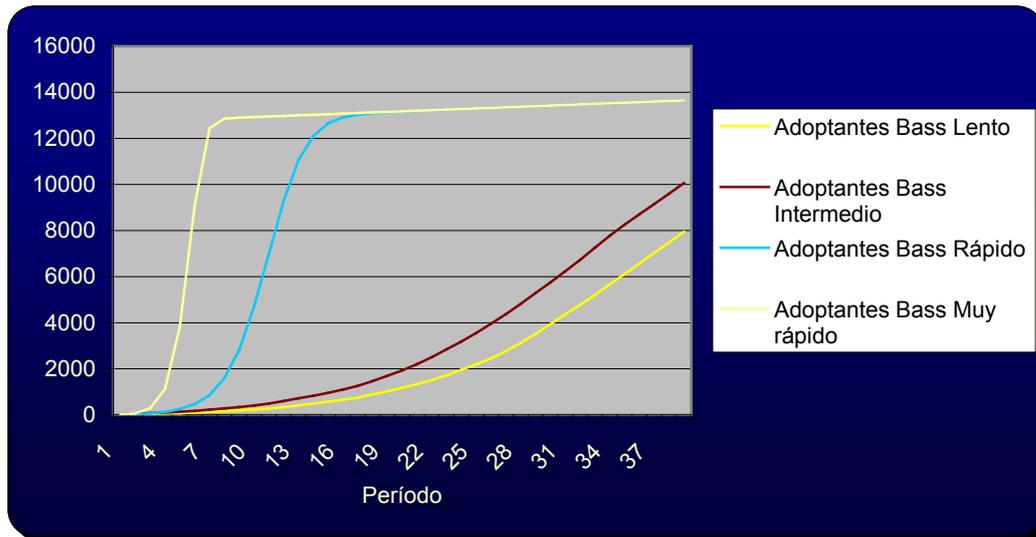
**Figura 88.** Efecto del parámetro  $e_s$  sobre el consumo a lo largo de los 40 trimestres en el Escenario 2 con el modelo de difusión de comportamiento basado en *endorsements*.

Al igual que en el primer escenario evaluamos el efecto de la difusión de una innovación tecnológica doméstica de ahorro aditiva, bajo diferentes modelos de difusión y con diferentes parámetros, en segundo escenario estudiaremos el efecto de una difusión multiplicativa, que afecte de forma proporcional al consumo doméstico, reduciéndolo en un 10%. Todo el análisis de la adopción es independiente de si se trata de un factor aditivo o multiplicativo, pero el efecto de este análisis quedará reflejado cuando analicemos el consumo.

Inicialmente consideramos el efecto sobre el modelo de Bass con los mismos cuatro perfiles de velocidad de adopción que en el escenario 1 y que se resumen en la tabla 14.

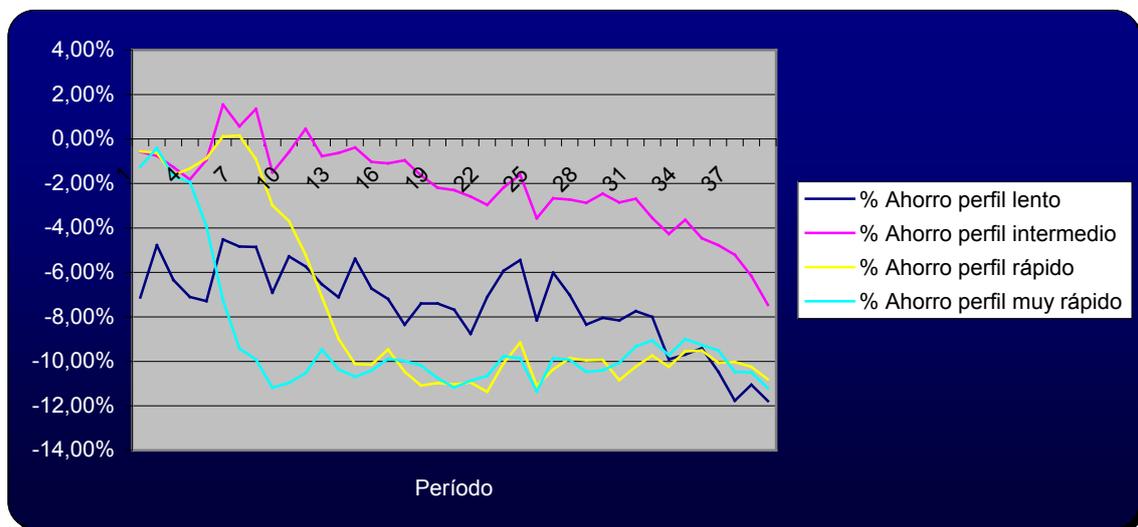
**Tabla 14.** Parámetros de definición de los diferentes perfiles de adopción de una innovación tecnológica en el modelo de Bass.

Perfil de adopción lento		Perfil de adopción intermedio	
diffTechnology	BASS	diffTechnology	BASS
advertisingEffectiveness	0.0010	advertisingEffectiveness	0.0015
contactRate	10.0	contactRate	10.0
adoptionFraction	0.015	adoptionFraction	0.015
tickOfInclusion	1.0	tickOfInclusion	1.0
Perfil de adopción rápido		Perfil de adopción muy rápido	
diffTechnology	BASS	diffTechnology	BASS
advertisingEffectiveness	0.0010	advertisingEffectiveness	0.0010
contactRate	30.0	contactRate	10.0
adoptionFraction	0.03	adoptionFraction	0.3
tickOfInclusion	1.0	tickOfInclusion	1.0



**Figura 89.** Curvas de adopción de la innovación tecnológica bajo los diferentes perfiles en el Escenario 2.

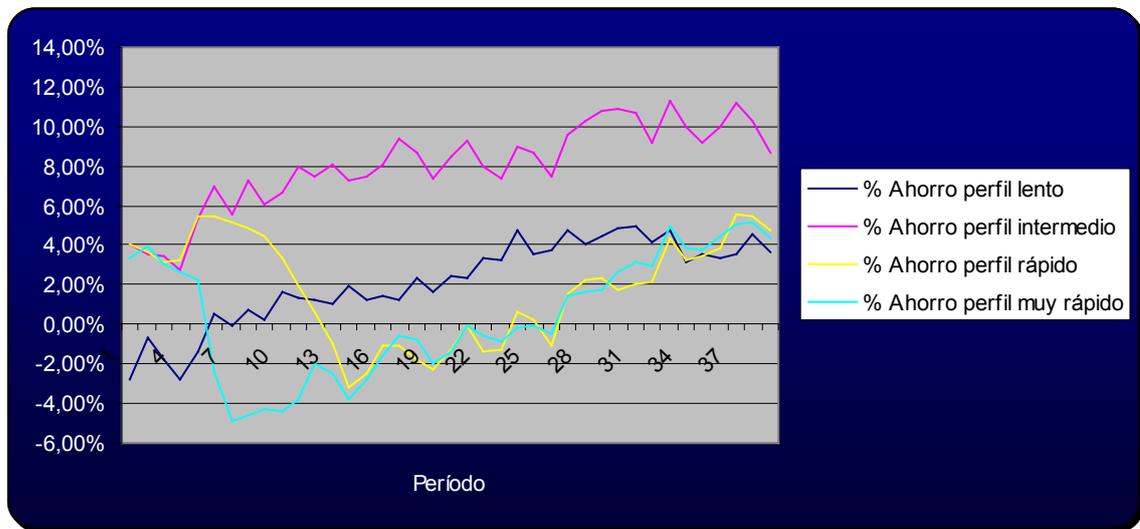
El efecto sobre el consumo de estos perfiles de adopción respecto al escenario básico 2 se muestra en la figura 90. Cuando el proceso de adopción es completo el ahorro es alrededor de un 12%, un 10% del ahorro generado por la medida y un 2% causado por el paso del comportamiento NS a S.



**Figura 90.** Porcentaje de ahorro en el consumo total respecto al Escenario 2 básico generado por la innovación tecnológica en el Escenario 2 bajo diferentes perfiles de velocidad de adopción.

Si en lugar de realizar el análisis de consumo respecto al escenario 2 básico lo hacemos respecto al escenario 1 básico para cuantificar el consumo generado por el

efecto de la inmigración, vemos que la medida tecnológica que hemos incluido no es capaz de compensar el efecto (figura 91).



**Figura 91.** Porcentaje de ahorro en el consumo total respecto al Escenario 1 básico generado por la innovación tecnológica en el Escenario 2 bajo diferentes perfiles de velocidad de adopción.

También hemos analizado el efecto del modelo de Bass acoplado sobre este escenario, aunque no presentamos los resultados de forma tan pormenorizada como en el escenario anterior. La tabla 15 muestra los parámetros respecto al escenario básico:

**Tabla 15.** Parámetros de definición del perfil de velocidad de adopción del modelo de difusión de la innovación en el modelo de Bass acoplado. En cada perfil se estudia el efecto del modelo de difusión del comportamiento y de  $e_s$ .

Perfil de adopción lento			
diffTechnology	BASS COUPLED	diffusion	YOUNG-EDWARDS
advertisingEffectiveness	0.0010		ENDORSEMENT
contactRate	10.0	eS	0
adoptionFraction	0.015		0,4
tickOfInclusion	1.0		0,8
probAdvEffBassCoupledAdd	0.05		
Perfil de adopción intermedio			
diffTechnology	BASS COUPLED	diffusion	YOUNG-EDWARDS
advertisingEffectiveness	0.0015		ENDORSEMENT
contactRate	10.0	eS	0
adoptionFraction	0.015		0,4
tickOfInclusion	1.0		0,8
probAdvEffBassCoupledAdd	0.05		
Perfil de adopción rápido			

diffTechnology	BASS COUPLED	diffusion	YOUNG-EDWARDS
advertisingEffectiveness	0.0010		ENDORSEMENT
contactRate	30.0	eS	0
adoptionFraction	0.03		0,4
tickOfInclusion	1.0		0,8
probAdvEffBassCoupledAdd	0.05		

Las conclusiones generales del modelo de Bass acoplado se mantienen en este escenario: se produce un cambio de convexidad en las curvas de adopción debido al aumento de probabilidad de adopción; las tasas de adopción más altas se producen, para cada modelo de difusión de comportamiento, con mayores valores del parámetro  $e_s$  (sin desviaciones para ninguno de los dos modelos de difusión de comportamiento); y la tasa de adopción, sobre todo para altos valores de  $e_s$ , es mayor con el modelo de comportamiento de Young-Edwards que con el modelo basado en el comportamiento de *endorsement* (figura 92).

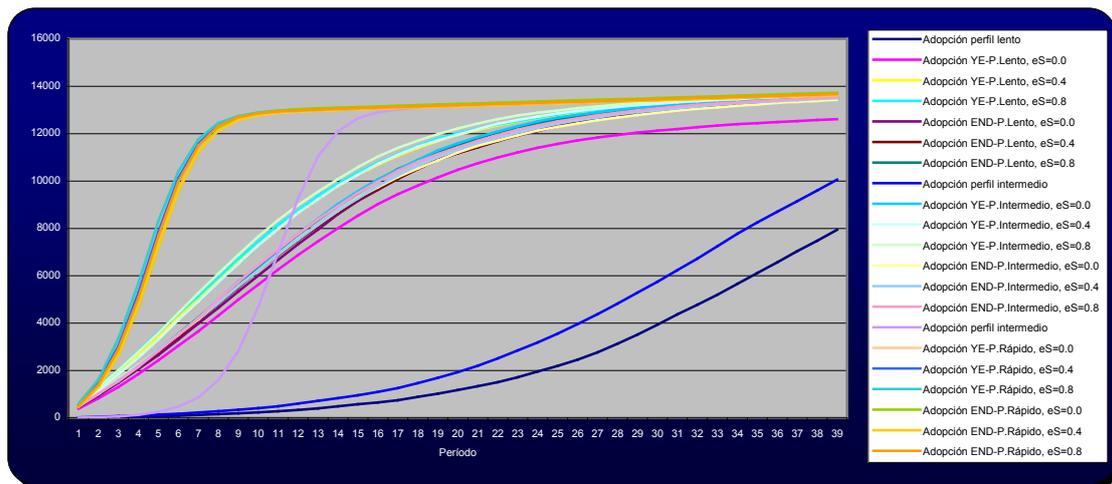
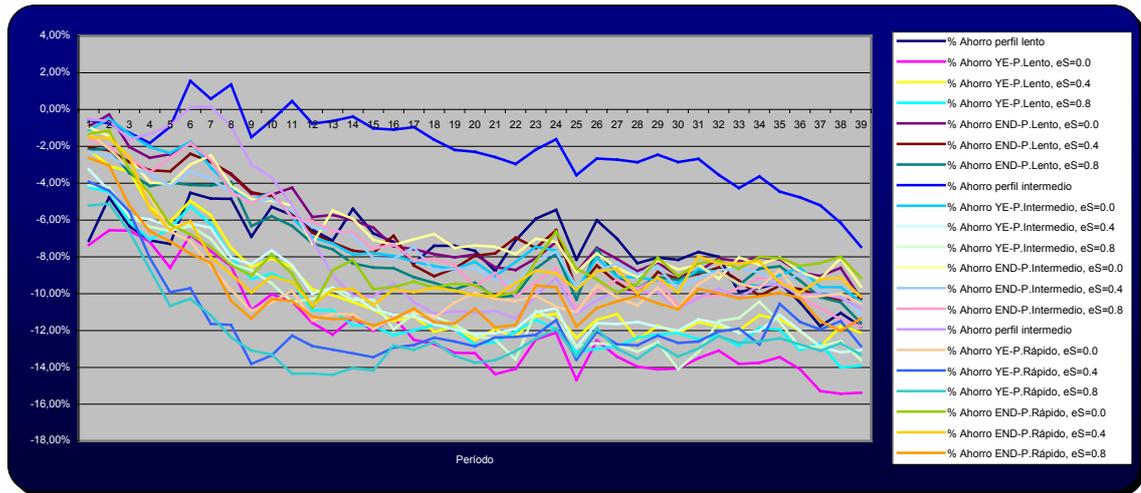


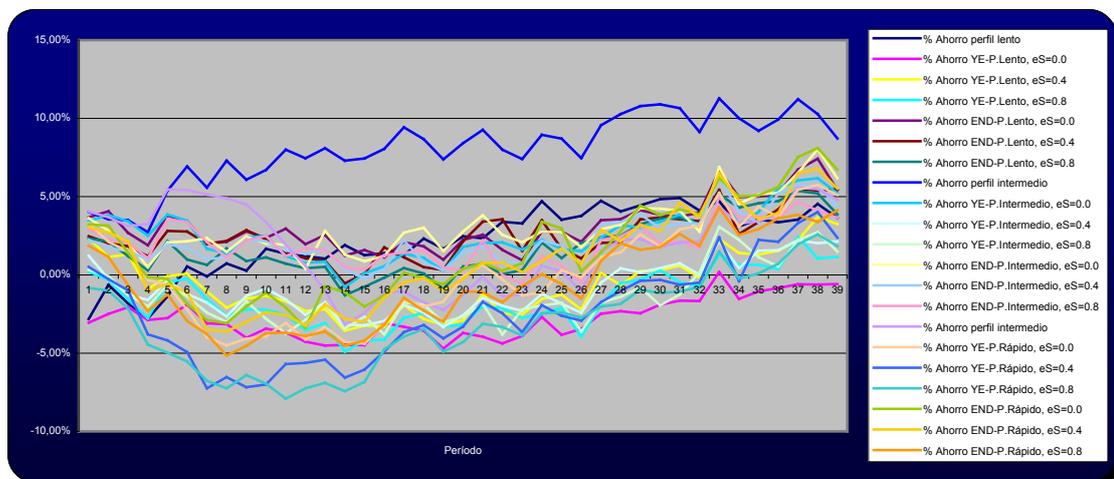
Figura 92. Curvas de adopción tecnológica en el Escenario 2.

La conclusión sobre el efecto de la aceleración de la velocidad de adopción de una innovación mediante parámetros específicos o generales se mantiene para los mismos casos. El efecto de la presión general sobre el parámetro de información de estado del recurso puede generar efectos similares, con el modelo de Bass acoplado, que la promoción directa de la tecnología de ahorro específica (figura 93).



**Figura 93.** Consumo frente el Escenario básico 2.

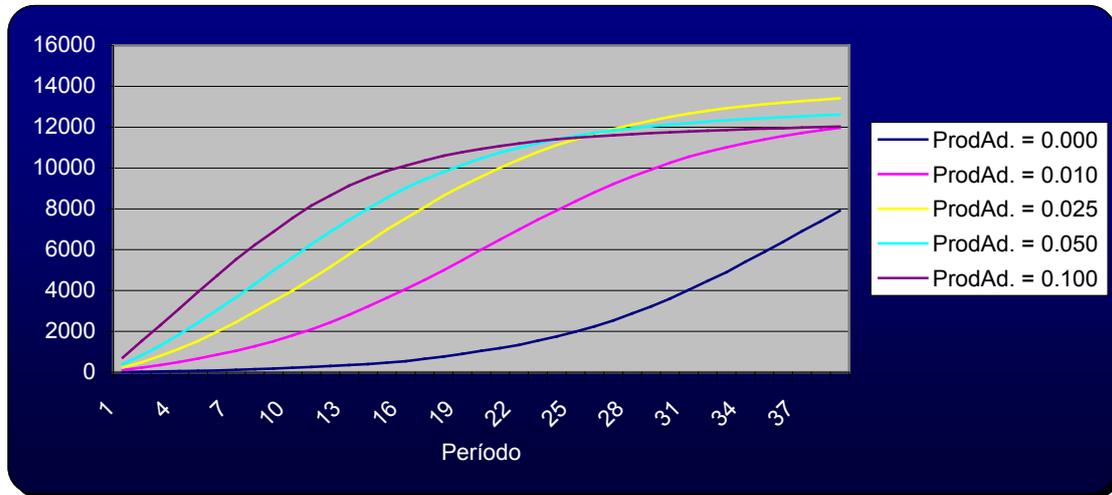
Si representamos el consumo total generado en este nuevo escenario frente al consumo sin inmigración (figura 94), vemos que para patrones de adopción rápida y altos niveles de presión externa se puede compensar el efecto del aumento de población.



**Figura 94.** Consumo frente el Escenario básico 1.

Un efecto adicional que hemos considerado importante medir, y que no hicimos en el escenario 1, es como modifica la curva de adopción el parámetro de probabilidad adicional de adopción en el modelo de Bass acoplado cuando un agente tiene un comportamiento S. Para estudiar este efecto, utilizamos el modelo de difusión de comportamiento de Young-Edwards y los parámetros del perfil de adopción lento, para poder observar con mayor claridad la influencia del parámetro. Hemos realizado las simulaciones con cinco valores del parámetro diferentes,

obteniendo como resultado la figura 95. El efecto del parámetro es un aumento de la convexidad<sup>118</sup> y de la velocidad de adopción.



**Figura 95.** Variación del número de adoptantes en función de la probabilidad adicional por comportamiento S.

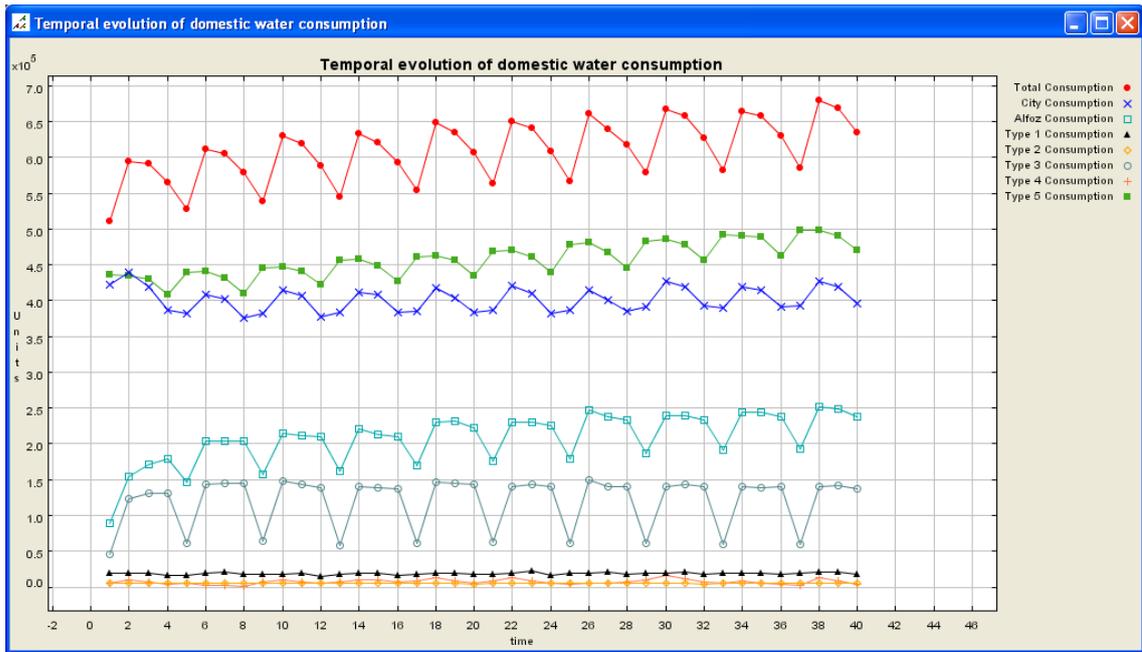
### 5.3.3 Cambiando la tipología de viviendas del alfoz

Cuando definimos el escenario 1, escenario conservador, consideramos la tipología de vivienda del alfoz compuesta por pisos y viviendas bajas de consumo medio, con un comportamiento en cuanto a consumo muy similar al de los pisos. No obstante, no queríamos acabar el análisis de este segundo escenario sin estudiar las consecuencias en el modelo de cambiar un 10% de las viviendas disponibles en alfoz por viviendas bajas de consumo alto (viviendas de tipo 3)<sup>119</sup>.

Modificando única y exclusivamente esta hipótesis, los resultados cuantitativos de algunos aspectos de las simulaciones cambian. Puesto que no hemos modificado el valor de las viviendas ni los parámetros de llegada de inmigración, la dinámica urbana sigue siendo la misma, excepto que ahora muchas más viviendas de tipo 3 son ocupadas.

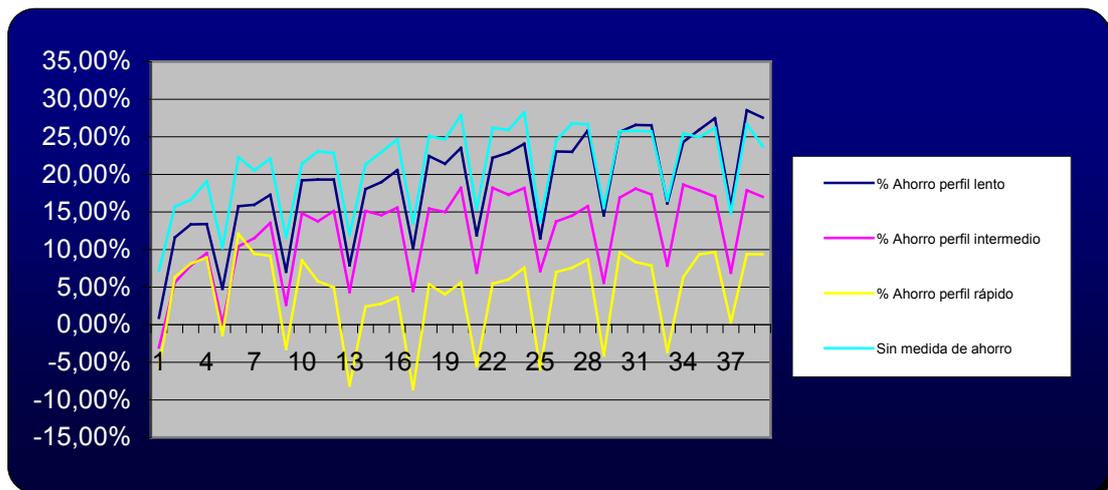
<sup>118</sup> Desde el punto de vista de  $+\infty$  en el eje de ordenadas.

<sup>119</sup> Ver Anexo C.



**Figura 96.** Evolución temporal del consumo de agua doméstico en el Escenario 2 con aumento de viviendas de tipo 3 en el alfoz.

El aumento de consumo tanto en el alfoz (que se duplica) como en total es muy importante. Bajo este escenario de dinámica urbana, sólo el efecto de medidas de conservación agresivas y con perfiles de adopción rápido tendería a compensar el aumento de consumo. En caso contrario, se podrían alcanzar aumentos de consumo de más de un 25%, y eso sólo considerando una pequeña fracción de viviendas de tipo 3 (figura 97).



**Figura 97.** Consumo frente el Escenario básico 2.

## 5.4 Escenario 3

El tercer escenario se caracteriza por el sostenimiento del precio de las viviendas en algunos de los barrios residenciales del centro de la ciudad y de mayor nivel adquisitivo (tabla 16).

**Tabla 16.** Barrios con determinación de precios de la vivienda exógenos al modelo de actualización del valor de la vivienda de Benenson.

Centro - Campo Grande
San Pablo y San Martín
San Nicolás
Fuente Berrocal
Zorrilla
Gamazo
García Morato - Puente Colgante
4 de Marzo

La hipótesis residencial que se pretende evaluar es el efecto que provocan unos precios artificialmente altos en estas zonas sobre el consumo doméstico. Para modelar el efecto de los precios se elimina la condición de actualización del precio de las viviendas de Benenson. Mientras que en la adaptación que hemos utilizado en los otros escenarios, una vivienda vacía pierde valor por encontrarse deshabitada (el modelo de actualización del valor del precio estándar de Benenson), en este escenario hacemos la hipótesis de que no sólo no pierde valor, sino que el precio de la vivienda en estas zonas se revaloriza en un 0.1 adicional trimestral<sup>120</sup>.

Consideramos que no hay parámetros de inmigración para no distorsionar el efecto de la hipótesis que queremos evaluar, pero implementamos la misma infraestructura que en el último análisis del escenario 2: se sustituye un 10% de las viviendas disponibles en el alfoz por viviendas bajas de consumo alto (viviendas de tipo 3).

### 5.4.1 Escenario básico y tipología de vivienda

La configuración del escenario básico, una vez definidas las características propias que puedan influenciar la dinámica urbana, es análoga al resto de escenarios básicos. Consideramos el comportamiento del modelo bajo la hipótesis de ninguna

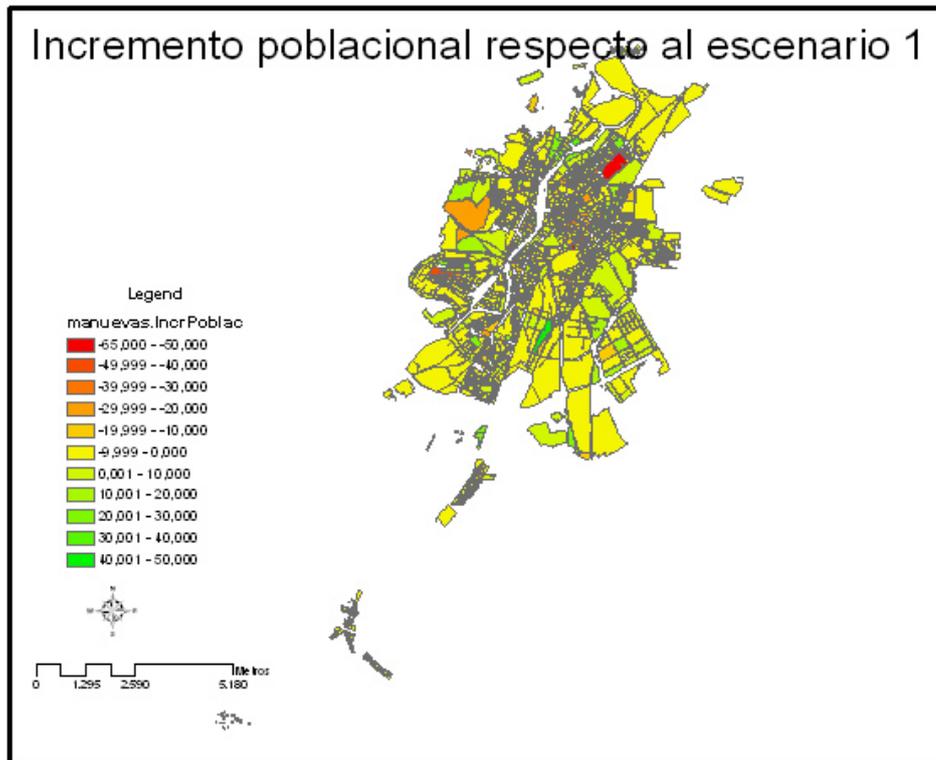
<sup>120</sup> Medido en los intervalos de valor de vivienda hasta el máximo de 4.

presión externa de información sobre el recurso  $e_s = 0$ , modelo de difusión de comportamiento de Young-Edwards y ausencia de cualquier tipo de innovación tecnológica. En la tabla 17 se recoge el resto de parámetros utilizados en la simulación.

**Tabla 17.** Parámetros utilizados para las simulaciones básicas del escenario 3.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
p0	0.05	aP	0.3
IA	0.05	bP	0.7
numberOfCandidates	10	eS	0.0
zero	0.0	beta	5.0
veryLow	0.05	diffusion	YOUNG-EDWARDS
low	0.2	phi	2.0
intermediate	0.5	c	3.0
high	0.8	diffTechnology	BASS
veryHigh	0.95	advertisingEffectiveness	0.0010
delta	0.05	adoptionFraction	0.015
selfInfluence	0.3	tickOfInclusion	43.0
globalInfluence	0.3	probAdvEffBassCoupledAdd	0.05
localInfluence	0.4	multiplicative	true
decreaseRate_d	0.98	multiplicativeSave	0.9
weightStudies	0.2	additiveSave	-5.0
weightNationality	0.4	seasonal	MULTIPLICATIVE
weightWealthValue	0.4		
a	0.7		
b	0.3		

La figura 98 muestra la variación poblacional que se produce en el núcleo urbano respecto al escenario 1. Se observa un ligero descenso de población respecto al escenario de control (añadido al descenso que ya se producía de por sí). El efecto del aumento y sostenimiento de los precios implica un aumento de disonancia en las familias de niveles de riqueza medios-altos, que encuentran una ubicación con menor nivel de disonancia en las viviendas de mayor valor del alfoz (viviendas de tipo 3). Este movimiento produce un considerable aumento de consumo en la región. De hecho, si analizamos el mismo escenario básico pero bajo la hipótesis de un mayor número de viviendas de tipo 3 en el alfoz (20%), el incremento en consumo se agudiza aún más como se demuestra en la figura 99.

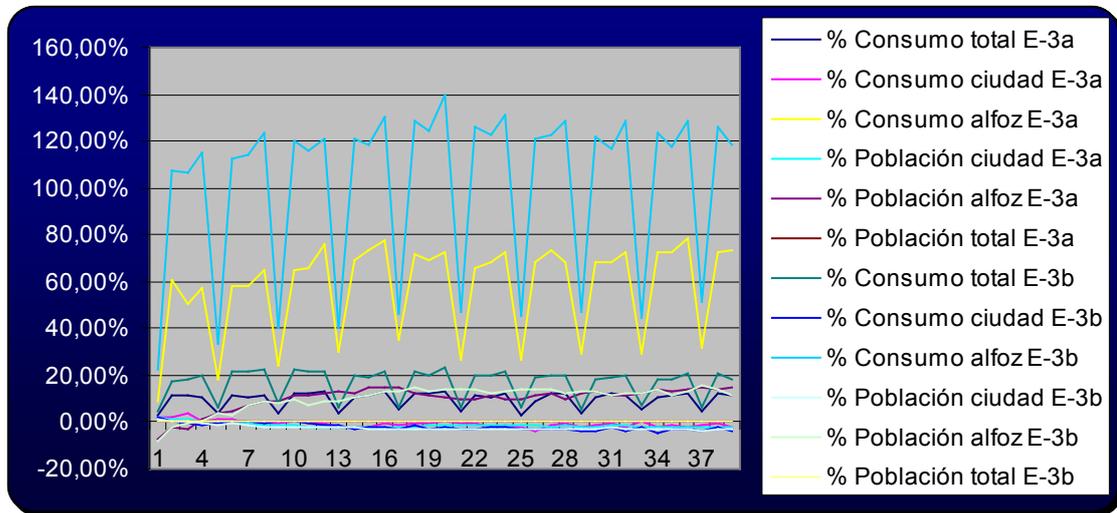


**Figura 98.** Mapa representando el incremento poblacional del Escenario 3 básico respecto al Escenario 1.

En la figura 99 comparamos los resultados de las simulaciones hechas con los parámetros de configuración del escenario 3 básico (escenario 3a) y del escenario 3 con mayor número de viviendas de tipo 3 en el alfoz (escenario 3b) con los resultados que obtuvimos en el escenario 1. Pese a que el número de simulaciones efectuadas no ha eliminado completamente el efecto estocástico, que tendería a eliminar completamente las diferencias de población entre los escenarios, en ambos casos las diferencias son inferiores a 1%, por lo que consideramos los resultados de la comparación aceptables.

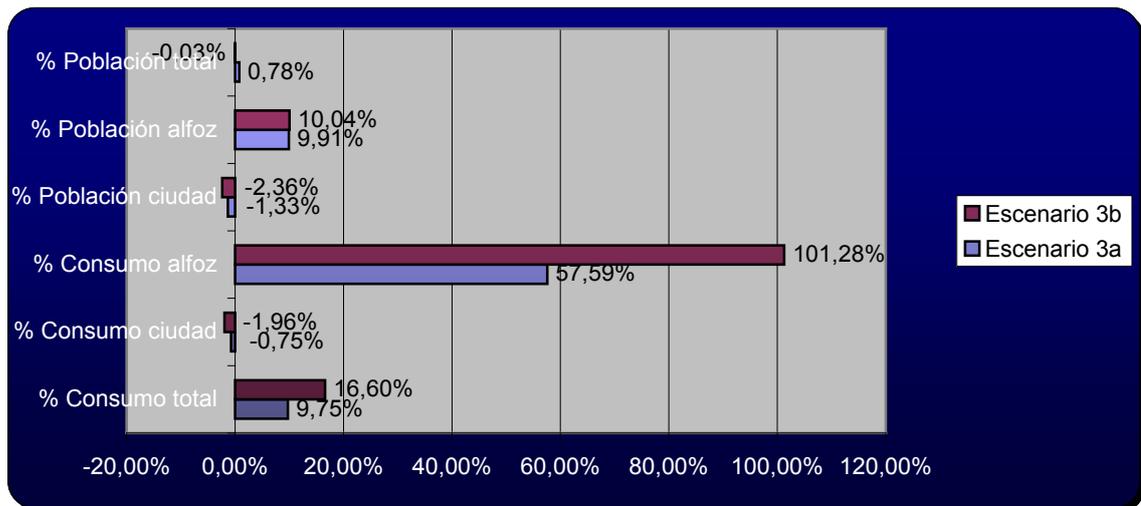
La figura muestra que el aumento porcentual de consumo total es muy relevante en ambos escenarios frente al escenario conservador. Este aumento además presenta una estacionalidad muy acusada, herencia del fuerte comportamiento estacional que tienen las viviendas de tipo 3 (ver Anexo C). El aumento de consumo total es fundamentalmente consecuencia del movimiento urbano hacia el alfoz, cuya población crece del orden del 10% por encima del escenario 1 debido a la presión de los precios, y por tanto aumentando la disonancia, en las zonas residenciales del centro del núcleo urbano. Este aumento de población del alfoz supone un descenso en la población de la ciudad adicional de un 2%. No obstante, mientras que el

consumo en la ciudad tiene un descenso acorde a su pérdida de población, del orden de 1,5%, en el alfoz el aumento de población unido al cambio de tipología de vivienda produce aumentos de consumo que pueden llegar a más del doble, en los trimestres de alto consumo, que en el escenario 1.



**Figura 99.** Variación porcentual en consumo y población de los Escenarios 3a y 3b respecto al Escenario 1 a lo largo de la dinámica de la simulación.

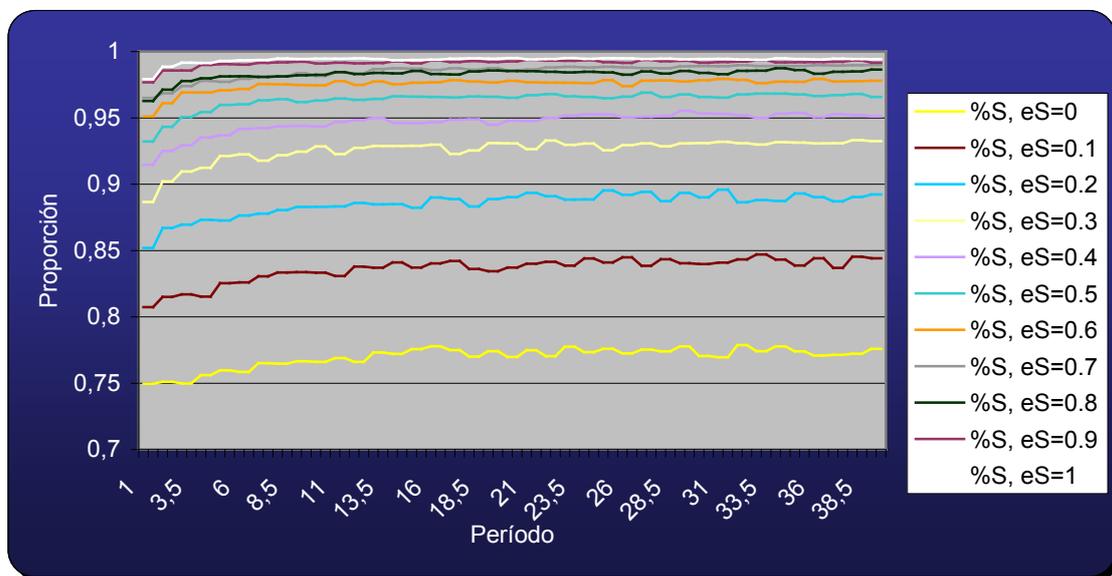
Para facilitar la visualización de los datos, en la figura 100 eliminamos la información temporal de la simulación y mostramos la comparación porcentual respecto al escenario 1 en promedio.



**Figura 100.** Variación porcentual promedio en consumo y población de los Escenarios 3a y 3b respecto al Escenario 1.

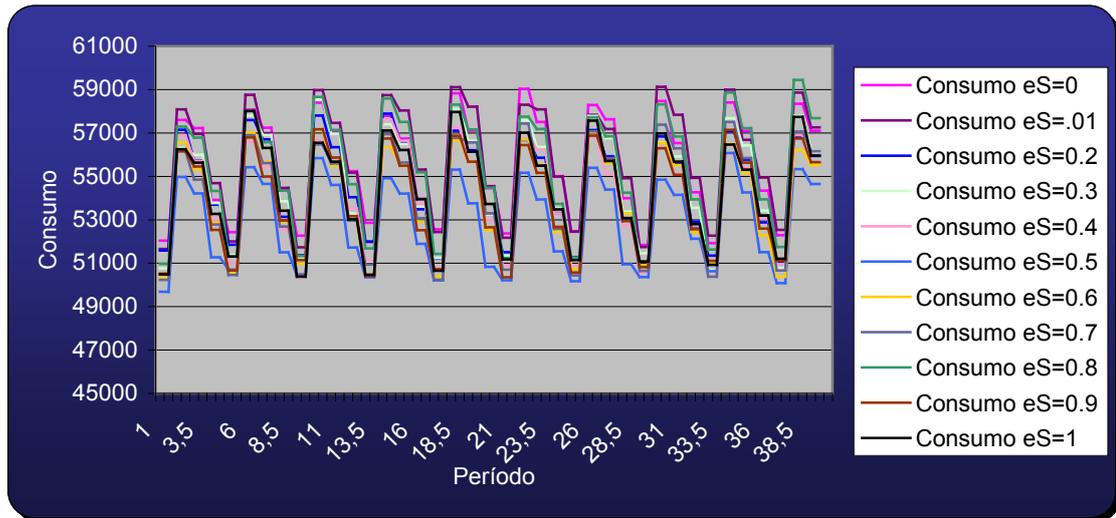
### 5.4.2 Efecto del parámetro $e_s$ en la difusión de comportamiento

Para completar el análisis de la influencia de  $e_s$  en los modelos de difusión de comportamiento, hemos realizado una batería de simulaciones análoga a la de los otros dos escenarios. Los resultados obtenidos en el comportamiento respecto a la conservación del recurso en este escenario con el modelo de Young-Edwards y la variación del parámetro  $e_s$  se muestran en la figura 101. Se mantiene que mayores valores de  $e_s$  implican mayor proporción de agentes con comportamiento solidario.



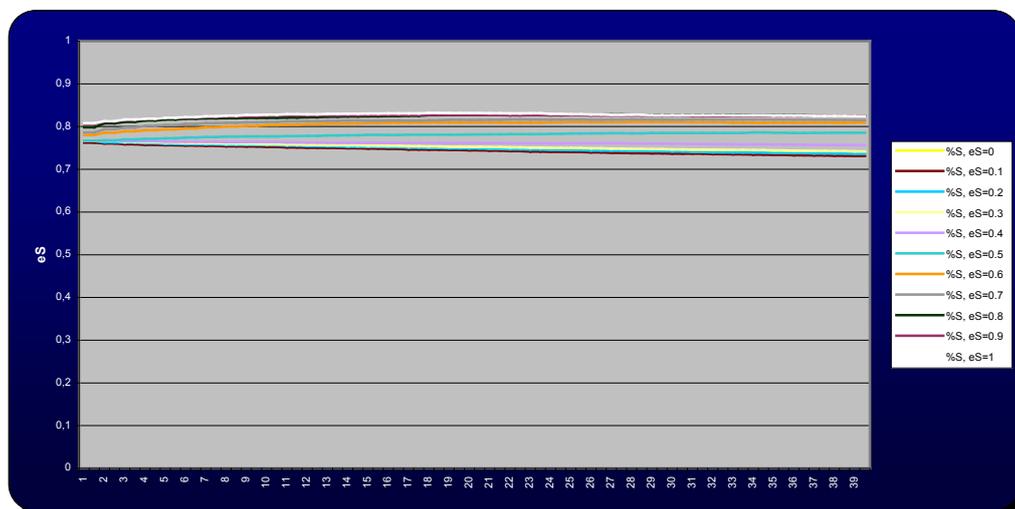
**Figura 101.** Proporción de familias con comportamiento S en el Escenario 3 dependiendo del valor del parámetro  $e_s$ , y bajo la hipótesis de modelo de difusión de comportamiento de Young-Edwards.

En este escenario la influencia del comportamiento S es mayor que en el escenario 1 como se observa en la influencia del parámetro  $e_s$  en la figura 101. Este efecto es consecuencia de que el ahorro por un comportamiento S es más sensible cuanto mayor sea el consumo, por ejemplo en tipologías de vivienda de tipo 3 como las que hay en este escenario.



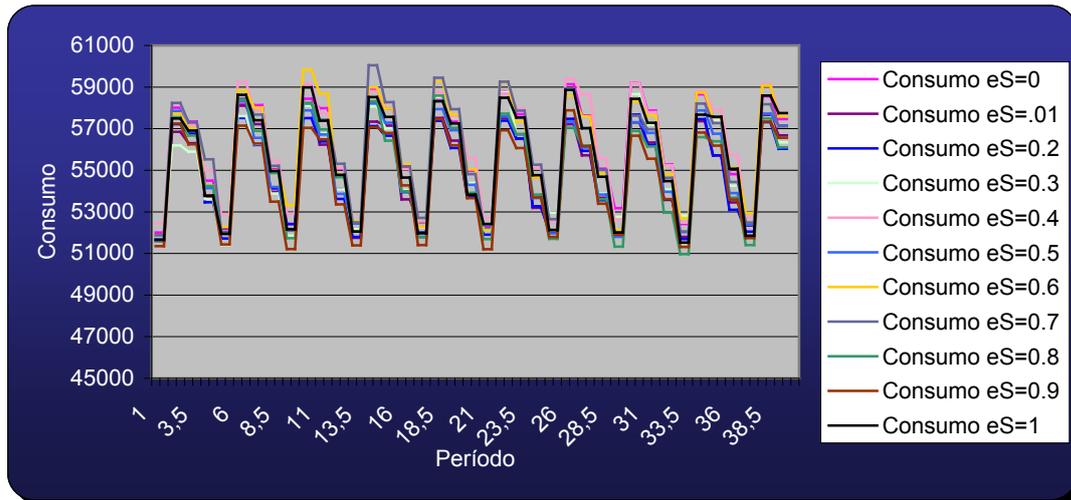
**Figura 102.** Efecto del parámetro  $e_s$  sobre el consumo en el Escenario 3 con el modelo de difusión de comportamiento de Young-Edwards.

Si estudiamos el efecto del mismo parámetro con el modelo de difusión de opinión de *endorsements* y con la misma tabla de parámetros que en los escenarios anteriores (tabla 13), encontramos la misma tendencia de crecimiento entre el comportamiento S y los valores del parámetro (figura 103), pero sin llegar a valores tan altos como en el modelo de comportamiento de Young-Edwards.



**Figura 103.** Proporción de familias con comportamiento S en el Escenario 3 dependiendo del valor del parámetro  $e_s$ , y bajo la hipótesis de modelo de difusión de comportamiento basado en *endorsements*.

En la figura 104 se representa el efecto sobre el consumo en función del valor del parámetro.



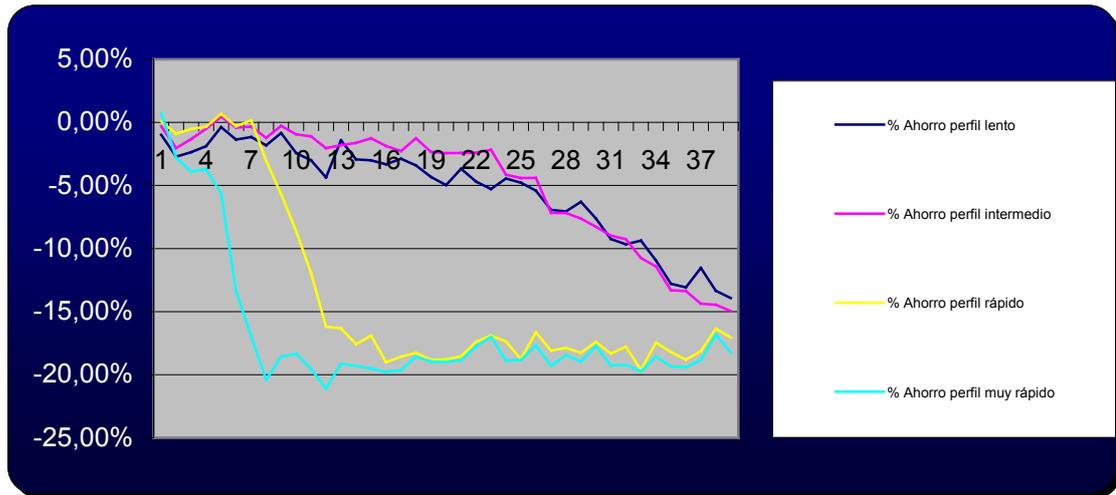
**Figura 104.** Efecto del parámetro  $e_s$  sobre el consumo a lo largo de los 40 trimestres en el Escenario 3 con el modelo de difusión de comportamiento basado en *endorsements*.

### 5.4.3 Efecto de los modelos de difusión tecnológica

Para analizar el efecto de los modelos de difusión tecnológica, en este tercer escenario volvemos a considerar el efecto de la difusión de una innovación tecnológica doméstica de ahorro aditiva como son los cabezales de bajo consumo en las duchas.

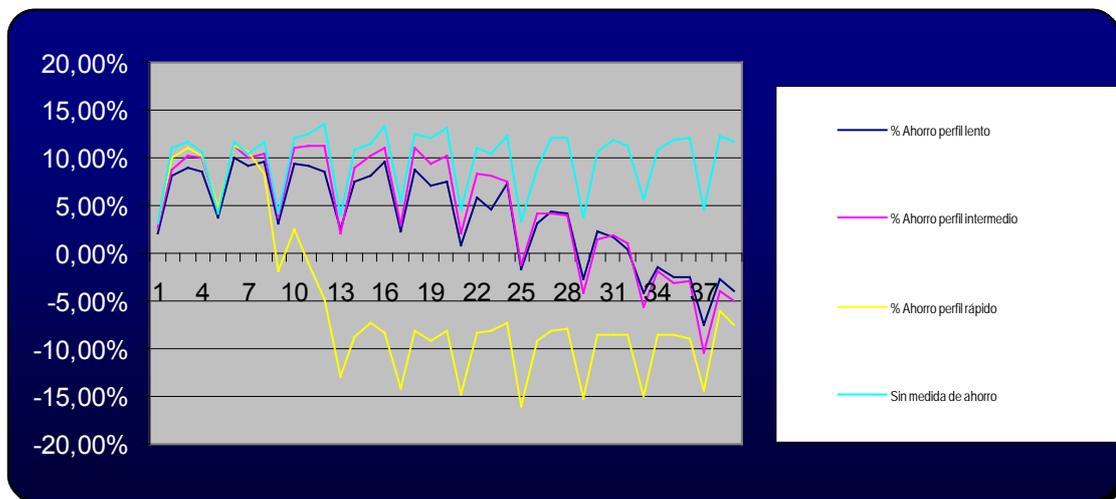
Estudiamos el efecto del modelo de Bass con los mismos cuatro perfiles de velocidad de adopción que en los dos escenarios anteriores (ver tabla 14).

La figura 105 muestra el porcentaje de ahorro respecto al escenario 3 básico y en cada trimestre, ocasionado por la difusión de la medida bajo diferentes perfiles de adopción.



**Figura 105.** Porcentaje de ahorro en el consumo total respecto al Escenario 3 básico, generado por la innovación tecnológica en el Escenario 3 bajo diferentes perfiles de velocidad de adopción.

Si en lugar de realizar el análisis de consumo respecto al escenario 3 lo hacemos respecto al escenario 1 básico, para medir el efecto originado por el mantenimiento de precios y el cambio de tipología de vivienda en el alfoz, obtenemos la figura 106:

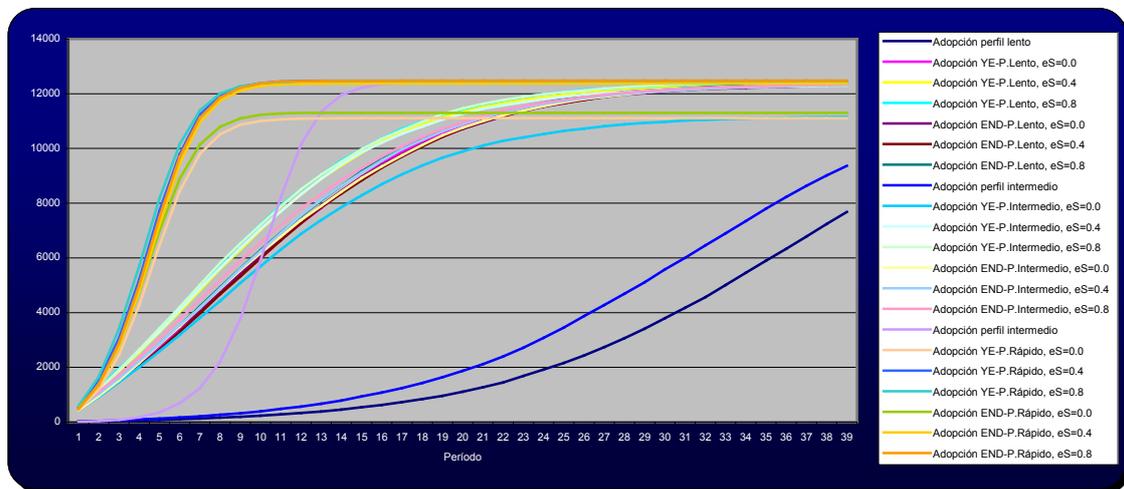


**Figura 106.** Porcentaje de ahorro en el consumo total respecto al Escenario 1 básico generado por la innovación tecnológica en el Escenario 3 bajo diferentes perfiles de velocidad de adopción.

Vemos que la difusión total de la medida de ahorro es capaz de compensar el incremento de consumo. De hecho, incluso si consideramos el escenario 3b, lo que incrementaría el consumo total con 7,5% adicional, la difusión total de la medida de

ahorro prácticamente compensaría el aumento de consumo incluso en los trimestres más críticos.

Si estudiamos el efecto del modelo de Bass acoplado sobre este escenario, con el mismo conjunto de perfiles y parámetros (ver tabla 15), se producen las mismas relaciones respecto al consumo y al modelo de Bass estándar que encontrábamos en los escenarios anteriores. Se sigue produciendo un cambio de convexidad en las curvas de adopción, las tasas de adopción más altas se producen con mayores valores del parámetro  $e_s$  o la tasa de adopción es mayor con el modelo de comportamiento de Young-Edwards que con el modelo basado en el comportamiento de *endorsement*, sobre todo para altos valores de  $e_s$  (figura 107).



**Figura 107.** Curvas de adopción tecnológica en el Escenario 3.

Al estudiar el efecto de la aceleración de la velocidad de adopción de una innovación vemos nuevamente que el efecto de la presión general sobre  $e_s$  puede generar efectos similares, con el modelo de Bass acoplado, que altos perfiles de adopción específica de la innovación tecnológica (figura 108 y figura 109), compensando más rápidamente efectos como el provocado por movimientos urbanos centrífugos.

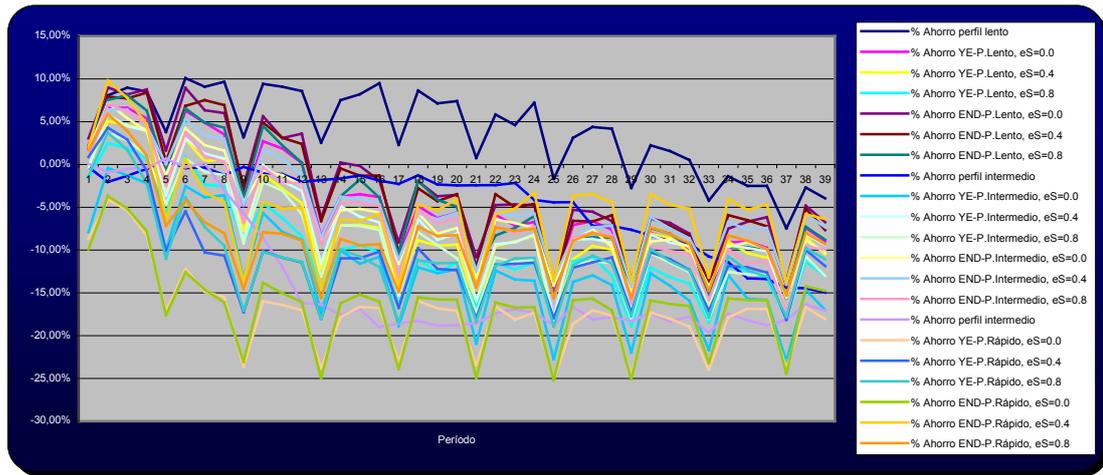


Figura 108. Consumo frente el Escenario básico 1.

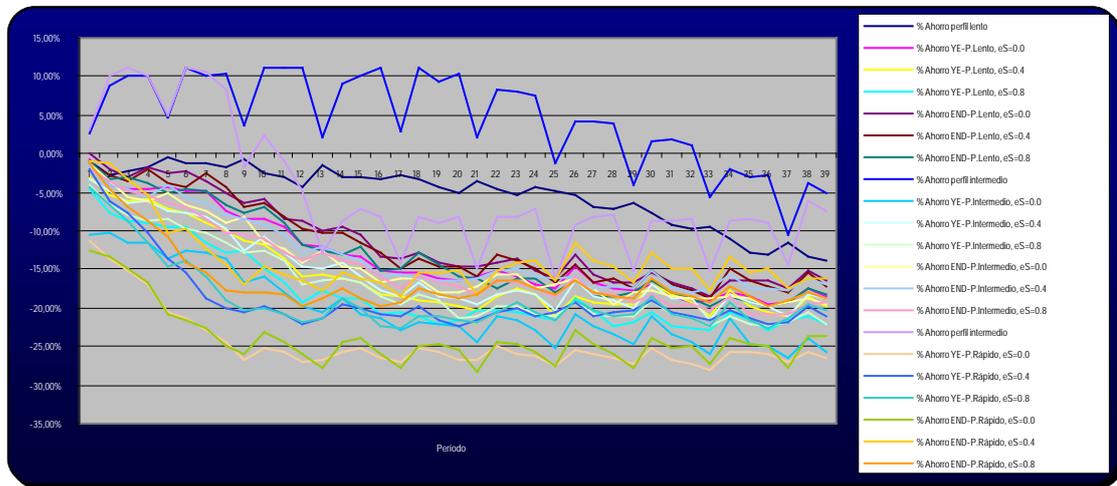


Figura 109. Consumo frente el Escenario básico 3a.



## **IV CONCLUSIONES**



Mediante el trabajo desarrollado en esta tesis doctoral hemos cumplido con el objetivo central que nos marcamos al iniciar esta investigación: demostrar que la simulación y el modelado basado en agentes constituyen una aproximación metodológica robusta y rigurosa para tratar y abordar la complejidad del problema de la gestión del agua en las áreas metropolitanas emergentes.

Hemos demostrado las posibilidades de la aproximación para integrar entre sí aspectos relacionados con procesos socioeconómicos con influencia en la demanda, manteniendo el máximo nivel de realismo en la dimensión espacial y geográfica de los modelos. Precisamente hemos detectado esta capacidad que ofrece el modelado basado en agente como una de las debilidades más importantes de las técnicas de previsión tradicionales, por lo que consideramos firmemente que nuestra visión puede complementar el entendimiento global de los procesos de consumo.

Además, hemos utilizado un marco metodológico suficientemente extrapolable al estudio de otros sistemas complejos más allá de la gestión de agua doméstica.

El resto de las conclusiones las hemos diferenciado en conclusiones metodológicas y conclusiones en el dominio de aplicación. Las primeras se refieren a las lecciones extraídas del uso del modelado basado en agentes tanto en el dominio específico de la gestión de agua como en el marco más general de los sistemas complejos. Las segundas son debidas a los resultados de las simulaciones con la parametrización del modelo en los diferentes escenarios de la Región Metropolitana de Valladolid.

Para finalizar, hemos incluido algunas de las opciones de continuidad y extensión del presente trabajo, que consideramos que tienen una especial factibilidad e interés.

## 6.1 Conclusiones metodológicas

### 1. El modelado basado en agentes complementa a las técnicas tradicionales de estimación de la demanda.

A lo largo de la tesis hemos estudiado los diferentes problemas que presentan las metodologías que se utilizan en la previsión de la demanda doméstica y urbana de agua.

Del análisis de las aproximaciones *per cápita* y de uso por unidad, concluimos que son herramientas sencillas de utilizar. No obstante, incluso cuando se aplican de forma más sofisticada, con desagregación por bloques de consumidores, estas técnicas ignoran el cambio de patrones de consumo que se puede producir en un grupo de población por la llegada de otro. Pensemos, por ejemplo, en el efecto de las relaciones geográficas y de dinámica urbana entre grupos que se generan simultáneamente.

Consideramos los modelos de uso final como una técnica que proporciona información de mucha utilidad. Sin embargo, presentan dos importantes desventajas: se trata de estudios que para que sean significativos exigen procedimientos de medida caros y tediosos, y proporcionan una instantánea estática de los usos finales de agua. En nuestra opinión este tipo de modelos serían un buen punto de partida para la inicialización de otros, por ejemplo basados en ABM, que los dotasen de dinamismo.

Los modelos de extrapolación pueden dar excelentes resultados cuando las hipótesis de partida son fijas, sin embargo, cuando se producen cambios en la estructura del sistema que no están recogidos en el modelo, aquellos que producían los mejores resultados pueden ser los que peores estimaciones hagan. Además, este tipo de modelos no son en absoluto explicativos, por lo que la posibilidad de utilizarlos para hacer políticas de intervención en la demanda es limitada. Una alternativa para suplir esta carencia son los modelos estructurales y causales, pero también presentan debilidades: no suelen ser modelos dinámicos, resulta muy difícil incluir evolución geográfica endógena y presentan problemas conceptuales importantes al introducir algunas variables relevantes como pueda ser el precio (pensemos en los costes intramarginales, por ejemplo).

Hemos estudiado otras técnicas interesantes para la estimación, como las redes neuronales, que a pesar de sus buenos resultados a corto plazo, presentan importantes limitaciones explicativas, al igual que las metodologías de tendencias. O las técnicas basadas en métodos de expertos, que poseen la importante ventaja de poder incorporar información muy relevante al proceso de predicción, pero tienen el problema de generar modelos no formales.

Las debilidades comunes a la mayoría de las técnicas de predicción de la demanda tradicionales son básicamente:

- a. La dificultad de abstraer y entender las hipótesis que encierran los modelos, y que por tanto dañan su poder explicativo.
- b. La dificultad de incorporar la dimensión geográfica a los modelos a pesar de que existe consenso de su importancia.
- c. La dificultad de integración multidimensional de aspectos con influencia.

Puesto que el modelado basado en agentes permite evitar muchos de estos problemas, consideramos que la elaboración de modelos con esta técnica puede dotar a los gestores de herramientas de predicción con teoría, que aportan nueva información para ayudar a tomar mejores decisiones.

En cualquier caso tampoco pensamos que hoy en día esta tecnología se pueda considerar completamente como una alternativa a las otras técnicas, sino simplemente como un complemento. No podemos olvidar que ABM presenta importantes debilidades, por ejemplo, el punto de equilibrio entre facilidad de abstracción y facilidad de análisis completo del modelo se desplaza muchísimo hacia el primer término, por lo que es muy difícil estudiar la robustez de las soluciones cuando el número de parámetros en el modelo es grande, algo habitual cuando el sistema es complejo.

## **2. La simulación basada en agentes va más allá de los *armchair models* de Simon.**

No sólo demostramos que se puede hacer Ciencia desde el problema con modelado basado en agentes, sino que además demostramos que se puede hacer Ciencia acumulativa mediante el refinamiento, adaptación (pensemos en el antecedente de FIRMABAR) y la integración de modelos.

Esta idea no es obvia, puesto que a pesar del avance en ABM, lo cierto es que un gran número de los modelos que se diseñan no tienen un referente real en el que la abstracción sea intuitiva. La misma crítica de no realismo que hacía Herbert Simon a los modelos academicistas y que recoge magistralmente el profesor Scout Moss exigiendo “*relevancia, realismo y rigor*” en su lección inaugural como Profesor de Simulación Social, podría aplicarse hoy en día a muchos de los modelos basados en agentes.

## **3. Hemos definido un marco conceptual y metodológico de modelado basado en agentes mediante un proceso de modelado con abstracción intermedia y con diferentes roles en el proceso.**

Para nosotros la esencia del ABM está en la forma de hacer la abstracción y no en la forma de hacer la inferencia. En nuestra opinión, se trata de una metodología que permite establecer una correspondencia directa entre las entidades que se identifican como participantes en un sistema observado y los agentes que constituyen el modelo abstraído. Esto implica no considerar la metodología como algo diferente al modelado matemático formal, sino precisamente como un caso particular, en el que las ecuaciones que gobiernan el sistema no son expresables de manera compacta y concisa, lo que dificulta el análisis, aunque a cambio se ofrece una mayor riqueza descriptiva que facilita el proceso de abstracción.

De hecho, al revisar los conceptos de la metodología, hemos establecido un marco conceptual general que resume el proceso de diseño, implementación y uso del modelado basado en agentes. Bajo este marco expandimos el modelo de abstracción intermedia de Edmonds, expandimos el modelo de roles en el diseño de Drogoul, Vanbergue y Meurisse, e identificamos las etapas del proceso.

**4. El modelado basado en agentes combinado con la información disponible en sistemas de información geográficos permite generalizar modelos abstractos definidos sobre estructuras de autómatas celulares regulares, a modelos más realistas sobre infraestructuras basadas en teselaciones irregulares.**

En el desarrollo de esta tesis adoptamos el metamodelo de dinámica urbana de Benenson como base del modelo urbano, guiándonos por su propia adaptación a la ciudad de Yaffo Tel-Aviv. El modelo original es un modelo basado en una infraestructura definida como autómata celular regular.

En el proceso de adaptación, hemos creado uno de los primeros modelos que utilizan como infraestructura de la simulación un sistema de información geográfico vectorial de la región de estudio. Hemos recogido la idea de vecindad en autómatas irregulares mediante grafos de Voronoi que utiliza el propio Benenson en su adaptación, y la hemos extendido para definir el concepto de vecindad de una vivienda situada en un bloque como las viviendas del propio bloque más las viviendas de los bloques adyacentes a la celda de Voronoi que define el centroide del bloque (con una distancia entre centroides menor a un umbral máximo).

**5. Como paradigma integrador, el modelado basado en agentes, al menos en algunos casos, permite incorporar modelos de diferentes procedencias, incluso los procedentes de modelos en ecuaciones diferenciales.**

Mientras que integrar modelos basados en agentes no resulta excesivamente difícil (al fin y al cabo cada agente en cada iteración puede tomar decisiones en tantos modelos como se quiera y que esto tenga influencia de un modelo a otro sólo dependerá de la definición de los modelos), y es el propio agente el que actúa como pivote de integración, no ocurre lo mismo cuando intentamos integrar modelos de aproximaciones tan diferentes como puedan ser modelos basados en agentes con modelos expresados en ecuaciones diferenciales.

Ha sido necesario abordar un problema de este tipo integrando el modelo de Bass con el resto del modelo. Por suerte, el modelo de Bass es fácilmente “discretizable”, es muy intuitivo interpretar las variables que definen las ecuaciones del modelo como la agregación de estados de las entidades discretas que forman el sistema. Siendo así, hemos podido utilizar el marco general propuesto por Borshchev y Filippov para modelar en cada agente dos posibles estados, y reconceptualizar el

modelo como basado en agentes. Hemos encontrado el problema adicional de que en su marco de “*traducción*” de modelos, los retardos asociados a la transición se calculan en el cambio de estado. Esto choca con el modelo general, de eventos discretos, por lo que hemos discretizado la función de retardo.

A pesar de haber sido capaces de incorporar este modelo diferencial como modelo basado en agentes, no estamos seguros de que este proceso sea completamente generalizable para casos más difíciles en los que la discretización de los niveles no sea tan intuitiva.

## **6. Aplicaciones ABM con datos reales necesitan una alta capacidad computacional.**

En el análisis de este modelo hemos encontrado restricciones en la capacidad computacional de la que disponemos. Puesto que existen estudios que demuestran que el número de agentes puede tener alguna influencia en los resultados de las simulaciones, sería deseable poder modelar sistemas en los que la correspondencia entre agentes en el modelo y entidades en el sistema observado fuese de uno a uno. Además, sistemas de esta complejidad requieren para conseguir exploraciones profundas del espacio de parámetros también una alta capacidad computacional.

Este caso se ajusta, al conjunto de situaciones en los que se hace necesario disponer de medios para escalar modelos y no limitar el tamaño de la simulación, por ejemplo mediante computación en grid.

## **7. Las fuentes de información son el principal obstáculo a la explosión de la integración entre el modelado basado en agentes y los sistemas de información geográficos.**

Benenson y Torrens en su libro *Geosimulation* vaticinan una explosión de modelos que aprovechen las fuentes de información digital y visualización que proporcionan los SIG, con el dinamismo y la capacidad para modelar procesos que ofrece el modelado basado en agentes. En el mismo libro los autores se sorprenden de que este fenómeno no se hubiese producido ya y que sólo se hayan desarrollado un puñado de modelos en todo el mundo aprovechando simultáneamente ambas tecnologías.

Desde nuestra experiencia, y viendo tres años después que la explosión no acaba de producirse, consideramos dos factores que pueden explicar este hecho. El primero es que el desarrollo de software que facilite el proceso de integración de ambas herramientas todavía está en su infancia. Este hecho implica una dificultad técnica difícil de salvar para todos aquellos que hacemos modelado basado en agentes, pero que no somos expertos informáticos. Plataformas como Swarm o Mason no incluyen librerías de comunicación con ninguna plataforma SIG, sólo RePast incluye un conjunto de clases, que además no están excesivamente depuradas. Es cierto que el interés en este tipo de modelado de empresas de software tan importantes como ESRI®, que están colaborando en el desarrollo de una *toolbox* integrada con ArcGIS®, invita al optimismo, pero lo cierto es que hoy en día esa herramienta es incapaz de abordar proyectos como el de esta tesis (la versión actual sólo permite implementar un tipo de agente geográfico).

La otra razón que, en nuestra opinión, explica la ausencia de multitud de modelos de este tipo es la dificultad de obtener información. Resulta complicado encontrar bases de datos con información georeferenciada accesibles para los investigadores y, una vez encontradas, resulta difícil integrarlas para suministrar información a las múltiples dimensiones de los modelos (económica, social, geográfica, etc.). De hecho, tuvimos que cambiar de SIG en función de la información disponible en cada plataforma<sup>121</sup>.

Incluso podríamos añadir una tercera dificultad en el proceso de tratamiento de datos y calibración de los modelos a partir de la información empírica, aunque esto no es una problemática del proceso de desarrollo de modelos de integración ABM-SIG, sino que es una conclusión general de cualquier estudio que requiera mucho tratamiento de datos.

---

<sup>121</sup> Se desarrolló una experiencia piloto sobre VisualGIS anterior a este trabajo (Galán *et al.*, 2007). Sin embargo, al carecer esta plataforma de la mayoría de la cartografía que precisábamos nos cambiamos a ArcGIS.

## 6.2 Conclusiones en el dominio de aplicación

### 8. Las dinámicas urbanas y el cambio de modelo territorial influyen de forma muy relevante en el consumo de agua doméstica.

A través del resultado de las simulaciones, hemos corroborado que no existe necesidad de incrementos de población en las regiones metropolitanas para que se produzcan variaciones de consumo doméstico. Los movimientos originados por la disonancia de diversos factores socioeconómicos, bajo la hipótesis de estrés-resistencia, unidos a cambios de tipología de vivienda pueden modificar los niveles de consumo en la región. Cuando estos movimientos son centrífugos desde el núcleo de las ciudades, con una tipología de ciudad compacta, hacia los municipios de la periferia, muchas veces con una tipología de ciudad difusa, típicamente el consumo aumenta.

### 9. El aumento de población no supone necesariamente un aumento lineal del consumo de agua.

Un clásico análisis de la evolución de consumo utilizando técnicas de proyección consistiría, ante un escenario con inmigración, en cuantificar dos variables: la población entrante y el consumo estimado por persona y tipo de población. El producto de ambas medidas proporcionaría una medida del crecimiento de consumo.

No obstante, el análisis con el modelo desarrollado, con consideración explícita del territorio y de la dinámica urbana, sugiere que un aumento de población inmigrante puede provocar un efecto no lineal en el consumo.

Es cierto que la introducción exógena de población tiene un efecto directo en el consumo doméstico en función de la tipología de vivienda que ocupen (entre otros factores). Sin embargo, la dinámica urbana regida por la hipótesis de estrés-resistencia, y a través del mecanismo de disonancias, puede generar procesos de clusterización entre grupos homogéneos y de movimiento de separación entre grupos, produciéndose fenómenos de redistribución geográfica que si no hubiésemos modelado explícitamente difícilmente hubiésemos podido detectar. Estos fenómenos, dependiendo de las alternativas de tipología de ciudad, pueden cambiar los patrones de consumo.

#### **10. La inercia del mercado inmobiliario afecta a la tipología de ciudad, y ésta al consumo doméstico.**

Hemos estudiado el efecto que puede tener sobre el consumo doméstico la hipótesis de un sobrecrecimiento de los precios de las viviendas en determinadas zonas de la ciudad. Si el crecimiento de los precios se traduce en un mayor nivel de disonancia, este efecto puede provocar un efecto de dispersión y vaciamiento hacia zonas de menor valor y estrés residencial pero con tipologías de vivienda de mayor consumo doméstico.

#### **11. La presión externa de información sobre el recurso es capaz de influir en el consumo.**

Hemos analizado el efecto que la presión de información general externa sobre el recurso (que podría representar el efecto de programas de conservación y eficiencia, educación o concienciación) es capaz de ocasionar de forma indirecta sobre el consumo doméstico de la región. La influencia se ejerce a través de los modelos de difusión de comportamiento.

Hemos comprobado además que el efecto es relativamente robusto al modelo de difusión elegido, si bien en modelos con comportamientos más heterogéneos, en los que puede haber comportamientos más centrados en el individuo, su influencia es menor. Se podría pensar que sociedades diferentes correspondiesen con modelos de difusión de comportamiento distintos.

La inclusión de este parámetro en el modelo se puede justificar para explicar el efecto del ligero descenso empírico que se encuentra el primer trimestre de 2006 en Valladolid y que coincide con las campañas de concienciación lanzadas por el Ministerio de Medio Ambiente.

Hemos comprobado que el impacto del parámetro puede ser muy superior si es cierta la hipótesis de que la actitud de concienciación sobre el recurso influye en la adopción de medidas de conservación. Bajo esta hipótesis, puede ocurrir que el efecto general de concienciación repercuta de manera indirecta sobre la adopción de una medida de ahorro, aunque la presión mediática específica de adopción de esa medida en concreto, no tenga valores muy altos.

## **12. El tiempo de adopción de las medidas tecnológicas no es inmediato y puede tener una importante influencia.**

Los estudios de difusión de la innovación demuestran que la adopción de un nuevo producto no es un proceso lineal, se trata de un proceso influenciado básicamente por la presión mediática específica sobre el producto y por la interacción social entre los individuos.

En nuestro análisis hemos estudiado el efecto de la difusión de productos que puedan tener un impacto en la conservación de agua. Las simulaciones corroboran que no es posible estimar el ahorro producido por una medida de conservación tecnológica doméstica, sin ligarla a una escala temporal.

Nosotros consideramos que la adopción de medidas de conservación se rige, en general, por los mismos procesos de difusión que la mayoría de los productos. No obstante, consideramos también que es plausible que en este caso particular de medidas ecológicas, se vea influenciada por la disposición general hacia la conservación que tenga el propio individuo. En el modelo implementado hemos incluido esta última hipótesis y hemos analizado la influencia en el proceso general. Al hacerlo, hemos comprobado que se produce un proceso de acoplamiento entre el modelo de difusión de la innovación con el modelo de difusión de comportamiento (basado en la vecindad local) y por tanto el efecto explícito del espacio toma influencia.

También hemos comprobado, mediante simulación, que la adopción generalizada de algunas medidas de conservación de este tipo sería capaz de compensar en algunos casos aumentos de consumo ocasionados, por ejemplo, por cambios de modelo territorial. Es más, la necesidad de estimar la velocidad de cada uno de los dos procesos justifica la utilización de aproximaciones dinámicas como el modelado basado en agentes.

### 6.3 Continuidad y extensiones

Comenzaré esta sección con una cita que se puede considerar como la última de las conclusiones de esta tesis, dice Cheng que *“Modelar situaciones del mundo real siempre conduce a insatisfacción, porque cada vez que un modelo ha sido mejorado, nos damos cuenta de un mayor nivel de complejidad en la realidad que nuestros modelos todavía no son capaces de tratar”*<sup>122</sup>. Esta afirmación encierra la esencia del inconformismo que caracteriza la investigación, pero también resume el inmenso campo de extensiones, continuidad y trabajo futuro que se abre tras este trabajo, potencialmente infinito. Aún así, intentaremos concretar algunas líneas de trabajo futuro, desde las que implican un menor impacto sobre el trabajo realizado hasta las que suponen un esfuerzo mayor.

Por supuesto, siempre podemos estudiar un mayor número de escenarios y comprender mejor la relación del espacio de parámetros. Uno de los escenarios que estudiaremos, a sugerencia de Aguas de Valladolid, es el impacto urbano y posteriormente en consumo de la llegada del tren de alta velocidad a Valladolid.

Aparte de profundizar en el estudio del modelo tal y como está, una extensión es mejorar las fuentes de información que nos han servido para parametrizar el modelo, incluyendo la introducción de cartografía digital del alfoz o la actualización y el enriquecimiento de las bases de datos socio-económicas. Una aproximación que nos hemos visto obligados a utilizar en este trabajo, pero que nos gustaría evitar en posibles actualizaciones, es el uso de un modelo híbrido. Hemos integrado un modelo basado en agentes pero con una caracterización de los agentes respecto al comportamiento basada en propiedades estadísticas. En futuros modelos trataremos de incorporar información de modelos de uso final que puedan ser extrapolables a la región de estudio, caracterización basada en encuestas o modelos cognitivos de comportamiento frente al consumo de recurso y así poder sustituir el modelado híbrido por un modelo basado en agentes puro.

Otra línea futura es introducir refinamientos y extensiones a los submodelos que ya incluye el modelo integrado. Entre las posibles mejoras resaltamos la

---

<sup>122</sup> Traducción propia de *“Modeling real world situations always leads to dissatisfaction, because each time a model has been improved, we become aware of a higher level of complexity in reality which our models cannot yet handle”*.

posibilidad de sustituir los modelos de difusión de comportamiento basados en redes locales (vecindades) por modelos que relajen esta hipótesis y que permitan estudiar el efecto de la difusión sobre redes sociales más generales, por ejemplo redes de pequeño mundo.

La cuarta línea de trabajo futuro consiste en ampliar el conjunto de submodelos integrados en el modelo general. Las posibilidades aquí son enormes, desde incluir en los agentes modelos que contengan información para calcular reacciones al precio, a incluir todo un módulo que complemente el trabajo desarrollado sobre la demanda con un módulo que incluya la red de abastecimiento y las pérdidas en la red, y las posibilidades técnicas de la oferta. Dentro de esta línea, en la actualidad se nos plantea la opción de incluir de forma explícita los efectos climáticos (y de su cambio) en el modelo. Respecto al consumo, estos cambios están implícitamente incluidos en la estacionalidad pero, en cuanto a restricciones de toma de agua para abastecimiento, han sido consideradas como dadas y suficientes para cualquier escenario.

Una última opción de continuidad de este trabajo es adaptar la metodología utilizada para el desarrollo de herramientas de simulación que puedan ayudar a entender sistemas y a tomar decisiones sobre planificación a otras áreas. Los potenciales dominios son muy amplios y van desde aplicaciones también relacionadas con la gestión de agua, como por ejemplo regadío en la agricultura, a contextos muy diferentes en los que sea útil el modelado explícito de los procesos individuales sobre una dimensión geográfica, como en el tráfico urbano, rutas de transporte, etc.

**V ANEXOS**



*The generation of random numbers is too important to be left to chance.*

Robert R. Coveyou,  
Oak Ridge National Laboratory

### Resumen

- *El propósito de este anexo es situar la simulación basada en agentes dentro del marco general de conceptos que forman los fundamentos de simulación.*
- *Para ello, partimos de las definiciones de sistema y modelo para llegar al concepto de simulación y analizar sus diferentes tipos y jerarquías respecto a su determinismo, a la posición del modelador frente al tiempo y a la dinámica del sistema. El objetivo de esta clasificación es definir los modelos de simulación de eventos discretos, concepto en el que se enmarcan la mayoría de los modelos basados en agentes aplicados a las Ciencias Sociales.*
- *Finalmente sintetizamos las ventajas y desventajas que presenta la simulación como metodología científica, y las diferentes etapas que conlleva la realización general de un modelo de simulación.*





## A.1 Definiciones y conceptos

Para entender las definiciones y el proceso de simulación, es preciso la comprensión rigurosa y formal de diferentes conceptos previos que sirven para crear un lenguaje común en esta tesis.

Definiremos *sistema* como *un objeto formado por un conjunto de partes entre las que se establece alguna forma de relación que las articula en la unidad que es precisamente el sistema* (Aracil y Gordillo, 1997). El sistema se nos manifiesta como un aspecto de la realidad dotado de cierta complejidad precisamente por estar formado por partes en interacción. Esta interacción coordina las partes dotando al conjunto de identidad propia.

La consideración de sistema debe ser enmarcada dentro de unos límites teóricos (Bennet, 1995). La idea de limitación dentro de esta definición de sistema responde a la necesidad de separar el referente de estudio del resto del universo y conservar la tarea de su estudio dentro de unos límites cognitivos razonables.

El *estado de un sistema* viene determinado por el conjunto de las variables necesarias para describirlo en cualquier instante de tiempo. Cada una de estas variables recibe el nombre de *variable de estado*.

Dependiendo de la forma de evolución temporal de las variables de estado se puede establecer una primera clasificación de los sistemas:

- *Sistemas discretos*: aquellos en los que sus variables de estado cambian en un conjunto de instantes de tiempo contable (finito o infinito).
- *Sistemas continuos*: aquellos en los que sus variables de estado cambian de forma continua a lo largo del tiempo.

Con frecuencia resulta interesante estudiar el sistema con el fin de entender y establecer las relaciones entre sus componentes o bien predecir cómo será su respuesta bajo ciertas condiciones nuevas a las que se lo quiera someter. En esos casos, las opciones que se abren son dicotómicas; a veces es posible experimentar con el propio sistema, sin embargo esto no es siempre posible. Otras veces, puede

ocurrir que el sistema ni siquiera exista todavía, o que incluso existiendo resulte impracticable experimentar con él, bien sea por limitaciones económicas, éticas, técnicas o simplemente que no se pueda controlar los parámetros del experimento. En esos casos el estudio del sistema se realiza mediante un modelo del sistema al que sustituye.

En este contexto, un *modelo* se puede definir como una representación de un sistema con el propósito de estudiarlo (Banks *et al.*, 1995; Pazos *et al.*, 2003). La definición anterior remarca la idea de que los objetivos del estudio de un sistema condicionan el conjunto de entidades consideradas en el modelo, es decir, para un estudio dado puede ser suficiente con considerar un subconjunto de las entidades que componen el sistema global. En este caso, la condición exigible a las entidades elegidas es que consideren los aspectos del sistema con influencia bajo las condiciones de estudio.

Reflexionando sobre la definición anterior el lector puede descubrir la doble vertiente del modelado de sistemas. Por definición, un modelo es una simplificación de un sistema, una abstracción del mismo, pero por otro lado debe ser suficientemente detallado y representativo como para permitir extraer conclusiones válidas en el sistema bajo las condiciones específicas de estudio. Es posible, por tanto, la elaboración de diferentes modelos de un mismo sistema, todos ellos válidos, si los propósitos de la investigación sobre el sistema son diferentes.

Una clasificación de los modelos desde una óptica aún más general que la división de los diferentes sistemas simbólicos de representación, y mucho más extendida fuera de las ciencias sociales, divide los *tipos de modelos* en modelos físicos, mentales y simbólicos (Ríos *et al.*, 1997):

- *Modelos físicos*. También se los conoce como modelos réplica, icónicos o prototipos. Básicamente este tipo de modelado reproduce modelos a escala del sistema original con el fin de estudiar ciertos aspectos específicos del sistema. Un ejemplo típico de este uso es la elaboración de prototipos en la industria aeronáutica o automovilística para someterlos a túneles de viento en las fases de diseño y hallar óptimos aerodinámicos (Kroll y Fassbender,

2005). Sin embargo no va a ser este tipo de modelado del que tratemos en la presente tesis.

- *Modelos mentales*. Son modelos mentales heurísticos o intuitivos. Son imprecisos, difusos y difíciles de comunicar. La introspección de este tipo de modelos con frecuencia conduce a modelos simbólicos.
- *Modelos simbólicos*. Se trata de la formalización de las ideas del modelador en forma de palabras, relaciones matemáticas o cualquier otra forma de representación abstracta<sup>123</sup>. A su vez estos modelos se pueden subdividir en modelos matemáticos y no matemáticos. Dentro del modelado matemático, también denominado cuantitativo, se encuentran aquellos modelos descritos por un conjunto de símbolos y relaciones lógico-matemáticas<sup>124</sup>. El modelado no matemático a su vez puede ser lingüístico (descripción verbal), gráfico y esquemático.

Por *modelización* se entiende el conjunto de procedimientos sistemáticos basados en conocimiento acumulado cuyo objetivo es abordar y resolver problemas. Es el proceso por el cual se establecen relaciones entre las entidades importantes de un sistema que se expresa en términos de metas, criterios de ejecución y restricciones que en conjunto constituyen el modelo (Ríos *et al.*, 1997).

Dentro del modelado matemático de un sistema, si el modelo de representación es suficientemente sencillo podremos encontrar una solución analítica que relacione las magnitudes que lo gobiernan. Esta solución es en general la preferible para el modelado de un sistema, puesto que posibilita una gran potencia de inferencia sobre sus características generales (para una descripción completa de esta metodología ver por ejemplo Basmadjian (1999)). Una solución analítica proporciona de forma compacta el comportamiento de un sistema para todo momento y cualquier parámetro de interés. Sin embargo, la elevada complejidad de muchos sistemas

---

<sup>123</sup> En este nivel es donde situamos la división en los diferentes tipos de representaciones simbólicas de los modelos de los sistemas sociales.

<sup>124</sup> Entre los que se encuentra el modelado computacional.

imposibilita<sup>125</sup> la obtención de modelos suficientemente ajustados con soluciones analíticas. En este último caso se recurre a los modelos de simulación.

Por *simulación* se entiende el proceso de diseño de un modelo de un sistema real y la ejecución de experimentos en ese modelo con el propósito del entendimiento del comportamiento del sistema y/o la evaluación de diferentes estrategias de operación del sistema (Shannon, 1998). Se trata de imitar la forma de operar de un proceso del mundo real o sistema a lo largo del tiempo.

La simulación se utiliza hoy en día para multitud de objetivos que van desde su utilización como método para desarrollar teoría, el objetivo de entender un proceso, predicción, sustitución de capacidades humanas, entrenamiento, entretenimiento hasta su utilización como herramienta de descubrimiento y formalización de teorías (Gilbert y Troitzsch, 1999; Edmonds, 2001).

Tanto si se lleva a cabo a mano o por ordenador, simular engloba la siguiente estructura (Banks, 1999):

1. Generación de una historia artificial de un sistema a partir de un modelo,
2. Observación de esa historia artificial con el objetivo de obtener inferencias de las características operativas del sistema real de estudio.

Los modelos de simulación proporcionan una estimación del comportamiento de un sistema para una configuración específica del modelo, no general como en el caso de soluciones analíticas<sup>126</sup>.

## A.2 Tipos y Jerarquías de modelos de simulación

El proceso de simulación tiene sentido tanto dentro del modelado físico como del modelado matemático. Sin embargo, de las diferentes categorías de modelos referidos, nos centraremos en la jerarquía y clasificación de los modelos de simulación matemáticos o abstractos.

---

<sup>125</sup> En algunas ocasiones puede ser posible encontrarla pero su elevado coste computacional puede desaconsejar su búsqueda.

<sup>126</sup> Sin embargo conviene aclarar que una simulación es equivalente a un teorema de suficiencia. Si un conjunto de parámetros y variables de estado iniciales de un modelo, llamémoslas P, producen un resultado R al ejecutar un determinado modelo de simulación, se puede establecer formalmente que bajo las hipótesis mencionadas si P entonces R.

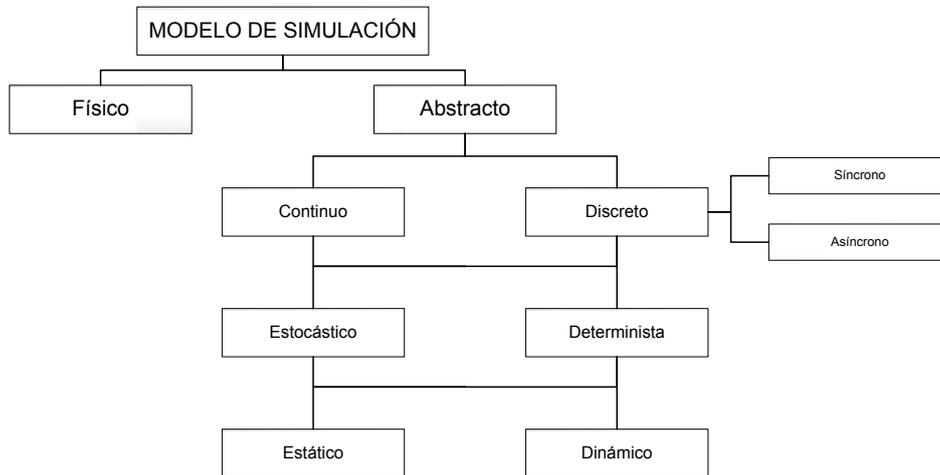
La primera dicotomía que surge en el modelado abstracto es la posición que toma el modelador frente al tratamiento del tiempo de simulación. Si el comportamiento de las variables de estado del modelo cambian de forma continua, en cada instante de tiempo, entonces se tiene un *modelo de simulación continua*. Si, por otro lado, el tipo de modelo es tal que los cambios de estado sólo ocurren en un conjunto determinado de instantes de tiempo, permaneciendo las características del modelo constantes entre ellos, entonces se tiene un *modelo discreto*. Al cambio de atributo de alguna de las variables de estado se lo denomina *suceso* y al tiempo entre dos sucesos *intervalo*. En los sistemas que evolucionan de forma discreta es necesaria una estrategia temporal para describir su evolución. Los sucesos que definen tal evolución y el paso del tiempo se controlan mediante un mecanismo de reloj o reloj de la simulación. Si el tiempo de simulación avanza según pasos fijos  $\Delta t$ , es decir, de  $t$  a  $t + \Delta t$ , a  $t + 2\Delta t, \dots$  entonces se tiene un tipo de *simulación síncrona u orientada a intervalos*. Si en cambio el tiempo de simulación sólo avanza del instante  $t$  de un suceso al  $t'$  del siguiente suceso se dice que se trata de un modelo de *simulación asíncrona u orientada a sucesos*. En este tipo de modelado sólo se representa explícitamente los sucesos, (ver más ampliamente en Ríos *et al.* (1997)).

Un modelo de simulación también puede ser clasificado en estático o dinámico. Un modelo de simulación estático, también llamado *simulación de Monte Carlo*, representa un sistema en un instante de tiempo particular. Un modelo de *simulación dinámico* representa los cambios del sistema a lo largo del tiempo.

Aquellos modelos de simulación que no contienen procesos aleatorios, o que no se modelan como tal, y por tanto carecen de variables aleatorias se los denomina deterministas. Un modelo de simulación estocástico o probabilística es aquel que tiene al menos una variable aleatoria. Obviamente entradas aleatorias conducen a salidas aleatorias, por lo que los modelos de simulación estocásticos sólo pueden ser considerados como estimaciones de las características reales del modelo. Por tanto, sus salidas han de ser tratadas con las consideraciones estadísticas apropiadas para obtener robustez en sus conclusiones.

Además de la clasificación de los modelos de simulación que acabamos de enumerar (figura 110), se pueden establecer otras muchas atendiendo a otros aspectos, así podríamos tener modelos orientados a ecuaciones o a bloques, modelos

analíticos o numéricos, modelos reales o artificiales, etc., es más, con frecuencia en la práctica se presentan modelos que combinan en determinados aspectos características diferentes. Por ejemplo, mediante ecuaciones diferenciales, características generalmente de los modelos dinámicos, junto con procesos de decisión y relaciones lógicas característicos de los modelos discretos.



**Figura 110.** Clasificación de los modelos de simulación.

La clasificación anterior, queda justificada al definir lo que se conoce genéricamente por simulación de eventos discretos, puesto que bajo esta definición se enmarcan la mayoría de los modelos de simulación social basados en agentes, objeto de esta tesis. Una *simulación de eventos discretos* es aquella que presenta la característica de ser dinámico, estocástico y discreto.

### A.3 Ventajas y desventajas de la simulación

Las ventajas y desventajas que tienen los usos generales de los modelos de simulación se pueden resumir en los siguientes aspectos (Banks, 1999; Chung, 2004):

Ventajas:

1. La simulación permite el estudio y la experimentación de las interacciones internas de un sistema complejo para aumentar el conocimiento, replanteamiento o rediseño, si es el caso, del sistema bajo estudio. Todo ello sin distorsionar ni perturbar el sistema bajo estudio.

2. Se puede explorar nuevas políticas, procedimientos operativos, reglas de decisión, diagramas de influencia, procedimientos organizativos, etc., sin interrumpir las operaciones del sistema real.
3. Se puede testear nuevos diseños, distribuciones, etc., sin incurrir en el consumo de recursos para su adquisición puesto que es posible probar nuevos conceptos y/o sistemas antes de la implementación.
4. Se puede verificar hipótesis sobre cómo o por qué ocurren determinados fenómenos.
5. El tiempo puede ser comprimido o expandido permitiendo acelerar o frenar el fenómeno investigado.
6. Se puede comprender la interacción de las variables.
7. Mediante el análisis de sensibilidad de los parámetros y variables de simulación es posible obtener los niveles de influencia de cada uno en las salidas y cómo interactúan y así estimar sus importancias relativas.
8. Un estudio mediante simulación puede ayudar a entender como opera un sistema realmente frente a como opinan los individuos que opera.
9. Se puede responder a preguntas del tipo “¿qué pasa si”? Esta característica es especialmente útil en el diseño de nuevos sistemas o políticas.
10. Se puede utilizar para verificar soluciones analíticas y como recurso pedagógico para reforzarlas.

#### Desventajas:

1. La simulación no puede dar respuestas precisas a partir de datos de entrada imprecisos.
2. Construir modelos requiere una formación específica. De hecho, es posible que dos modelos contruidos por dos modeladores competentes tengan muchas similitudes y sin embargo sean diferentes.

3. La simulación no puede dar respuestas sencillas a problemas complejos. Los resultados de una simulación pueden ser difíciles de interpretar. Puesto que muchos de las salidas de las simulaciones son consecuencia, al menos en parte, de variables aleatorias<sup>127</sup>, puede ser difícil determinar si la observación es resultado de las interrelaciones del sistema o de la aleatoriedad.
4. El modelado y el análisis de una simulación puede ser costoso en recursos.
5. Puede ocurrir que se utilice la simulación en casos en que sea posible, e incluso preferible, hallar una solución analítica.

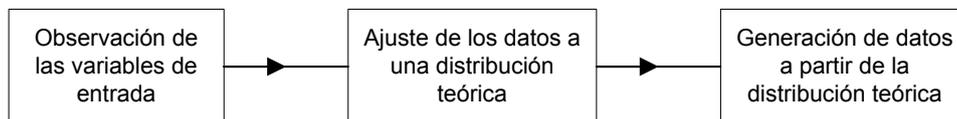
#### **A.4 Estructura general de una simulación**

1. Formulación del problema. Si no se desea resolver el problema equivocado, el primer paso de una simulación ha de ser asegurar que el problema que se va a estudiar mediante simulación ha sido apropiadamente descrito. El proceso de formulación del problema consiste en:
  - El establecimiento formal del problema. En este proceso, el equipo encargado de la formulación se suele apoyar en diagramas de pez y de Pareto.
  - Orientación del sistema. Familiarización del grupo encargado de la modelización mediante simulación con el sistema a modelar
2. Establecimiento de los objetivos específicos y la planificación general del proyecto. Los objetivos han de indicar que cuestiones han de ser contestadas mediante la simulación. En este punto es donde se determina si la simulación es la herramienta apropiada para cumplir con los objetivos. Además en esta fase se desarrolla la planificación del proyecto.
3. Conceptualización del modelo. Tras los pasos anteriores, el equipo a cargo del proyecto de simulación, se enfrenta a la modelización del sistema de estudio. Este proceso quizá sea el más difícil por tratarse más de un arte que de una ciencia, y engloba las siguientes actividades:

---

<sup>127</sup> En el caso de modelos estocásticos siempre.

- Clasificación del sistema de acuerdo a los criterios antes expuestos. ¿Se va a modelar el sistema como continuo o discreto? ¿síncrono o asíncrono?
  - Nivel de detalle del modelo.
  - Componentes y eventos a modelar.
  - Entradas y salidas del modelo.
4. Recogida de datos. El proceso de recogida de datos e información conlleva tres actividades, la obtención propiamente dicha, el ajuste de los datos obtenidos a una distribución teórica y la generación de datos a partir de la distribución teórica para el desarrollo de la simulación (figura 111).



**Figura 111.** Proceso de recogida de datos.

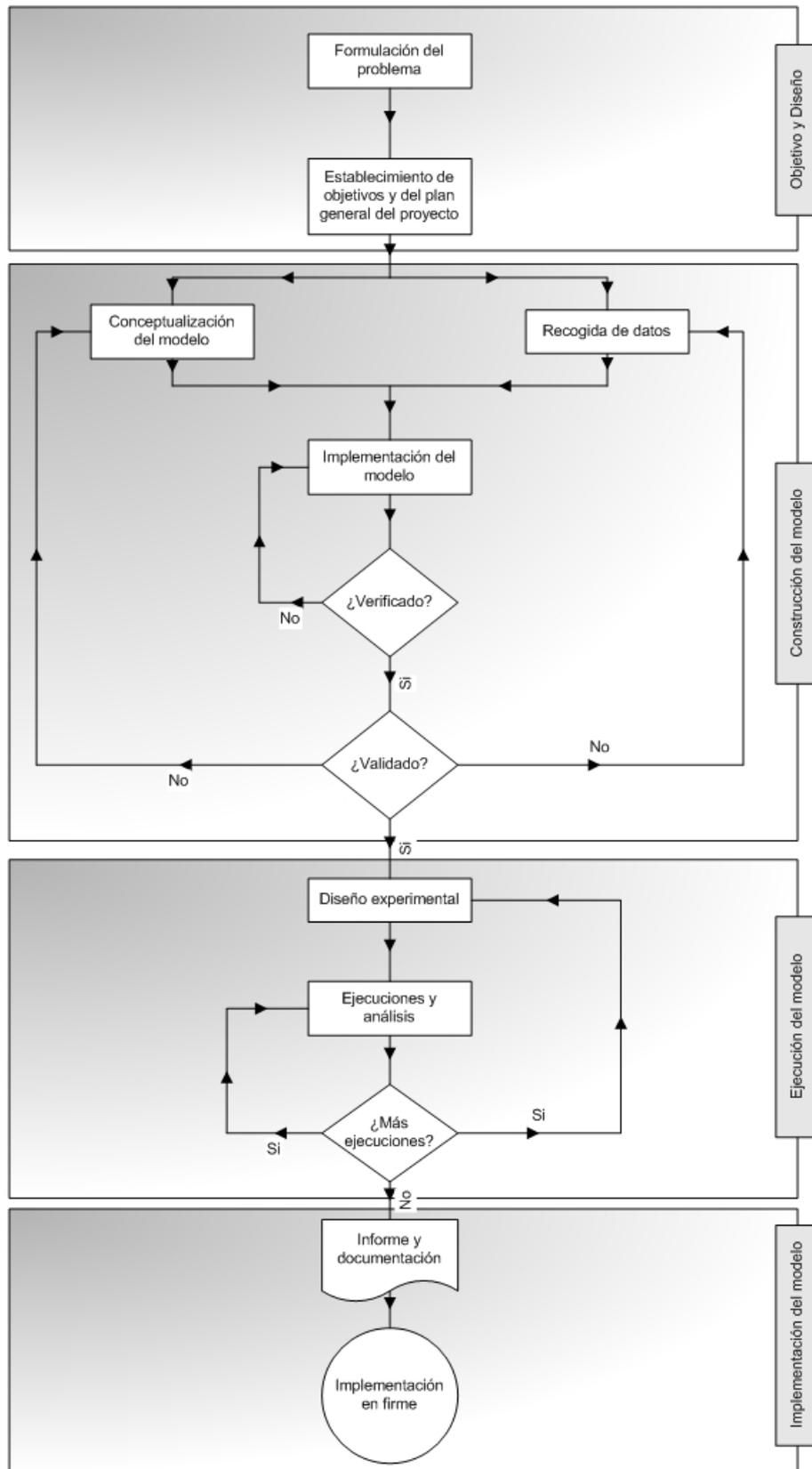
5. Implementación del modelo<sup>128</sup>. En esta fase se traduce el modelo conceptual en un modelo computacional con el fin de utilizarlo para obtener datos experimentales. Este proceso se lleva a cabo en dos fases, la elección del paquete de simulación o lenguaje a utilizar y la subsiguiente implementación del modelo en esa herramienta.
6. Verificación. Es el proceso de asegurar que el programa funciona como se pretende. La verificación consiste en asegurar la consistencia interna del modelo y el cumplimiento de sus hipótesis y especificaciones de diseño.
7. Validación<sup>129</sup>. Es el proceso de determinación de que el modelo es una representación precisa del sistema al que modela. Si la verificación consiste

---

<sup>128</sup> Esta fase en la mayoría de los libros específicos de simulación se conoce como traducción del modelo (*model translation*) y no implementación. Más adelante se justificará la no utilización del término.

<sup>129</sup> Algunos autores (Moss *et al.*, 1997) discuten la inversión de los términos validación y verificación argumentando razones etimológicas. Nosotros por evitar confusión adoptaremos la acepción más ampliamente aceptada en la comunidad científica.

- en “implementar el modelo correctamente”, la validación consiste en “implementar un modelo correcto”. Zeigler (1976) identifica tres tipos de *validez*: replicativa, predictiva y estructural, dependiendo de la bondad del modelo para reproducir datos reales ya realizados, por realizar, y si además refleja con fidelidad el modo en el que el sistema real se comporta.
8. Diseño experimental. Se trata de determinar las alternativas en las que se debe simular el modelo para llevar a cabo un análisis posterior adecuado. Las condiciones de cada caso deben ser analizadas desde un punto de vista estadístico. En cada caso, es necesario la determinación del período de inicialización, la longitud de cada una de las ejecuciones, y el número de repeticiones de cada una de las ejecuciones.
  9. Ejecuciones y análisis. La función de esta fase es proporcionar la información que se buscaba de acuerdo a lo que fueron los objetivos del proyecto. Generalmente, esta fase supone junto con la anterior, el principal desafío estadístico del proceso de simulación.
  10. ¿Más ejecuciones? Dependiendo del análisis de las ejecuciones que se hayan llevado a cabo, el analista puede precisar de ejecuciones adicionales si se necesitan para completar o realizar nuevos experimentos que puedan ser de interés.
  11. Informes y documentación. Uno de los pasos claves para la reutilización del modelo es su nivel de documentación. En un proyecto de simulación es necesaria dos tipos de documentación, la documentación del programa y del progreso y modificaciones del proyecto (Musselman, 1994). Ambos son necesarios para entender como funciona el programa, cual es su confianza, las posibilidades de reutilización, modificación...
  12. Implementación final. En caso de ser un modelo para su comercialización y uso.



**Figura 112.** Pasos en el desarrollo del modelado por simulación. Adaptado de Banks *et al.* (1995).



## B. Herramientas y plataformas de modelado en ABM

Anexos

*We shall not fail or falter; we shall not weaken or tire...Give us the tools and we will finish the job.*

Sir Winston Churchill (1874 - 1965),  
BBC radio broadcast, Feb 9, 1941

### Resumen

*En la actualidad existen multitud de alternativas software para implementar modelos basados en agentes. Estas van desde simples hojas de cálculo, a lenguajes de propósito general o a librerías y aplicaciones mucho más específicas. La elección de una u otra dependerá tanto del objetivo de la aplicación como de los conocimientos del programador o programadores. El objetivo de este anexo es exponer de las características de las principales herramientas y plataformas disponibles.*

*La revisión se centra principalmente en tres herramientas –Swarm, RePast y SDML–, pero se completa con plataformas también muy extendidas hoy en día en las ciencias sociales como Mason o NetLogo, y con alternativas específicas que han sido o pueden ser una opción dependiendo del contexto.*

*Inicialmente comentamos las principales características de Swarm, por ser la plataforma pionera para este tipo de aplicación y el lenguaje de desarrollo de la aplicación FIRMABAR, antecedente directo del modelo implementado en esta tesis. A continuación analizamos RePast, librerías en Java heredadas de Swarm, que hemos utilizado de forma mayoritaria en la implementación del modelo de esta tesis doctoral.*

*También estudiamos el funcionamiento general de SDML, lenguaje con un doble interés: se trata de la herramienta de implementación de las versiones iniciales de FIRMABAR y del modelo del Támesis, y además representa un caso paradigmático de programación declarativa, alternativa a la programación procedimental, mucho más extendida y conocida. En el anexo se comparan las características más relevantes y las etapas de ejecución de ambas aproximaciones.*





## B.1 Introducción

Dentro del amplio mundo de los lenguajes de agentes una primera, pero importante, clasificación para situarse correctamente podría ser dividirlos entre aquellos con el fin de comunicar sistemas distribuidos entre sí<sup>130</sup> y los que tienen como objetivo desarrollar modelos basados en agentes en los que situamos nuestro análisis. Más concretamente, nos centraremos en aquellas librerías especialmente diseñadas con el objetivo de incluir una componente social en los modelos.

En la actualidad, y a pesar de que han surgidos diversos intentos por identificar las características que debería tener una plataforma software ideal para el desarrollo de modelos basados en agentes (Edmonds, 2003; Marietto *et al.*, 2003) e incluso existiendo algún intento de clasificación en cuanto a bondad de las herramientas disponibles (Tobias y Hofmann, 2004), no existe consenso en la comunidad científica sobre qué herramienta es mejor. Ni siquiera existe consenso en si una única plataforma software sería la situación ideal, a pesar de que algunos autores (Terna, 1998; Bruun, 2001) avisan de los posibles efectos “*Torre de Babel*” que pudieran surgir de la excesiva oferta de posibilidades existentes.

Lo cierto es que hoy en día un modelador basado en agentes tiene un amplio abanico de opciones en cuanto a herramientas de desarrollo software para implementar un modelo. Las diferentes alternativas se pueden clasificar a partir de los diferentes grados de completitud del software. Gilbert y Terna (2000) establecen tres grados de completitud. En el nivel más bajo, utilizando por ejemplo C, el desarrollador ha de encargarse tanto del manejo de las estructuras de memoria de los agentes como de los bucles para la generación de eventos. Esta forma de operar hoy en día resulta muy costosa y no aporta ventajas significativas frente a mayores grados de completitud. La siguiente alternativa es la de utilizar técnicas y lenguajes de propósito general pero con capacidades de programación orientada a objetos (POO), por ejemplo C++, Objective-C ó Java. Utilizando este tipo de lenguajes, los desarrolladores tienen la opción de aprovecharse de las ventajas de la modularidad y reutilización de código que aporta la POO. Además, al tratarse de lenguajes de

---

<sup>130</sup> Ver una revisión clásica de metodologías de agentes desde una perspectiva no centrada en el modelado y simulación de sistemas en (Iglesias *et al.*, 1999).

propósito general, el modelador tiene una libertad casi absoluta para implementar todo aquello que imagine sin restricciones de ningún tipo. Sin embargo, el problema de esta aproximación estriba en que, aunque es posible añadir librerías específicas que conozcamos, en general es necesario reimplementar algoritmos básicos, librerías gráficas, librerías estadísticas, etc., cada vez que se desarrolle un modelo. En un tercer nivel de mayor sofisticación, existen en la actualidad paquetes que recogen aquellas librerías generalmente requeridas por los modeladores y las ofrecen de manera conjunta para facilitar el desarrollo. Por último nosotros añadimos a los niveles de completitud propuestos por Gilbert y Terna (2000), un cuarto nivel de software, los modelos desarrollados a partir de plataformas muy específicas, a veces conocidos como los *just pour water models*. En este tipo de plataformas, a veces en realidad metamodelos, el modelador está completamente restringido al dominio para el que fue diseñado el modelo, aunque resulta relativamente sencillo parametrizar la plataforma para generar modelos en ese dominio, por ejemplo *FEARLUS* (Gotts *et al.*, 2003b).

Dependiendo de los conocimientos y habilidades del modelador y del propósito específico del modelo, se elegirán unas herramientas u otras. Lo más habitual es utilizar librerías y herramientas basadas en características orientadas a objetos. Dentro de estas opciones nos encontramos con librerías muy conocidas como *Swarm*, *RePast*, *Ascape* o *Mason* basadas en lenguajes de propósito general como Java ó Objective-C. Una de las principales desventajas de estas aproximaciones es precisamente que el modelador necesita conocer con cierto nivel los lenguajes en los que se implementan las librerías. Intentando evitar este importante inconveniente existen paquetes orientados a estudiantes que permiten la construcción de modelos muy simples mediante *programación visual* de forma muy sencilla e intuitiva, como por ejemplo *StarLogo* y *AgentSheets*. Sin embargo debido al público objetivo al que van dirigidos estas plataformas se han visto obligadas a sacrificar funcionalidad (dificultad para implementar mecanismos evolucionistas, procesos cognitivos, etc.) en busca de sencillez (Gilbert y Bankes, 2002). Otro intento para evitar el inconveniente de tener que conocer el lenguaje en el que se basan las librerías, en este caso *SmallTalk*, es el llevado a cabo con las plataformas

*SDML*, *Cormas* o *Desire*<sup>131</sup>. Estas plataformas poseen muchísima más expresividad y funcionalidades que las anteriores, pero a pesar de que no es necesario aprender lenguajes de programación para utilizarlos, requieren el aprendizaje específico de sus interfaces que a veces resultan tan complicados como pueda ser aprender un lenguaje de propósito general (¡o más!).

A lo largo de lo que resta de apéndice repasaremos con un poco de detalle las librerías *Swarm* en la que se desarrolló el modelo FIRMABAR, precursor de la aplicación de esta tesis y *RePast* sobre la que se ha implementado el modelo descrito en esta tesis. Comentaremos las principales características y diferencias de estas librerías con *SDML*, lenguaje en el que se elaboró una primera versión muy sencilla del modelo FIRMABAR. Posteriormente haremos un breve recorrido por el resto de plataformas disponibles existentes para simulación basada en agentes resaltando sus principales características.

## B.2 Swarm

Probablemente la herramienta de simulación más conocida, debido a que fue una de las pioneras, es *Swarm*<sup>132</sup>. El proyecto *Swarm* se inició en 1994 dirigido por Chris Langton<sup>133</sup> en el *Santa Fe Institute* de Nuevo México (Hiebeler, 1994; Minar *et al.*, 1996; Stefansson, 2000; Daniels, 2000).

Su objetivo era el desarrollo tanto de un vocabulario, como de un conjunto estándar de herramientas para el desarrollo de modelos de simulación a través del modelado de colecciones de agentes que interactúan concurrentemente en un entorno dinámico. Inicialmente nació desde la biología computacional, motivo por el que esta especialmente diseñado para explorar el comportamiento de un gran número de agentes en interacción relativamente sencillos (Carley y Gasser, 1999).

*Swarm* consiste en una colección de librerías portables y orientadas a objetos de componentes reutilizables que proporcionan un conjunto de herramientas flexible

---

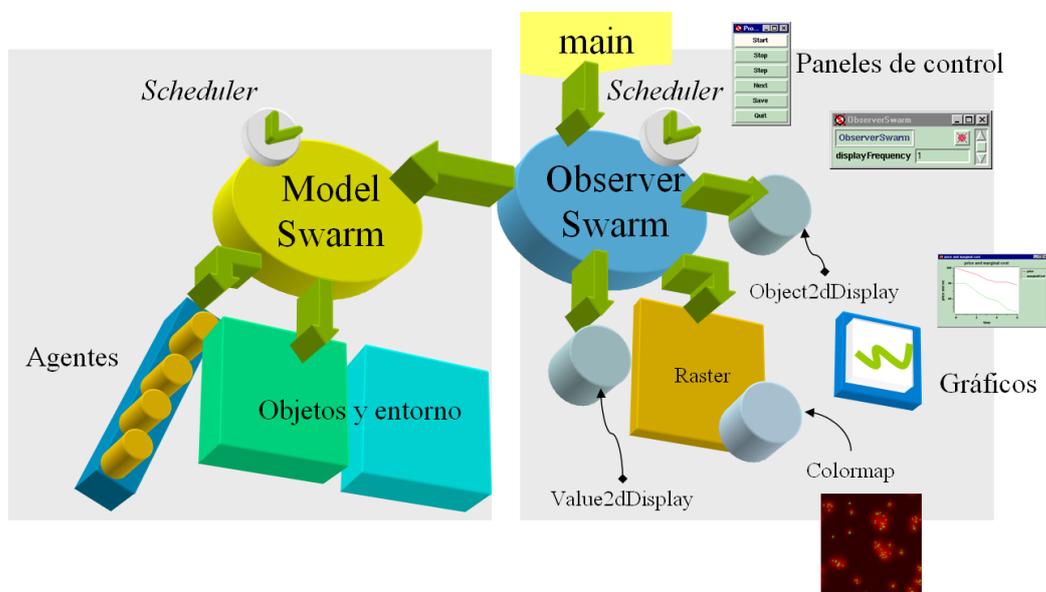
<sup>131</sup> Aunque la aplicación fundamental de *Desire* no se ha orientado específicamente hacia el modelado y la simulación <http://www.cs.vu.nl/vakgroepen/ai/projects/desire/>.

<sup>132</sup> [http://www.swarm.org/wiki/Main\\_Page](http://www.swarm.org/wiki/Main_Page)

<sup>133</sup> Colaboradores: Chris Langton, Roger Burkhart, Nelson Minar, Manor Askenazi, Glen Ropella, Sven Thommesen, Marcus Daniels, Alex Lancaster y Vladimir Jojic.

para que el desarrollador construya modelos y analice, visualice y controle experimentos en ellos.

El componente fundamental que organiza los agentes en un modelo *Swarm* es el *swarm*. Los *swarms* son los componentes básicos de las simulaciones; un *swarm* no es más que una combinación de una colección de objetos que representan los agentes, un programa de actividades y eventos para los agentes (*scheduler*) y un conjunto de inputs y outputs que puede recibir o dar el *swarm*. Cada *swarm* representa un modelo completo dentro de una simulación con su propia representación de tiempo. Los agentes en el modelo interactúan mediante series de pasos de tiempo, en realidad una simulación *Swarm* es modelo de simulación de eventos discretos. Las acciones se especifican mediante una colección de métodos únicos para cada clase de agente. El *scheduler* especifica el orden en el cual estos métodos se ejecutan a lo largo del tiempo. En esta estructura se cumple uno de los pilares de la aproximación descentralizada que caracteriza al ABM, aquí nada en el modelo especifica el comportamiento global del sistema, sino que este comportamiento emerge como resultado de la interacción de los agentes individuales a través del tiempo.



**Figura 113.** Estructura básica de una simulación en *Swarm*, formada por un *swarm* en el que se encapsula el modelo, el *modelswarm*, y por un *swarm*, el *observerswarm*, en un nivel mayor que lo monitoriza

Una característica fundamental y útil de la filosofía *Swarm* es que la estructura del programa posee dos diferentes niveles (figura 113). En el primer nivel, se implementa el modelo (*ModelSwarm*) (se pueden tener modelos anidados, *swarms* dentro de *swarms*), y en un segundo nivel, se implementa el observador (*Observer*) como un *swarm* encargado de “observar” la evolución de la simulación. En esta filosofía se considera el modelo como un objeto con el que interactuar, recoger los datos que se necesitan y enviárselos a las herramientas de visualización (gráficos, diagramas, histogramas...). En *Swarm* estos dos niveles están completamente diferenciados, proporcionando un sistema extremadamente poderoso para controlar la ejecución de cualquier simulación. En otras palabras, el *ModelSwarm* constituye el núcleo del programa y el *swarm* que encapsula el modelo completo simulado, que a su vez es el principal input del *swarm Observer*.

### B.3 RePast

En la actualidad quizá el paquete académico de modelado basado en agentes con mayor proyección dentro de las herramientas disponibles en el campo sea RePast<sup>134</sup>. RePast corresponde al acrónimo de *REcursive Porous Agent Simulation Toolkit*. Inicialmente fue concebido desde la Universidad de Chicago<sup>135</sup> (Collier *et al.*, 2003; North *et al.*, 2006) como un conjunto de librerías de clases de Java que funcionase conjuntamente con la estructura de simulación *Swarm*. La aparición de *JavaSwarm* que permitía la simulación en Java mediante una interfaz en Objective-C hizo innecesaria esta concepción, sin embargo, ya se habían puesto los cimientos para el desarrollo de una plataforma independiente completamente escrita en Java pero que se apropiaba de las abstracciones clave que soportaban la potencia de *Swarm*. Hoy en día las principales diferencias entre RePast y *Swarm* son que RePast tiene múltiples implementaciones puras en diferentes lenguajes de programación orientados a objetos (Python y Java) y da soporte a herramientas para la realización de regresiones, programación de algoritmos genéticos o incluso la integración con Sistemas de Información Geográfica por ejemplo mediante GeoGraph 3D (Dibble y Feldman, 2004).

---

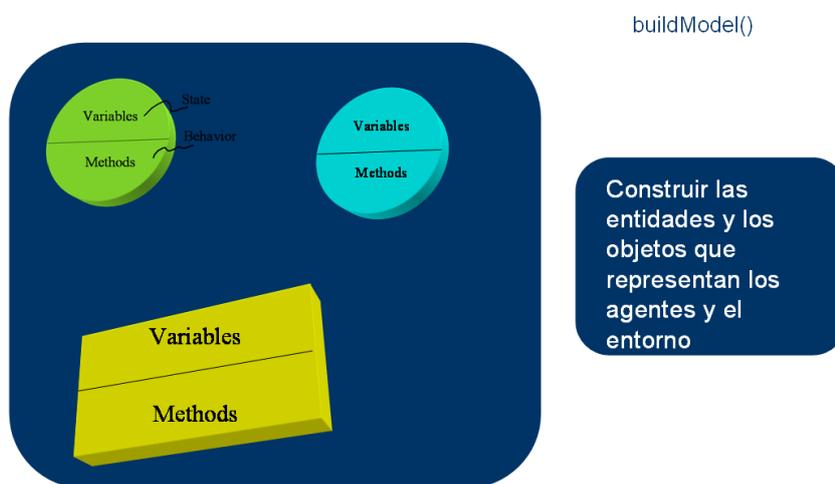
<sup>134</sup> <http://repast.sourceforge.net/>

<sup>135</sup> Después de haber sido mantenido por la Universidad de Chicago y el Argonne National Laboratory. Repast está gestionado en la actualidad por Repast Organization for Architecture and Development (ROAD).

En cuanto a la estructura, un modelo en RePast se puede considerar como una colección de agentes de cualquier tipo y un sistema que configura y controla la ejecución de los agentes de acuerdo a un programa (Collier, 2003). Al igual que en Swarm, RePast se comporta típicamente como un simulador de eventos discretos cuya unidad de tiempo es un “*tick*”. También se utiliza con frecuencia como un modelo basado en pasos, caso degenerado del anterior, en el que los agentes realizan una acción equivalente en cada *tick*.

En un análisis muy simplificado se puede considerar que la elaboración de un modelo en RePast conlleva tres etapas:

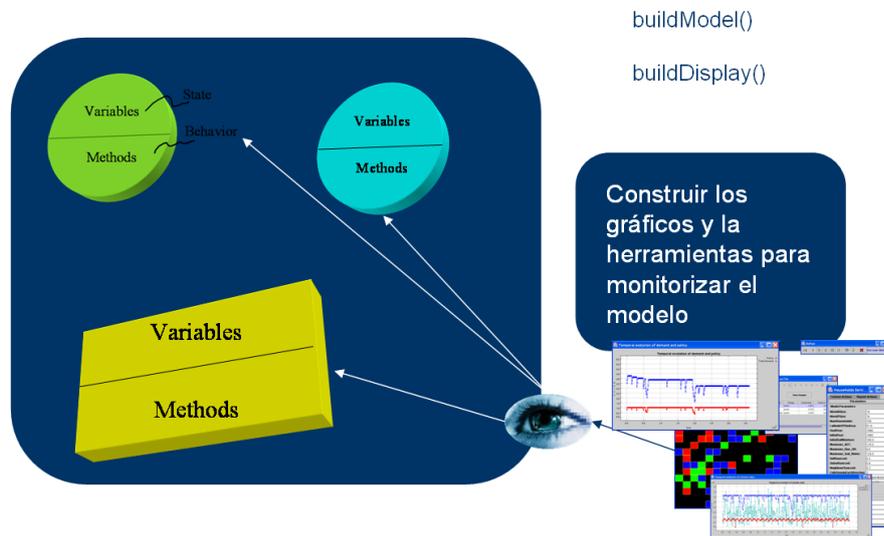
1. En la primera etapa se debe definir cada agente, y el entorno en el que se va a ejecutar la simulación. Desde un punto de vista computacional cada una de estas entidades se implementan mediante la instanciación de clases de acuerdo a la programación orientada a objetos. Estas clases constan de variables que representarán los estados de cada agente y el entorno y de métodos que representan las diferentes acciones que pueden llevar a cabo cada uno de ellos (figura 114).



**Figura 114.** El primer paso de en la construcción de un modelo en RePast es la definición de los estados y comportamientos de los agentes (representados como círculos) y del entorno (representado como un rectángulo) mediante la definición del método `buildModel()`.

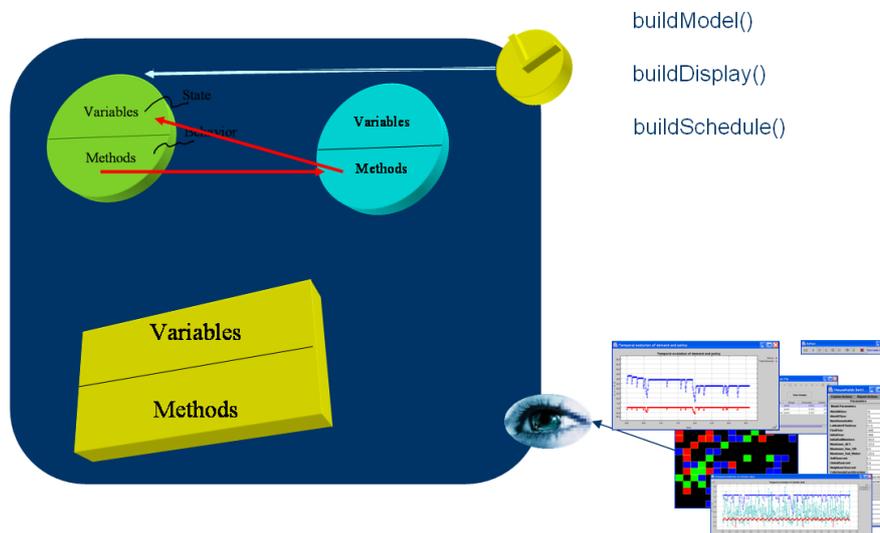
2. La segunda etapa comprende la tarea del diseño del conjunto de herramientas computacionales encargadas de visualizar los datos generados que resulten interesantes en el modelo (figura 115). Estas herramientas pueden utilizarse

tanto para explorar el sistema de forma agregada, visualizando datos medios por ejemplo o hallados mediante algún estadístico apropiado a partir de los datos que se van generando en la simulación, o bien para hacer algún seguimiento específico de alguna variable particular de algún agente.



**Figura 115.** El segundo paso se corresponde con la creación de las herramientas de visualización y control del modelo mediante la definición del método `buildDisplay()`.

3. En el tercer paso en RePast, se dota de dinámica al modelo. Una vez definidas las entidades se trata de permitir su interacción. Para ello se implementa el programa de acciones que han de ocurrir en el modelo, se implementa el *scheduler*. La misión de este objeto es la de invocar, de acuerdo al modelador y en cada *tick* que sea preciso, métodos de cada uno de los agentes que vayan a actuar. Estos métodos invocados pueden ocasionar a su vez interacciones entre agentes, modificaciones del entorno o de sus propios estados por ejemplo. Una vez el método ha acabado el *scheduler* vuelve a invocar otro método en otro agente y así sucesivamente hasta que acabe un determinado *tick* (figura 116).



**Figura 116.** La tercera etapa se corresponde con la creación del programa de invocación de eventos en el modelo mediante la definición del método `buildSchedule()`.

## B.4 Strictly Declarative Modelling Language, SDML

SDML<sup>136</sup> (*Strictly Declarative Modelling Language*) es un lenguaje de programación declarativo con características orientadas a objetos y basada en una lógica no monótonica y temporal como KD45 (Konolige, 1992). SDML está implementado en SmallTalk por Steve Wallis junto con otros miembros del *Centre for Policy Modelling* de la Manchester Metropolitan University (Moss *et al.*, 1998). Se trata de una evolución a partir de un lenguaje de modelado no declarativo implementado por el Profesor Scott Moss.

<sup>136</sup> <http://sdml.cfpm.org/>

En SDML el conocimiento se representa mediante bases de reglas y bases de datos, utilizando como mecanismos de razonamiento sistemas de encadenamiento hacia adelante y hacia atrás. A los agentes se les dota de un conjunto de reglas que determinan su comportamiento y que pueden compartir o no con otros agentes debido a sus características orientadas a objetos. Puesto que se basa en un fragmento de una lógica fuertemente fundada (FOSGAL) la consistencia formal está asegurada. La idea es la introducción de una lógica autoepistemológica para permitir a los agentes razonar sobre sus propias creencias. Esto se lleva a cabo mediante la introducción del operador creencia que permite distinguir entre los hechos ciertos y los que se cree que son ciertos, permitiendo obtener conclusiones de asunciones sin introducir incoherencias entre aquellas (López-Paredes, 2001).

Mientras que en RePast se ha de especificar el proceso de antemano la estructura de programación de SDML hace que este emerja. Conceptualmente y de forma muy simplificada el proceso de simulación en SDML se podría subdividir en las siguientes fases<sup>137</sup>:

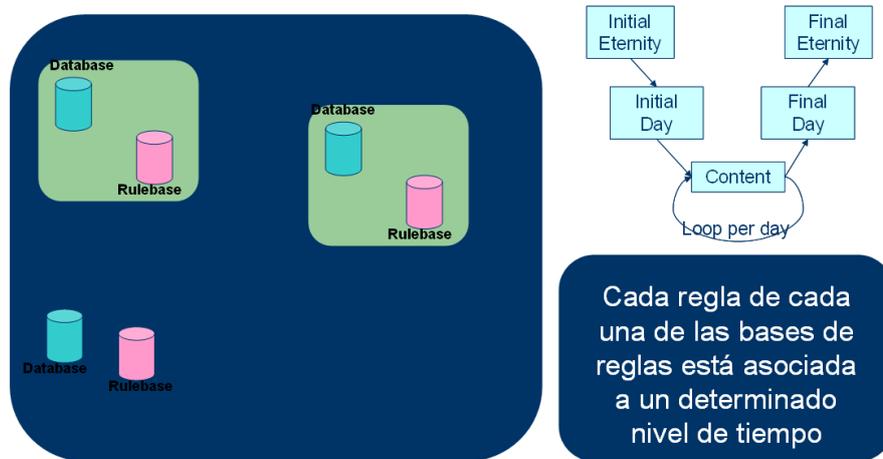
1. Definición de los niveles de tiempo. En SDML un concepto clave es la estructura jerárquica de niveles de tiempo que decide el modelador (figura 117). Por ejemplo se podrían definir *Initial and Final Eternity* como tiempos asociados al comienzo y al final de la simulación, *Initial and Final Week* como tiempos asociados al comienzo o final del período de tiempo semana<sup>138</sup> y *Content* como tiempo asociado al transcurso de la semana (no a los instantes iniciales o finales).
2. En SDML se parte de la implementación de un conjunto inicial de hechos ciertos del entorno y de creencias de los agentes. El conjunto de creencias y estados de los agentes y del entorno se implementan como bases de datos. El comportamiento de los agentes se especifica mediante un conjunto de implicaciones. Si un conjunto de predicados es cierto (antecedentes) entonces otro conjunto de predicados es también cierto (consecuentes). Cada

---

<sup>137</sup> Esta división no se corresponde a las etapas propuestas para el desarrollo de un modelo sino al proceso conceptual de ejecución que tiene lugar en una simulación. Las etapas de desarrollo podría subdividirse en la creación o carga de los módulos a utilizar, la definición del espacio de trabajo, la construcción de los agentes u objetos, la definición de los niveles de tiempo, el establecimiento de los datos iniciales y la ejecución de las simulaciones (Posada y López-Paredes, 2003).

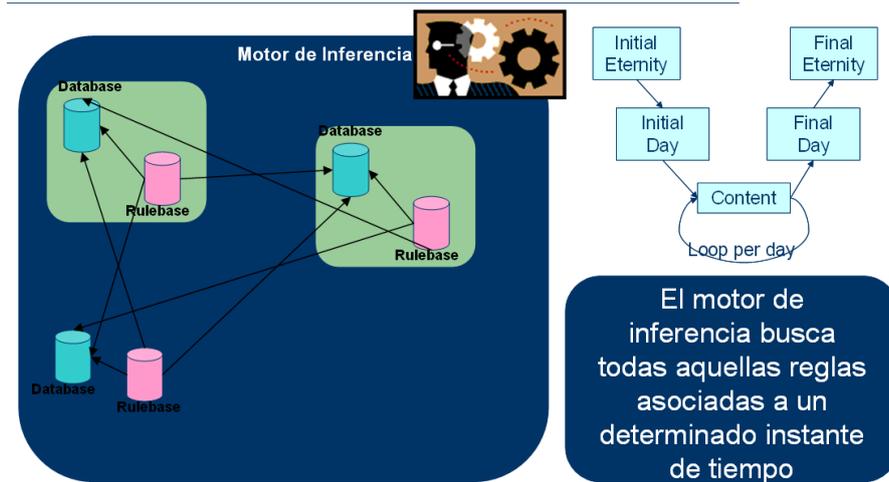
<sup>138</sup> Pueden definirse tantos niveles de tiempo como se desee.

implicación de este tipo se conoce como *regla*. Cada una de estas reglas está asociada a un determinado nivel de tiempo.



**Figura 117.** Todos los agentes y el entorno en SDML están definidos por una base de datos que define los hechos ciertos para cada uno y por una base de reglas que determina su comportamiento.

3. Una vez se ha configurado inicialmente el conjunto de reglas y estados ciertos iniciales aparece en la simulación el motor de inferencia basado en la lógica antes mencionada. Su función es recorrer todas las reglas evaluando sus antecedentes en un momento de tiempo dado, en caso de que los antecedentes sean ciertos el motor dispara la regla haciendo ciertos los consecuentes que a su vez modificaran determinados hechos en las bases de datos de los diferentes agentes. En el caso de esta estructura de programación declarativa, el modelador establece los estados del modelo dejando que el proceso de simulación emerja, es decir, los estados determinan el proceso. La idea que subyace al desarrollo de estos modelos es que el programador SDML debe identificar las entidades y relaciones que merece la pena implementar, y es el motor de inferencia basado en la lógica del programa el que se encarga en convertir los hechos en la solución del problema (figura 118).



**Figura 118.** El motor de inferencia evalúa los antecedentes de cada regla y en caso de ser ciertos ejecuta los consecuentes modificando las bases de hechos ciertos relacionadas de los diferentes agentes de la simulación

4. Una vez que el motor de inferencia no encuentra más reglas con antecedentes ciertos la simulación pasa al siguiente nivel de tiempo.

A modo de síntesis se presentan las principales diferencias entre RePast y SDML en la tabla 18.

**Tabla 18.** Principales diferencias entre RePast y SDML como paradigmas de programación procedimental (o procedural) y declarativa. Fuente: Galán *et al.* (2003b).

	RePast	SDML
<b>Información General</b>		
Nombre Completo	REcursive Porous Agent Simulation Toolkit	Strictly Declarative Modelling Language
Desarrollado por	The University of Chicago's Social Science Research Computing	Centre for Policy Modelling – Manchester Metropolitan University
Web	<a href="http://repast.sourceforge.net/">http://repast.sourceforge.net/</a>	<a href="http://sdml.cfpm.org/">http://sdml.cfpm.org/</a>
Lenguaje original	Java	Smalltalk
Paradigma de modelado	Imperativo	Declarativo
Características de POO	Sí	Sí
Extensibilidad	Características de POO	Herencia de módulos
Tiempo relativo de ejecución	Bajo	Alto
Lógica	No	FOSGAL (KD-45)
<b>Prestaciones Tecnológicas</b>		
Técnicas de gestión de la programación	Simulador basado en eventos	Simulador lógico basado en eventos
<b>Prestaciones de Dominio</b>		
Lanzamiento de agentes	Los agentes pueden ser lanzados como objetos e hilos	Los agentes pueden ser lanzados como objetos
Gestión de errores intencionados	No disponible	No disponible
Integración con entornos controlados y no controlados	No disponible	No disponible

Prestaciones de Desarrollo		
Desarrollo de arquitecturas de agentes	Arquitectura plana	Especialmente orientado para agentes lógicos
Métodos de gestión de la comunicación	Modo síncrono	Modo síncrono y asíncrono
Abstracciones organizativas	No trabaja ni con roles ni grupos	No trabaja con roles. Utiliza grupos a través de la estructura de container.
Gestión de sociedades múltiples	Disponible	Disponible
Gestión de estructuras espaciales y redes	Fácilmente mediante paquetes espaciales y de redes	No muy desarrollada
Prestaciones para el Análisis y la Exploración		
Observar/intervenir en eventos de comportamiento	No disponible formalmente	Aceso a las bases de datos y seguimiento de las reglas
Observar/intervenir en eventos cognitivos	Sondas ( <i>probes</i> ) los objetos	Aceso a todas las bases de reglas y datos durante la simulación
Gestión del Análisis de Datos	Paquetes específicos como Analysis o GUI	Herramientas pobres
Capacidades de depuración	No disponible	Detección automática de conflictos, Debbuger y Querying

## B.5 Otras plataformas y herramientas

### B.5.1 Ascape

Ascape<sup>139</sup> es una herramienta creada en la *Brookings Institution* por Miles T. Parker (2000; 2001) para el diseño, análisis y distribución de modelos basados en agentes. El nombre de Ascape hay que buscarlo etimológicamente de dos raíces, del término *agent* y del término *scape*<sup>140</sup>, referido al territorio donde se sitúan los agentes (Inchiosa y Parker, 2002). Inicialmente sus objetivos de diseño incluyen la abstracción y generalización de los conceptos clave de modelado de agentes, la facilidad de uso y de configuración y el máximo rendimiento alcanzable. Fue desarrollado principalmente para soportar modelos de sistemas económicos y sociales, que por regla general constan de agentes con reglas de comportamiento interactuando en redes, aunque la estructura puede adaptarse a otros tipos de modelos.

En Ascape los agentes se organizan en *scapes*; colecciones de agentes como puedan ser *arrays* o retículas. En Ascape los *scapes* son agentes propiamente dichos, se trata de crear modelos mediante colecciones de colecciones de agentes. La ventaja

<sup>139</sup> <http://www.brook.edu/es/dynamics/models/ascap/default.htm>

<sup>140</sup> Nombre inspirado en el famoso Sugarscape (Epstein y Axtell, 1996).

de Ascape se sustenta precisamente en las funciones que posee para simplificar la gestión, visualización y estudio estadístico de los *scapes*. Conviene tener en cuenta que puesto que los *scapes* son agentes, es posible crear jerarquías con ellos para organizar mejor los elementos de una simulación y no tienen porque ser disjuntos, un agente podría pertenecer a diferentes *scapes*.

Ascape está escrito en Java para aprovechar las ventajas de este lenguaje de programación, y por tanto sus modelos son expresados mediante clases de Java.

### B.5.2 Mason

Mason<sup>141</sup> es una plataforma para la simulación de eventos discretos en máquinas monoprocesador, dotada con herramientas de visualización muy potentes, gratuita y de código abierto (Luke *et al.*, 2003). Ha sido desarrollada conjuntamente por el *Computer Science Department* y el *Center for Social Complexity* de la George Mason University. Inicialmente se originó como un conjunto de librerías muy condensadas destinadas a un muy amplio rango de aplicaciones, desde la robótica, a modelos físicos o de simulación social, aunque es en esta última donde ha encontrado mayor aceptación.

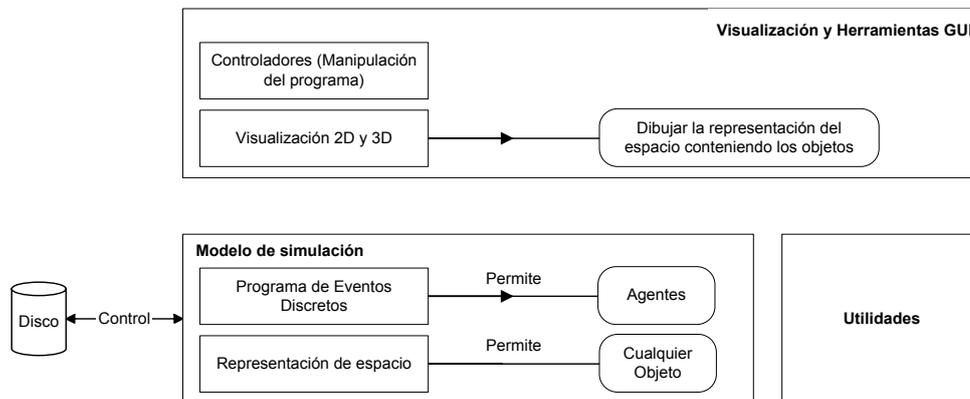
Está especialmente orientada hacia la simulación intensiva, permitiendo recuperar simulaciones no finalizadas y considerando la velocidad de simulación como uno de sus objetivos. También pone mucho énfasis en la independencia de la plataforma y la replicabilidad de los resultados. En parte este último objetivo se fundamenta en que Mason está implementado en Java para aprovechar la portabilidad de la plataforma y la serialización de objetos. Precisamente una de las ventajas que incluye Mason en la visualización de información es mediante la inclusión de las librerías Java 3D, aparte de como todas las herramientas basadas en Java permite la importación de todo tipo de librerías externas.

En muchos aspectos Mason recuerda a Swarm y sobre todo a RePast. De hecho comparte la filosofía de ambas y la separación modular y por capas entre el núcleo de la simulación y la capa de visualización (figura 119). Su arquitectura se divide en un conjunto de utilidades de estructuras de datos de propósito general. Una

---

<sup>141</sup> <http://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/>

capa de modelado consistente en un conjunto de clases para la programación de eventos discretos, librerías de generación de números aleatorios y conjuntos de clases para la implementación de entornos. Con estas dos capas es suficiente para la generación intensiva de simulaciones en modo no gráfico. Y por último posee una capa de visualización para la monitorización completa de la simulación.



**Figura 119.** Elementos básicos de las capas de modelado y visualización en Mason (Luke *et al.*, 2005).

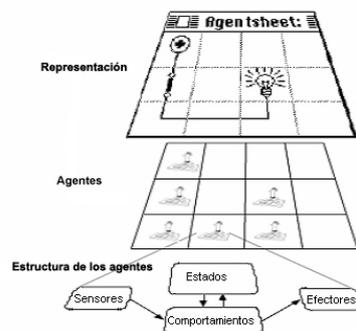
### B.5.3 AgentSheets

*AgentSheets*<sup>142</sup> es una herramienta de programación visual de simulaciones interactivas y altamente paralelas desarrollada por el Prof. Alexander Repenning (Repenning y Sumner, 1995) y basada en una aproximación de hoja de cálculo. Su metodología para simplificar el proceso de programación es la sustitución de todo tipo de cadenas y números que habría en una hoja de cálculo reticular normal por un número de agentes autónomos organizados en la rejilla, denominada *agentsheet*. Un *agentsheet* es una estructura reticular contenedora de agentes que interactúan representados como iconos. Las simulaciones tienen lugar precisamente en el grid donde son definidos (figura 120). Puesto que *AgentSheets* está especialmente indicado, y además ese es uno de sus objetivos de diseño, para no programadores resulta muy sencillo e intuitivo. Está basado en el paradigma de programación visual, es decir, las simulaciones no se programan mediante sistemas basados en código sino que todo el desarrollo se lleva a cabo mediante un interfaz gráfico. Las simulaciones se programan mediante la creación de agentes en una ventana llamada *gallery* a los

<sup>142</sup> <http://AgentSheets.com/>

que se asocian determinados comportamientos mediante conjuntos de reglas y eventos.

Debido a que sus puntos fuertes son la simplicidad de aprendizaje y el desarrollo intuitivo y rápido de simulaciones, incluso para usuarios no expertos, sus principales aplicaciones se orientan hacia la enseñanza (Repenning *et al.*, 2000; Carvalho, 2000). Su utilización para aplicaciones de simulación más complejas está muy restringida fundamentalmente por dos razones, los agentes no se envían información y no pueden cambiar los atributos de otros agentes de una forma eficiente y sencilla.



**Figura 120.** Estructura de un agentsheet

#### B.5.4 StarLogo y NetLogo

Otra herramienta muy sencilla e intuitiva desarrollada en el *Massachusetts Institute of Technologies Media Lab* por Mitchell Resnick y principalmente orientada a la creación de simulaciones por no programadores es StarLogo<sup>143</sup>. Starlogo es un entorno de programación de modelos orientado específicamente hacia la exploración de sistemas descentralizados.

En StarLogo se puede identificar tres tipos de entidades fundamentales:

- Las Tortugas. Los átomos básicos de StarLogo son unas criaturas gráficas conocidas como “tortugas”. Se puede usar una tortuga para representar cualquier tipo de agente: una hormiga en una colonia, un coche en un atasco de tráfico, etc. Se pueden añadir rasgos y propiedades más especializadas. En StarLogo (a diferencia de las versiones tradicionales de

<sup>143</sup> <http://education.mit.edu/starlogo/>

Logo<sup>144</sup>), se puede controlar las acciones e interacciones de miles de tortugas en paralelo.

- Parches. Los parches son los objetos del mundo en el que viven las tortugas y situados en una superficie reticular. Los parches pueden no ser simplemente objetos pasivos sobre los que las tortugas actúan. Como las tortugas, los parches pueden ejecutar comandos StarLogo que afecten a las tortugas o a otros los parches.
- Observador. El observador corresponde a las herramientas de StarLogo orientadas específicamente para monitorizar las simulaciones.

A pesar de su extrema sencillez y que hace innecesaria mucha experiencia en programación, StarLogo presenta muchas limitaciones para su uso con fines de investigación, por ejemplo, la programación no es orientada a objetos y se trata de una herramienta muy poco flexible, el modelador se encuentra limitado por el conjunto de comandos que ofrece el lenguaje, por lo que generalmente y al igual que AgentSheets se usa principalmente como herramienta docente.

En los últimos años ha surgido StarLogoT como la evolución y siguiente generación de StarLogo. Y aun con más importancia cabe destacar la aparición de NetLogo<sup>145</sup>. Desarrollado por Uri Wilensky y con continuo desarrollo por parte del *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling*, NetLogo es una herramienta escrita en Java también orientada para el modelado de sistemas complejos de agentes que operan de forma concurrente.

La ventaja y la aceptación de esta plataforma se basa en nuestra opinión en tres pilares, el continuo y rápido desarrollo de nuevas versiones actualizadas de la herramienta, la excepcional documentación de la aplicación, con una biblioteca de modelos accesibles tanto en las ciencias naturales como sociales, (incluyendo aplicaciones en medicina, biología, economía, física, química, informática y psicología, figura 121) y la facilidad de uso y programación. La programación en NetLogo no se realiza directamente en Java sino que se lleva a cabo en un lenguaje propio de más alto nivel que los lenguajes de propósito general. Las desventajas son precisamente esas, es necesario aprender su conjunto de primitivas y por supuesto no

---

<sup>144</sup> StarLogo se trata en realidad de una ampliación del popular lenguaje de iniciación a la informática Logo pero en el que se permite interactuar con varias tortugas simultáneamente.

<sup>145</sup> <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

puede ofrecer la flexibilidad de integración de las librerías que complementan lenguajes de propósito general, sin embargo a cambio se obtiene mayor facilidad de desarrollo y mayor legibilidad de código (al ser de más alto nivel). Muy recomendable para aplicaciones no excesivamente complejas técnicamente.

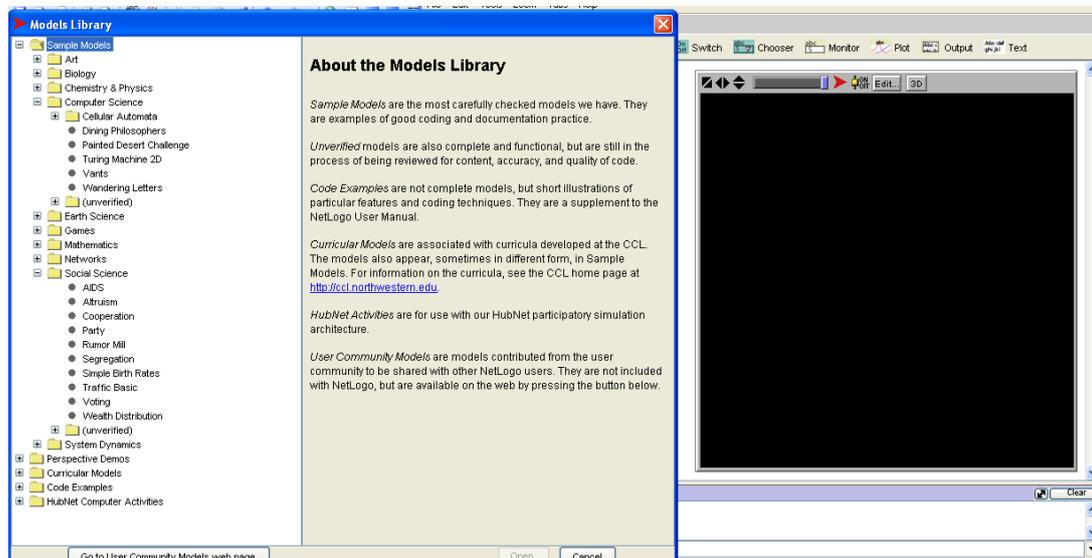


Figura 121. Biblioteca de modelos de NetLogo

Además NetLogo incorpora la tecnología HubNet, que permite la ejecución de simulaciones participativas, en las que individuos humanos controlan el comportamiento de determinados agentes en la simulación, bien mediante ordenadores conectados a la red, o bien mediante calculadoras específicas. Esta característica simplifica el desarrollo de aplicaciones docentes o relacionadas con la Economía Experimental, por ejemplo. Desde un punto de vista técnico, las simulaciones HubNet se basan en una arquitectura cliente-servidor. El ordenador central utiliza NetLogo para ejecutar una actividad HubNet, mientras que los participantes de la simulación utilizan una aplicación cliente para conectarse al servidor e interactuar con él.

### B.5.5 Cormas

Cormas<sup>146</sup> (*Common-pool Resources and Multi-Agent Systems*) es una plataforma diseñada especialmente para la gestión de recursos renovables en CIRAD (Bousquet *et al.*, 1998). Tecnológicamente Cormas está basado el software

<sup>146</sup> <http://Cormas.cirad.fr/en/outil/present.htm>

VisualWorks, que a su vez está basado en SmallTalk, al igual que SDML. Se trata de un conjunto de clases que representan entidades sociales genéricas para codificar los comportamientos más habituales de los actores que suelen explotar los recursos naturales y también un conjunto genérico de entidades espaciales para representar el entorno.

Proporciona un marco para la construcción de modelos basados en interacciones de individuos y grupos utilizando recursos naturales. En un modelo diseñado con Cormas el soporte espacial recae en entidades espaciales consideradas también como agentes. Estas entidades pueden ser incluso *raster* importados de un SIG. Cuando estas entidades poseen recursos, tienen la capacidad de resolver, de acuerdo con algún protocolo predefinido, entre las posibles demandas formuladas por otros agentes para la explotación del recurso.

### B.5.6 MAS-SOC

MAS-SOC es una plataforma de simulación que proporciona un marco para la creación de modelos basados en agentes que no requiere, en palabras de sus creadores, usuarios excesivamente expertos en programación. Su aspecto diferencial es el énfasis en el diseño y la implementación de *agentes cognitivos*, más elaborados que la mayoría de los agentes programados en otras plataformas de simulación (Bordini *et al.*, 2005). En realidad está especialmente diseñado para implementar la formulación *Belief-Desire-Intentions*.

El razonamiento de los agentes se especifica mediante una versión extendida de AgentSpeak(L) (Rao, 1996), mientras que los entornos donde se sitúan los agentes se especifican en ELMS (Okuyama *et al.*, 2005), un lenguaje específico de creación de entornos. Las interacciones entre los componentes de la simulación, agente-agente, agente-entorno se implementa con el SACI toolkit.

### B.5.7 PS-I

PS-I (*Political Science-Identity*) es una plataforma de simulación computacional basada en agentes originalmente diseñada para operar, refinar y probar diferentes versiones competitivas de teoría de identidad constructivista (Lustick, 2002). En PS-I agentes con un repertorio de identidades interactúan en

determinados entornos. El valor de sus identidades puede variar mediante la interacción y mostrar nuevas identidades o expresar otras latentes debido a las diferentes presiones sociales.

PS-I se encuentra a medio camino entre la sencillez y la inflexibilidad de lenguajes como StarLogo o AgentSheets y la dificultad de programación y la flexibilidad de RePast o Swarm.

### B.5.8 SeSam

SeSam<sup>147</sup> (*Shell for Simulated Agent Systems*) es otro intento de facilitar el modelado y la experimentación de sistemas ABM (Klügl *et al.*, 2003). Está escrito en Java y es código abierto. SeSam proporciona un editor de comportamientos basado en máquinas de estado finito, similar a los diagramas de estado de UML por lo que aporta un mecanismo riguroso y extendido de modelado. Sin embargo, y a pesar de que en sus requisitos de diseño se considera que está destinado a usuarios con conocimientos limitados de informática, resulta relativamente complejo puesto que hay que conocer un conjunto amplio de primitivas del entorno.

### B.5.9 Quicksilver

Quicksilver<sup>148</sup> es otro entorno de simulación basada en agentes implementada en Java por Jan Burse en la University of Osnabrück en el *Institute of Environmental Systems Research* con licencia GNU Lesser General Public License. Respecto a sus principales competidores como Swarm o RePast en general es inferior en la mayoría de los aspectos, incluido aspectos como el soporte o la documentación, aunque es de las pocas librerías que posee librerías específicas para análisis Monte Carlo del modelo y facilidad para situar agentes en entornos 3D (Tobias y Hofmann, 2004).

### B.5.10 VSEit

VSEit<sup>149</sup> (*Versatile Simulation Environment for the Internet*) ha sido desarrollado por Kai-H Brassel (2001) en el Department of Sociology de la Technical University of Darmstadt en Alemania. Se trata al igual que la anterior de

---

<sup>147</sup> <http://www.simsesam.de>

<sup>148</sup> <http://quicksilver.tigris.org/>

<sup>149</sup> <http://www.vseit.de/>

una herramienta desarrollada en Java para la simulación y el modelado en agentes. También resulta inferior a las plataformas más famosas y utilizadas como RePast y Swarm (Tobias y Hofmann, 2004) aunque presenta la utilidad de creación sencilla de applets con los modelos.

### B.5.11 MAML

MAML<sup>150</sup> es el acrónimo de *Multi-Agent Modeling Language* y corresponde a un extensión de Swarm desarrollada por László Gulyás, Tamás Kozsik, y Sándor Fazekas en la Central European University de Budapest en Hungría (Gulyás *et al.*, 1999). MAML es un macro-lenguaje para Swarm. Consta de diferentes *macro keywords* que definen la estructura general de una simulación, aunque el resto de la programación se ha de implementar con código Swarm. Su objetivo es proporcionar la funcionalidad de Swarm sin la necesidad de conocer el lenguaje que subyace a la versión original de Swarm, Objective-C. La idea es introducir conceptos de alto nivel en el modelado para ocultar tantos conceptos técnicos como sea posible al modelador pero sin restringir su acceso. A pesar de que originalmente su idea resultaba interesante, la migración cada vez mayor a sistemas basados en Java hace que haya perdido parte de su interés.

### B.5.12 Sim2Web

Sim2Web es un marco general para el desarrollo de simulaciones web orientadas principalmente a aplicaciones financieras y económicas (Margarita y Sonnesa, 2003). El objetivo de esta herramienta es la de superar la limitación de la mayoría de la herramientas de simulación orientadas a la interacción local con un único usuario, mediante la inclusión de la posibilidad de investigación multiusuario e interacción basada en Internet, por ejemplo para la investigación en Economía Experimental.

Técnicamente se basa principalmente en dos herramientas, la librería JAS como herramienta de simulación y Zope como interfaz web y de gestión de usuarios. Ambos comunicados mediante XML-RPC.

---

<sup>150</sup> <http://www.maml.hu/>

### B.5.13 SimBioSys

SimBioSys<sup>151</sup> es una biblioteca de clases de C++ orientadas a facilitar la simulación evolutiva de procesos biológico y en las ciencias sociales desarrollada por David McFadzean en la University of Calgary (McFadzean y Tesfatsion, 1999). Su aportación en la biblioteca de clases es la de herramientas para facilitar la definición de un entorno virtual donde la simulación tiene lugar, las poblaciones de agentes que habitan el entorno, las rutinas que dirigen el comportamiento de los agentes y sobre todo los mecanismos genéticos para emular la selección natural de los agentes.

### B.5.14 LSD

LSD<sup>152</sup> (*Laboratory for Simulation Development*) es un lenguaje para la creación específica de modelos de simulación. Ofrece un conjunto de herramientas para facilitar el desarrollo de muchos modelos anidados, como suele ocurrir con los modelos basados en agentes. La estructura de un modelo LSD está compuesta por tres entidades:

- La propia estructura del modelo (Objetos, variables y parámetros)
- Ecuaciones para computar el valor de las variables
- Datos iniciales

LSD está escrito en C++ con licencia GNU General Public License.

### B.5.15 MIMOSE - LispStat

MIMOSE<sup>153</sup> (*Micro- und Multilevel Modelling Software*) es un lenguaje de simulación especialmente orientado al modelado de sistemas sociales, para lo cual incluye características para facilitar a usuarios con unos fundamentos de programación no muy altos la descripción de procesos no-lineales, relaciones cuantitativas y cualitativas, influencias estocásticas, procesos de nacimiento y muerte al igual que modelo micro y multinivel (Möhring, 1996).

---

<sup>151</sup> <http://www.kumo.com/~david/SimBioSys/>

<sup>152</sup> <http://www.business.aau.dk/~mv/Lsd/lsd.html>

<sup>153</sup> <http://www.uni-koblenz.de/~moeh/projekte/mimose.html>

LispStat es un paquete de funciones Lisp, con funciones estadísticas y gráficas que se puede integrar con los resultados de simulaciones multi-nivel como los generados con MIMOSE para un mejor análisis de los resultados de los modelos simulados, ver por ejemplo (Gilbert, 1999b).

### B.5.16 ACT-R

ACT-R es más que una plataforma de desarrollo, una arquitectura cognitiva desarrollada por John Anderson en la Universidad Carnegie Mellon (Anderson *et al.*, 2004). Aunque en términos prácticos es un lenguaje de programación, implica hipótesis sobre la cognición humana basados en experimentos psicológicos. A la vez que el modelador crea un modelo, está incorporando hipótesis en el marco ACT-R sobre la tarea que desarrolla el programa. Precisamente, una de las características que distingue esta herramienta del resto (aparte de estar basada en una teoría cognitiva) es que permite a los investigadores recoger medidas cuantitativas que se pueden comparar con medidas cuantitativas de participantes humanos (López-Paredes, 2004; Cavallo, 2005). Es decir, se puede comprobar experimentalmente los resultados de personas realizando la misma tarea que los agentes programados con las hipótesis del modelador. A pesar del interés de la herramienta y el marco, su impacto, que ha sido enorme en psicología, está tardando en incorporarse a la simulación social.

### B.5.17 Ingenias

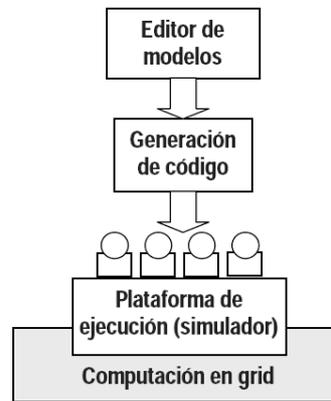
Desde el grupo Grasia<sup>154</sup> de la Universidad Complutense de Madrid y bajo la dirección de Juan Pavón se está haciendo un esfuerzo para adaptar la metodología Ingenias (Pavón y Gómez-Sanz, 2003) para el modelado y la simulación basada en agentes. El desarrollo y la adaptación de la herramienta están enfocados hacia la solución de tres problemas metodológicos a los que se enfrenta los profesionales del modelado de sistemas: la escalabilidad, el desarrollo de código y la confiabilidad de la simulación.

Uno de los principales problemas de la mayoría de las plataformas de simulación existentes es que están pensadas para la ejecución en un único procesador. Este hecho dificulta la escalabilidad de los modelos y limita el tamaño de

---

<sup>154</sup> <http://grasia.fdi.ucm.es/>

las simulaciones que se pueden llevar a cabo. Uno de los objetivos de Ingenias es proporcionar un entorno que permita el modelado, implementación y despliegue de sistemas ABSS en un entorno de computación en grid (figura 122) a través de la metodología Ingenias (Sansores y Pavón, 2005b).



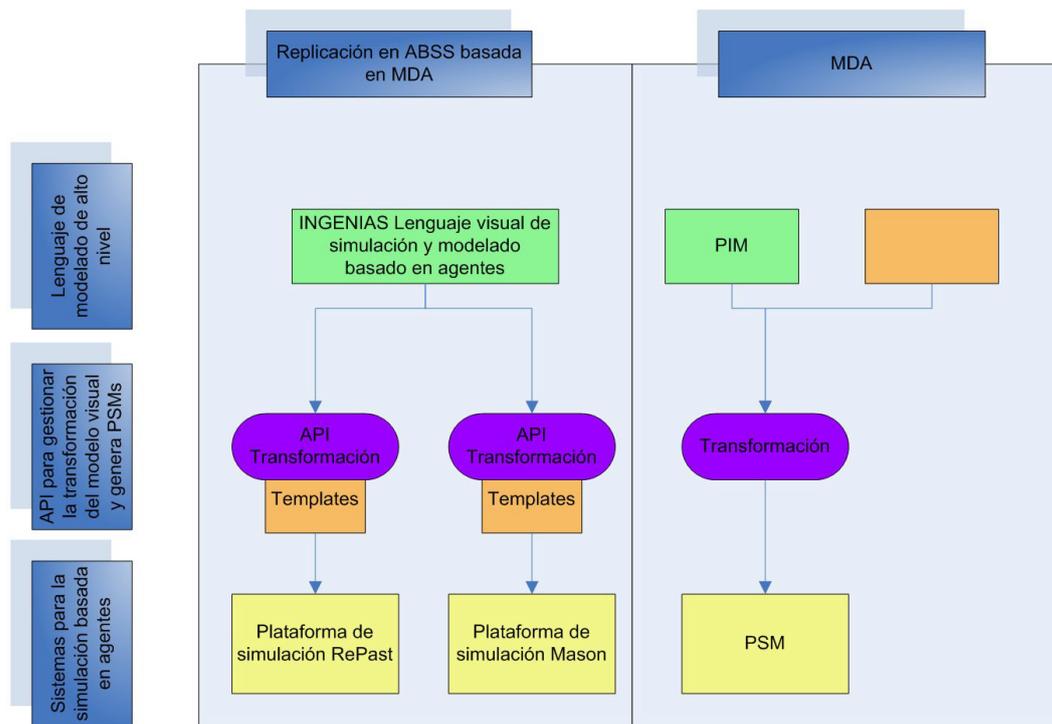
**Figura 122.** Elementos del entorno ABSS propuesto en (Sansores y Pavón, 2005b). Las herramientas de modelado y generación de código propuestas están basadas en la metodología INGENIAS (Pavón y Gómez-Sanz, 2003) y el INGENIAS Development Kit<sup>155</sup>

El segundo objetivo que aborda Ingenias es facilitar el modelado abstrayéndose en la medida de lo posible de todos los aspectos más relacionados con la programación, *que el modelador modele pero no programe*. Para ello han dotado a la herramienta de la posibilidad de describir fenómenos de diferentes contextos sociales mediante lenguaje visual (Sansores *et al.*, 2006), lo que simplifica el modelado puesto la especificación de modelos mediante diagramas y de forma gráfica resulta más cercana al lenguaje natural, pero a la vez menos ambigua. Esta descripción visual además es independiente de la plataforma de simulación. Este segundo hecho nos lleva a la tercera ventaja que aporta la herramienta, y es que la posibilidad de utilizar los lenguajes de modelado como herramientas de programación y no sólo como herramientas de diseño puede permitir generar código en diferentes plataformas de simulación y por tanto evitar errores de programación y también ambigüedades en el modelo de ejecución mediante replicación.

La arquitectura que implementa estas características esta basada en el paradigma MDA, *Model Driven Approach* (figura 123) (Sansores y Pavón, 2005a).

<sup>155</sup> <http://grasia.fdi.ucm.es/ingenias/Spain/index.php>

El modelo se diseña en una *plataforma independiente de la máquina* (PIM, *Platform Independent Model*), que en este caso como decimos corresponde a un lenguaje visual, y mediante un proceso de transformación y de generación automática de código mediante *templates* se produce modelos en herramientas como RePast o Mason, *modelos específicos de las plataformas* (PSM, *Platform Specific Model*).



**Figura 123.** Ingenias implementa el paradigma MDA para permitir la replicación en diferentes plataformas de simulación mediante un proceso de transformación a partir del diseño en un lenguaje de modelado visual de alto nivel. A la derecha se representan los principales elementos de MDA y a la izquierda los elementos correspondientes para implementar la arquitectura. Fuente: Sansores y Pavón (2005a).

## C. Fuentes de información y tratamiento de datos

Anexos

*I never guess. It is a capital mistake to theorize before one has data. Insensibly one begins to twist facts to suit theories, instead of theories to suit facts.*

Sir Arthur Conan Doyle (1859 - 1930),  
The Sign of Four, A Scandal in Bohemia

### Resumen

*En este anexo se incluye el listado de las diferentes bases de datos que se han utilizado para el calibrado del modelo y su aplicación a la Región Metropolitana de Valladolid. También se describen los principales algoritmos de tratamiento de la información y las tablas de resultados de los análisis estadísticos así como otra información utilizada a lo largo de la tesis.*





## C.1 Fuentes de información

- Archivo Shapefile con la estructura de manzanas de la ciudad de Valladolid en 2003 proporcionado por el grupo de investigación Citerior (ciudad y ordenación del territorio) del Departamento de Geografía de la Universidad de Valladolid, incluyendo la referencia de manzana.
- Tabla Excel con datos de población por manzanas (referencia de manzana) de la ciudad de Valladolid obtenidos a partir del Padrón Municipal de Habitantes de Valladolid 2006. Ayuntamiento de Valladolid.
  - Grupos de Edad
  - Población sexo
  - Nacionalidad
  - Nivel de estudios
- Shapefile de las subparcelas de la ciudad de Valladolid en 2006 con información sobre la altura y tipología de cada una de las subparcelas. Cartografía digital de Valladolid. 2006. Centro de Información Geográfica. Ayuntamiento de Valladolid.
- Archivos .ADF con información parcial sobre las parcelas de Valladolid. Cartografía digital de Valladolid. 2006. Centro de Información Geográfica. Ayuntamiento de Valladolid.
- Base de datos en Access de consumos de agua totales por acometida de Valladolid, por trimestres desde 1997 hasta el primer trimestre de 2006, proporcionados por la empresa Aguas de Valladolid.
- Relación de municipios del alfoz de Valladolid y empresa encargada de la gestión del agua proporcionados por la empresa Aguas de Valladolid 2006.
- Cartografía de la localización de las acometidas de la red de Valladolid, proporcionada por la empresa Aguas de Valladolid 2006.
- Base de datos en Access de consumo desglosada por consumo industrial, doméstico y de riego público por acometida desde el primer trimestre de 1997 hasta el primer trimestre de 2006 en Valladolid, proporcionada por la empresa Aguas de Valladolid.



Aguas de Valladolid



Aguas de Valladolid



Aguas de Valladolid



Aguas de Valladolid

- Planos en .pdf del Plan General de Ordenación Urbana de 2003 de Valladolid proporcionado por el Ayuntamiento de Valladolid.
- Estadísticas de variaciones residenciales del Instituto Nacional de Estadística. Proyecciones de población con Base Censo 2001, escenarios 1 y 2 (Población por fecha de referencia, provincia, sexo, grupo de edad y año (2002-2017).
- Número de familias según el número de miembros que las componen obtenidos del Censo de Población y Vivienda 2001 del I.N.E. (Instituto Nacional de Estadística).
- Cartografía digital y ortofotografía obtenidos del servidor de mapas del Sistema de Información Territorial de la Junta de Castilla-León<sup>156</sup>.



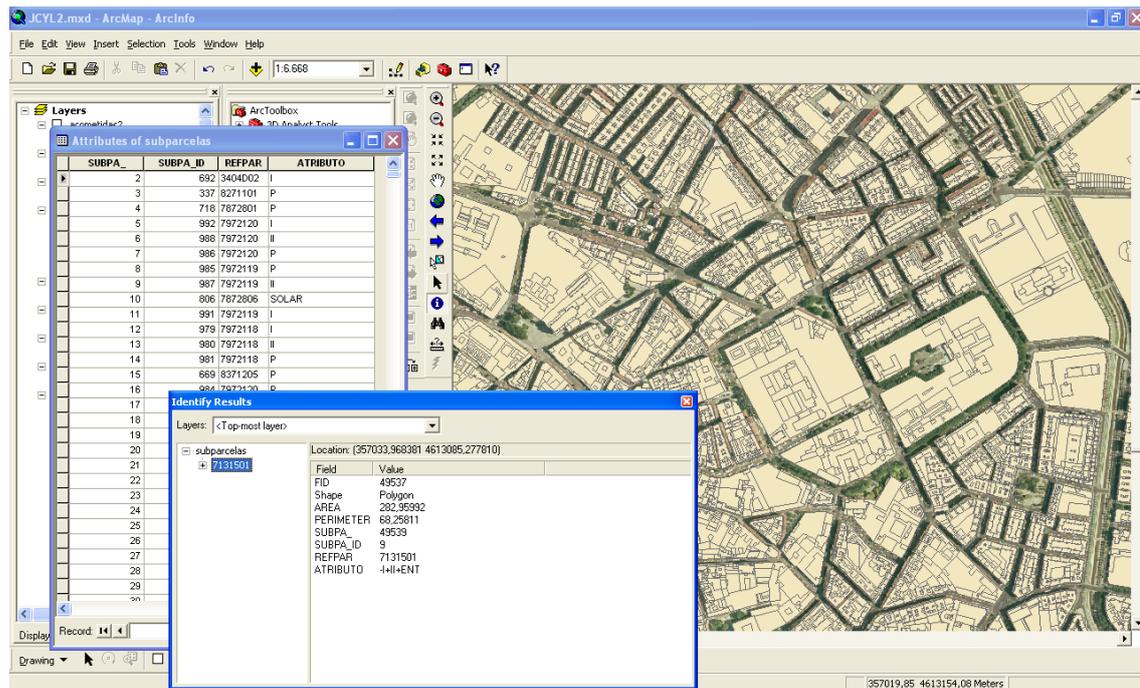
## C.2 Determinación de la tipología de vivienda de cada manzana

La información de la tipología de vivienda que incluimos en los datos de caracterización y de infraestructura en el modelo, está basada en la manzana como tamaño de grano de nuestro trabajo. Para nuestro estudio resulta muy relevante caracterizar cada una de las manzanas residenciales como pisos o ciudad jardín; sin embargo este tipo de información no es accesible de forma digital<sup>157</sup>.

Los datos que poseemos de la ciudad de Valladolid presentan una estructura de capas por subparcela (figura 124). Esta base de datos posee 141511 registros de subparcelas diferentes. Dentro de cada parcela algunas subparcelas representan patios, voladizos, porterías, terrazas, ruinas, número de niveles subterráneos, etc. Puesto que no estamos interesados en este nivel de detalle y sólo necesitamos información referente a la tipología de las subparcelas residenciales, hemos desarrollado un algoritmo de asimilación desde subparcelas a parcelas. Este algoritmo consta de dos etapas, la etapa de construcción de nivel de parcela y la etapa de construcción de nivel de manzana.

<sup>156</sup> <http://www.sitcyl.jcyl.es/sitcyl/home.sit>

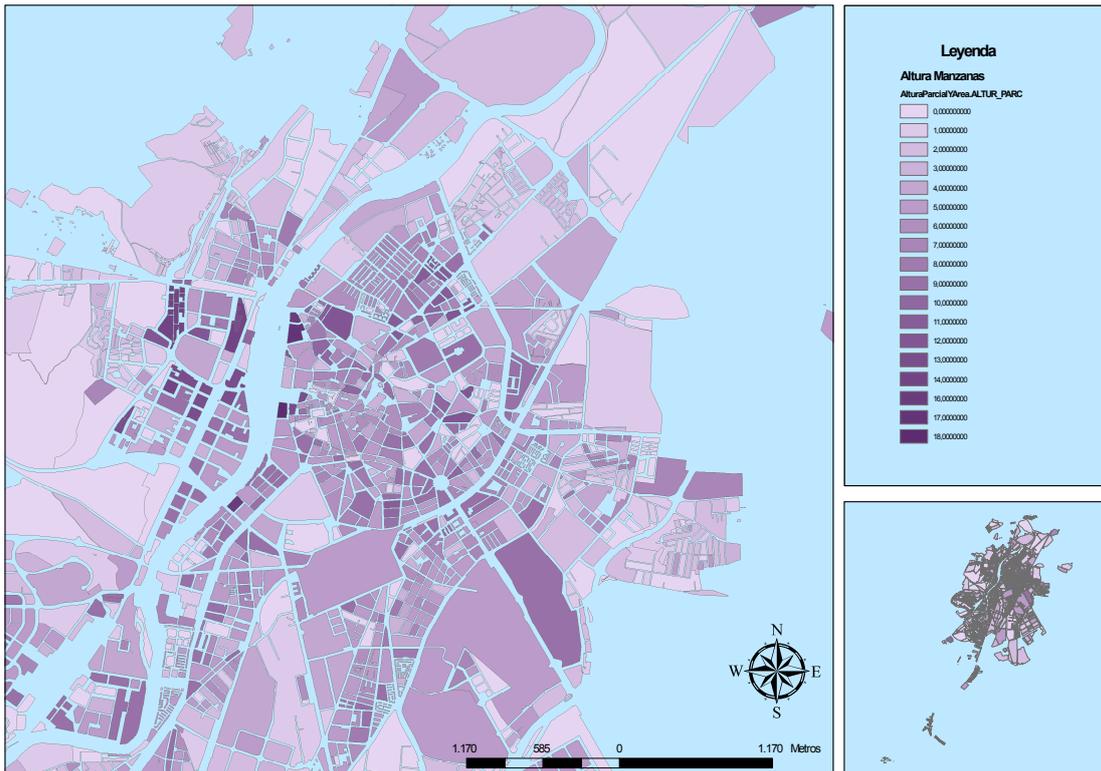
<sup>157</sup> Se pueden consultar los mapas en PDF del PGOU de Ayuntamiento, pero la cartografía digital no es pública.



**Figura 124.** Representación de diferentes subparcelas y atributos por subparcela.

La etapa de construcción de parcelas hace un filtrado entre todas las subparcelas para encontrar la subparcela de mayor altura<sup>158</sup>, típicamente la subparcela residencial, y así asimilar a la parcela ese valor de altura. El resultado de esta operación es un mapa de parcelas con su altura máxima. En un segundo paso y puesto que muchas manzanas poseen más de una parcela, hallamos la altura media de la manzana como la media ponderada de la altura de la parcela y su superficie dentro de la manzana. De esta forma hallamos un indicador de la altura de las subparcelas residenciales de la manzana, información relevante para intentar categorizar las viviendas. El resultado de esta operación es un mapa con la altura ponderada de cada manzana (figura 125).

<sup>158</sup> Aquí la altura se considera por el número de niveles de la subparcela, y no por su altura en metros.



**Figura 125.** Altura media ponderada de las manzanas de Valladolid. Fuente: Elaboración propia.

Una vez conocidos los datos de altura, ya poseemos más información sobre las tipologías de cada vivienda, no obstante no hemos resuelto el problema completo todavía. Las manzanas con alturas medias ponderadas de tres o más alturas las asimilaremos a tipología de vivienda piso. Sin embargo, no todas las viviendas de dos o menos alturas pueden ser asimiladas a ciudad jardín y dentro de ellas podría haber diferentes categorías. Existen barrios con viviendas bajas sin jardín, diferentes tipos de adosados, unifamiliares, etc.

Puesto que no conocemos con exactitud todas las diferentes tipologías de vivienda, nuestro objetivo será encontrar un método de clasificación que nos sirva para categorizarlas de forma digital, si es que existe estructura.

Nuestra hipótesis inicial es considerar las tipologías de vivienda bajas en cuatro grupos, porque consideramos que es un número adecuado al tamaño de grano que estamos utilizando en el resto del trabajo.

La información utilizada para buscar estructura en las tipologías de vivienda ha sido toda la que disponemos a nivel de manzana, desde los datos de consumo por

manzana y persona<sup>159</sup> hasta información sociodemográfica, porcentaje de analfabetos, personas con bachillerato superior, porcentaje de españoles y extranjeros y densidad poblacional. Hicimos dos análisis iniciales, uno mediante redes neuronales autoorganizadas para clasificar en cuatro grupos y un análisis cluster mediante conglomerados de K-medias y conglomerados jerárquicos. Al estudiar los datos sobre el mapa, estos análisis intuían una cierta relación espacial.

La decisión que utilizamos para categorizar finalmente el proceso fue aprovechar esa estructura espacial para proponer un análisis discriminante a partir de zonas de vivienda que somos capaces de identificar como de una tipología determinada. Básicamente la idea del análisis discriminante es construir un modelo predictivo para pronosticar el grupo de pertenencia de un caso a partir de las características observadas de un conjunto de casos conocidos. El procedimiento genera una o más funciones discriminantes basadas en combinaciones lineales de las variables predictoras. En nuestro caso, se trata de suministrar un conjunto de manzanas de tipología conocida para crear una función discriminante entre ellas y aplicarla al resto de viviendas bajas que no conocemos. Los grupos que consideramos como conocidos y que se utilizaron para crear la función de discriminación fueron viviendas familiares y adosadas de muy alto consumo como los de la zona de Santa Ana – El Peral, adosados y unifamiliares en la zona del Pinar, adosados y casas bajas en el barrio de la Overuela y casas bajas en el barrio España. La tipología de vivienda se comprobó con el PGOU de 2003. De esta forma se clasificaron 43 puntos para discriminar entre 400 manzanas con viviendas bajas.

En un primer análisis de los resultados bajo la hipótesis de que las matrices de covarianza poblacionales son iguales, la prueba de Box indica que las varianzas pueden no ser significativamente iguales, por lo que hemos realizado el análisis bajo la hipótesis contraria.

---

<sup>159</sup> A continuación, en este mismo anexo explicaremos cómo hemos hallado los consumos por manzana a partir de las acometidas.

**Tabla 19.** Resultado de la prueba de Box en el primer análisis.

MleBbx		135,370
F	Aprox.	16,488
	g1	6
	g2	252,760
	Sg	,000

En este segundo caso el análisis mejora la validación interna del proceso, pasando de los resultados que muestra la tabla 20, con una clasificación de en torno al 70% a una clasificación correcta del 81,4 de los casos originales.

**Tabla 20.** Resultados de la primera clasificación.

TIPOMV			Grupo de pertenencia pronosticado				Total
			bajo	Medio	Alto	Muyalto	
Original	Recuento	bajo	7	1	0	0	8
		Medio	8	4	1	0	13
		Alto	3	0	16	0	19
		Muyalto	0	0	0	3	3
		Casos desagrupados	197	133	27	0	357
	%	bajo	87,5	12,5	,0	,0	100,0
		Medio	61,5	30,8	7,7	,0	100,0
		Alto	15,8	,0	84,2	,0	100,0
Muyalto		,0	,0	,0	100,0	100,0	
Validación cruzada <sup>a</sup>	Recuento	bajo	7	1	0	0	8
		Medio	9	3	1	0	13
		Alto	3	0	16	0	19
		Muyalto	0	0	0	3	3
		Casos desagrupados	197	133	27	0	357
	%	bajo	87,5	12,5	,0	,0	100,0
		Medio	69,2	23,1	7,7	,0	100,0
		Alto	15,8	,0	84,2	,0	100,0
Muyalto		,0	,0	,0	100,0	100,0	

a. La validación cruzada sólo se aplica a los casos del análisis. En la validación cruzada, cada caso se clasifica mediante las funciones derivadas a partir del resto de los casos.

b. Clasificados correctamente el 69,8% de los casos agrupados originales.

c. Clasificados correctamente el 67,4% de los casos agrupados validados mediante validación cruzada.

Ambos análisis discriminantes se han realizado mediante el proceso de selección de variables por pasos (Stepwise Method), utilizando para determinar la selección de las variables el método de Lambda de Wilks con un criterio de entrada de  $F=3,84$  y de salida de 2,71. A continuación se resumen las tablas con los resultados más significativos del análisis.

La tabla 21 informa de los casos participantes y excluidos.

**Tabla 21.** Resumen del procesamiento para el análisis de casos

Casos no ponderados		N	Porcentaje
Válidos		43	10,8
Excluidos	Códigos de grupo perdidos o fuera de rango	357	89,3
	Perdida al menos una variable discriminante	0	,0
	Perdidos o fuera de rango ambos, el código de grupo y al menos una de las variables discriminantes.	0	,0
	Total excluidos	357	89,3
Casos Totales		400	100,0

La tabla 22 muestra el número de casos válidos de cada grupo de cada una de las categorías. A la vez, se muestran estadísticos descriptivos (media y desviación típica) de cada una de las variables independientes para cada uno de los grupos de la variable dependiente.

**Tabla 22.** Estadísticos de grupo.

TIPOVIV		Media	Desv. típ.	N válido (según lista)	
				No ponderados	Ponderados
bajo	ANALF	2,6400000	3,809679	8	8,000
	BACH	32,68875	19,73413	8	8,000
	ESPAÑ	99,65250	,98287843	8	8,000
	DENSIDAD	,3988241	,65661356	8	8,000
	CONSPER	33,84511	2,769710	8	8,000
Medio	ANALF	,7269231	1,774126	13	13,000
	BACH	31,15154	22,63085	13	13,000
	ESPAÑ	97,29615	6,463212	13	13,000
	DENSIDAD	,1107054	,14231794	13	13,000
	CONSPER	67,70724	41,44766	13	13,000
Alto	ANALF	,0000000	,00000000	19	19,000
	BACH	44,38579	27,20002	19	19,000
	ESPAÑ	100,0000	,00000000	19	19,000
	DENSIDAD	,0278139	,07357195	19	19,000
	CONSPER	142,7873	68,18844	19	19,000
Muyalto	ANALF	,1500000	,25980762	3	3,000
	BACH	44,30333	38,42227	3	3,000
	ESPAÑ	76,24000	37,16607	3	3,000
	DENSIDAD	,0797691	,06250275	3	3,000
	CONSPER	4285,058	722,0884	3	3,000
Total	ANALF	,7213953	2,069144	43	43,000
	BACH	38,20279	25,29314	43	43,000
	ESPAÑ	97,46023	10,67142	43	43,000
	DENSIDAD	,1255241	,31450502	43	43,000
	CONSPER	388,8160	1093,137	43	43,000

La tabla 23 muestra el test de igualdad de medias de grupos. Permite contrastar la hipótesis nula de que las medidas de los grupos del análisis son idénticas para las variables independientes del análisis. Se rechazará la hipótesis si el nivel de significación es menor que 0,05. Se rechazan todas excepto el porcentaje de personas con bachillerato. Resulta interesante notar que el consumo por persona es con mucha diferencia la variable más significativa en la tipología de vivienda, lo que confirma y refuerza la utilidad del esfuerzo en categorizar las tipologías de vivienda para estudiar los consumos. De hecho, realizando este análisis introduciendo solamente el CONSPER como variable independiente se consigue un mismo nivel de validación interna. Asimismo, la Lambda de Wilks indica que además resulta la variable con mayor poder discriminante.

**Tabla 23.** Pruebas de igualdad de las medias de los grupos.

	Lambda de Wilks	F	gl1	gl2	Sig.
ANALF	,776	3,757	3	39	,018
BACH	,936	,893	3	39	,453
ESPAÑ	,684	6,011	3	39	,002
DENSIDAD	,810	3,043	3	39	,040
CONSPER	,023	555,732	3	39	,000

La tabla 24 muestra las variables seleccionadas en la función de discriminación tras utilizar el método de selección de variables por pasos con el estadístico Lambda de Wilks. En cada paso el método introduce la variable que minimiza la lambda de Wilks global. Finalmente sólo dos variables son significativas para el análisis el consumo por persona y el porcentaje de españoles en la manzana.

**Tabla 24.** Variables introducidas/eliminadas

Paso	Introducidas	Lambda de Wilks							
		Estadístico	gl1	gl2	gl3	F exacta			
						Estadístico	gl1	gl2	Sig.
1	CONSPER	,023	1	3	39,000	555,732	3	39,000	,000
2	ESPAÑ	,015	2	3	39,000	91,886	6	76,000	,000

En cada paso se introduce la variable que minimiza la lambda de Wilks global.

- El número máximo de pasos es 10.
- La F parcial mínima para entrar es 3.84.
- La F parcial máxima para eliminar es 2.71
- El nivel de F, la tolerancia o el VIN son insuficientes para continuar los cálculos.

La tabla 25 ofrece información sobre las variables independientes incluidas en el modelo paso a paso, en virtud de su significatividad en cada uno de los pasos. En nuestro estudio el proceso se para en el segundo paso.

**Tabla 25.** Variables en el análisis.

Paso		Tolerancia	F para eliminar	Lambda de Wilks
1	CONSPER	1,000	555,732	
2	CONSPER	,574	577,472	,684
	ESPAÑ	,574	7,060	,023

En la tabla 26 se explica el funcionamiento del proceso de selección con Lambda de Wilks. Se extrae la variable con el menor lambda de Wilks, que es la que tiene el mayor valor de F para entrar, en nuestro caso CONSPER.

**Tabla 26.** Variables no incluidas en el análisis.

Paso		Tolerancia	Tolerancia mín.	F para introducir	Lambda de Wilks
0	ANALF	1,000	1,000	3,757	,776
	BACH	1,000	1,000	,893	,936
	ESPAÑ	1,000	1,000	6,011	,684
	DENSIDAD	1,000	1,000	3,043	,810
	CONSPER	1,000	1,000	555,732	,023
1	ANALF	,998	,998	3,535	,018
	BACH	,953	,953	1,514	,020
	ESPAÑ	,574	,574	7,060	,015
	DENSIDAD	,997	,997	2,946	,019
2	ANALF	,997	,574	3,448	,011
	BACH	,931	,561	,727	,014
	DENSIDAD	,994	,572	2,879	,012

En la tabla 27 se muestra un resumen de la significatividad de cada uno de los modelos que se han analizado hasta llegar a una solución estable. Tanto el modelo con una única variable (CONSPER), como el modelo con dos variables resultan muy significativos.

**Tabla 27.** Lambda de Wilks.

Paso	Número de variables	Lambda	gl1	gl2	gl3	F exacta			
						Estadístico	gl1	gl2	Sig.
1	1	,023	1	3	39	555,732	3	39,000	,000
2	2	,015	2	3	39	91,886	6	76,000	,000

La tabla 28 ofrece la tabla de autovalores, que informa de la calidad discriminante de las dos funciones discriminantes, que entre ambas suman el 100%. La correlación canónica es la proporción de la variabilidad total explicada por las diferencias entre los grupos. En nuestro caso, la primera función es mucho más explicativa que la segunda, lo que confirma la tabla 29.

**Tabla 28.** Autovalores.

Función	Autovalor	% de varianza	% acumulado	Correlación canónica
1	65,389 <sup>a</sup>	100,0	100,0	,992
2	,026 <sup>a</sup>	,0	100,0	,160

a. Se han empleado las 2 primeras funciones discriminantes canónicas en el análisis

**Tabla 29.** Lambda de Wilks.

Contraste de las funciones	Lambda de Wilks	Chi-cuadrado	g	Sg.
1 a la 2	,015	164,636	6	,000
2	,974	1,011	2	,603

En la tabla 30 se informa del grado de importancia de las variables que han ingresado en el modelo sobre cada una de las dos funciones discriminantes.

**Tabla 30.** Coeficientes estandarizados de las funciones discriminantes canónicas.

	Función	
	1	2
ESPAÑ	,777	1,067
CONSPER	1,315	,108

La tabla 31 y la tabla 32 muestran los coeficientes de correlación de las variables independientes con cada una de las dos funciones discriminantes. En la primera tabla respecto a todas las variables y en la segunda sólo respecto a las variables elegidas en el modelo.

**Tabla 31.** Matriz de estructura.

	Función	
	1	2
CONSPER	,808 *	-,589
ESPAÑ	-,082	,997 *
BACH <sup>a</sup>	-,088	,248 *
DENSIDAD <sup>a</sup>	-,007	,076 *
ANALF <sup>a</sup>	-,022	,045 *

Correlaciones intra-grupo combinadas entre las variables discriminantes y las funciones discriminantes canónicas tipificadas  
Variables ordenadas por el tamaño de la correlación con la función.

\*. Mayor correlación absoluta entre cada variable y cualquier función discriminante.

a. Esta variable no se emplea en el análisis.

**Tabla 32.** Coeficientes de las funciones canónicas discriminante.

	Función	
	1	2
ESPAÑ	,085	,117
CONSPER	,008	,001
(Constante)	-11,249	-11,600

Coeficientes no tipificados

La tabla 33 muestra las coordenadas de la proyección del centroide de cada grupo sobre las funciones discriminantes.

**Tabla 33.** Funciones en los centroides de los grupos.

TIPOMV	Función	
	1	2
bajo	-2,537	,032
Medio	-2,477	-,221
Alto	-1,671	,141
Muy alto	28,082	-,023

Funciones discriminantes canónicas no tipificadas evaluadas en las medias de los grupos

La tabla 34 y la tabla 35 muestran los principales estadísticos de clasificación. La tabla 34 muestra los coeficientes de la función de clasificación y la tabla 35 resume los principales resultados de la clasificación.

**Tabla 34.** Coeficientes de la función de clasificación.

	TIPOMV			
	bajo	Medio	Alto	Muy alto
ESPAÑ	2,094	2,070	2,180	4,685
CONSPER	,074	,074	,081	,309
(Constante)	-106,991	-104,600	-116,175	-841,855

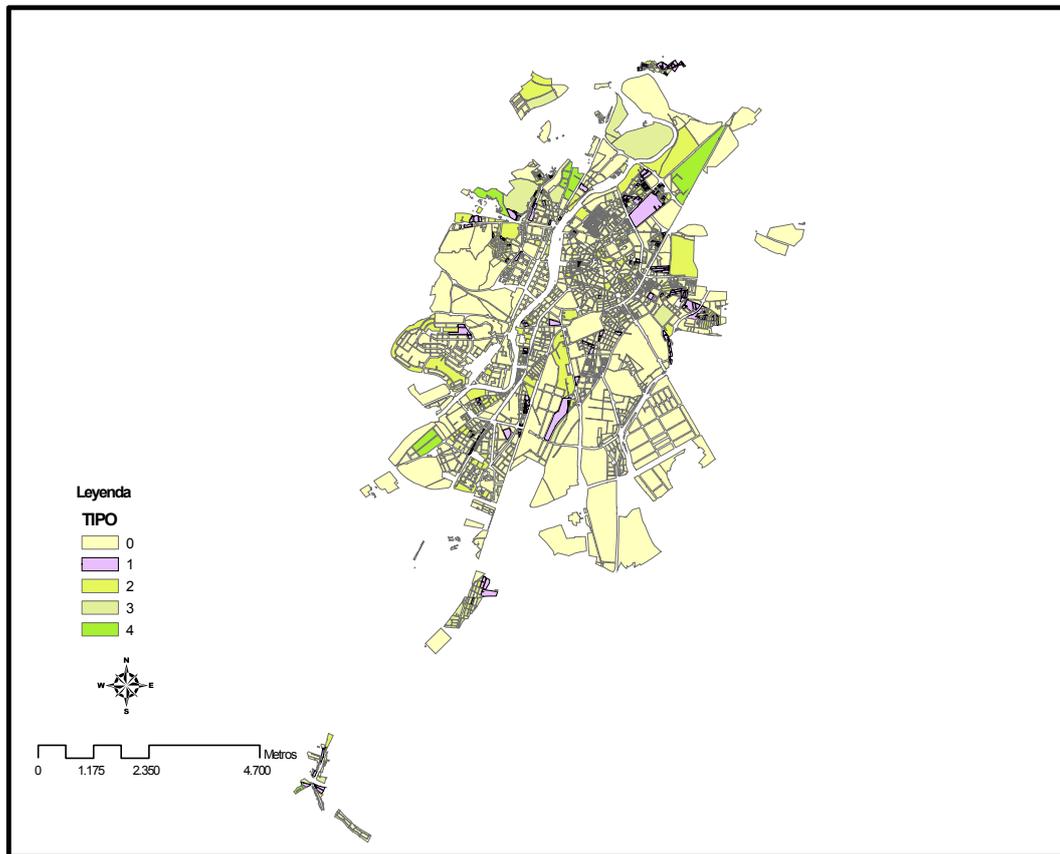
Funciones discriminantes lineales de Fisher

**Tabla 35.** Resultados de la clasificación.

			Grupo de pertenencia pronosticado				Total
			bajo	Medio	Alto	Muy alto	
Original	Recuento	bajo	8	0	0	0	8
		Medio	0	12	1	0	13
		Alto	0	7	12	0	19
		Muy alto	0	0	0	3	3
		Casos desagrupados	77	263	16	1	357
	%	bajo	100,0	,0	,0	,0	100,0
		Medio	,0	92,3	7,7	,0	100,0
		Alto	,0	36,8	63,2	,0	100,0
		Muy alto	,0	,0	,0	100,0	100,0
		Casos desagrupados	21,6	73,7	4,5	,3	100,0

a. Clasificados correctamente el 81,4% de los casos agrupados originales.

Después del análisis discriminante se hizo un proceso de depuración visual en los casos en los que las funciones de discriminación daban resultados dudosos. El proceso se llevo a cabo mediante la base de datos de ortofotografía de la Junta de Castilla-León.



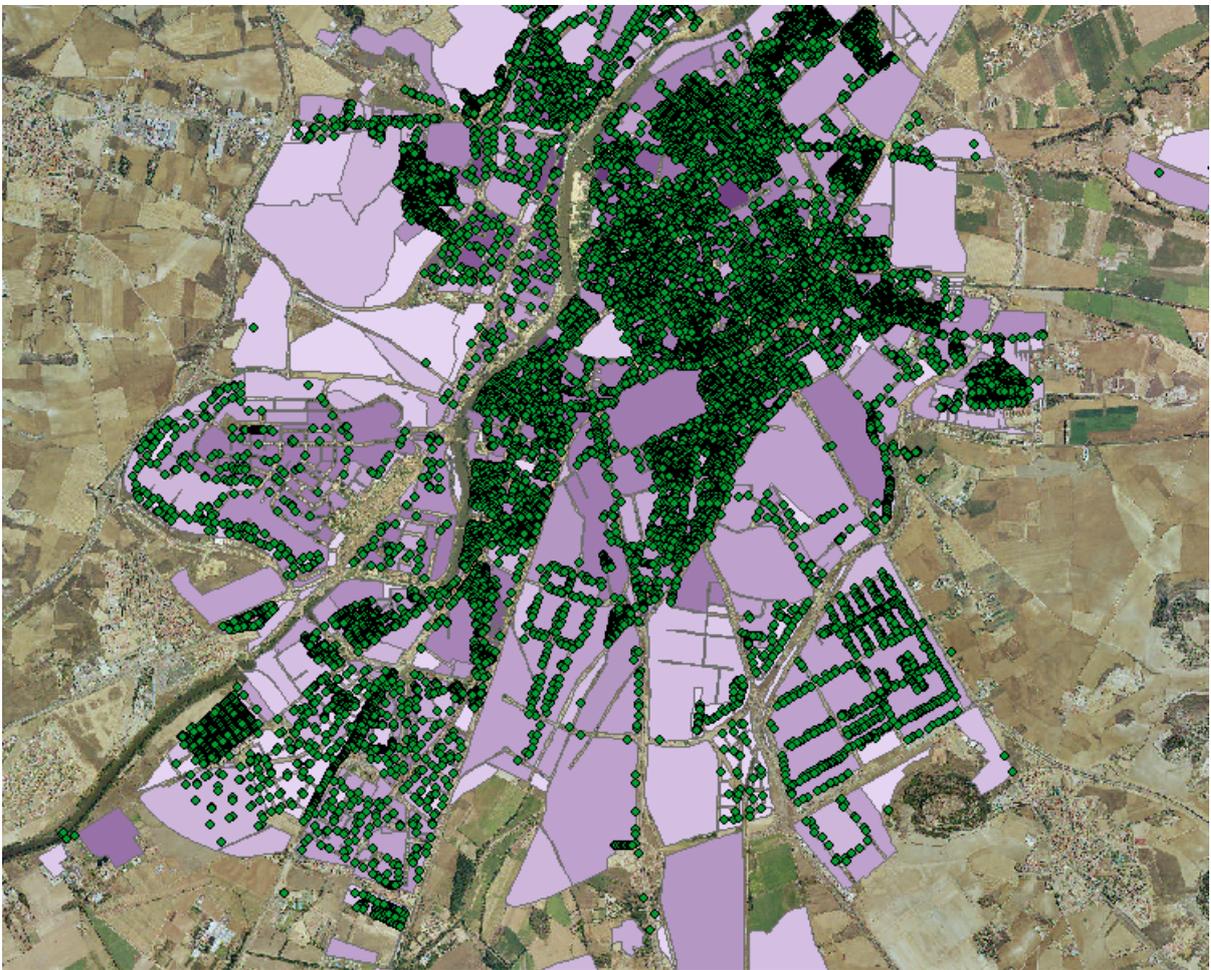
**Figura 126.** El mapa muestra la tipología de viviendas tras el proceso de clasificación. Las viviendas de tipo 0 representan pisos, las viviendas de tipo 1 a 4 representan las viviendas bajas en Valladolid, ordenadas en grupos de menor a mayor consumo.

### C.3 Determinación del consumo doméstico por manzana

Los datos de consumo por manzana se han calculado mediante un algoritmo de asignación de las acometidas a la manzana. Inicialmente los datos proporcionados por Aguas de Valladolid nos daban los consumos de agua por acometida, aunque estos datos eran una fuente de algunas imprecisiones. Los datos de consumo agregaban no sólo consumos domésticos, sino también consumos comerciales y de riego.

Puesto que en este estudio nuestro interés sólo se ha centrado en los consumos domésticos, solicitamos a la empresa la desagregación de los datos, también por acometida, en función del uso facturado.

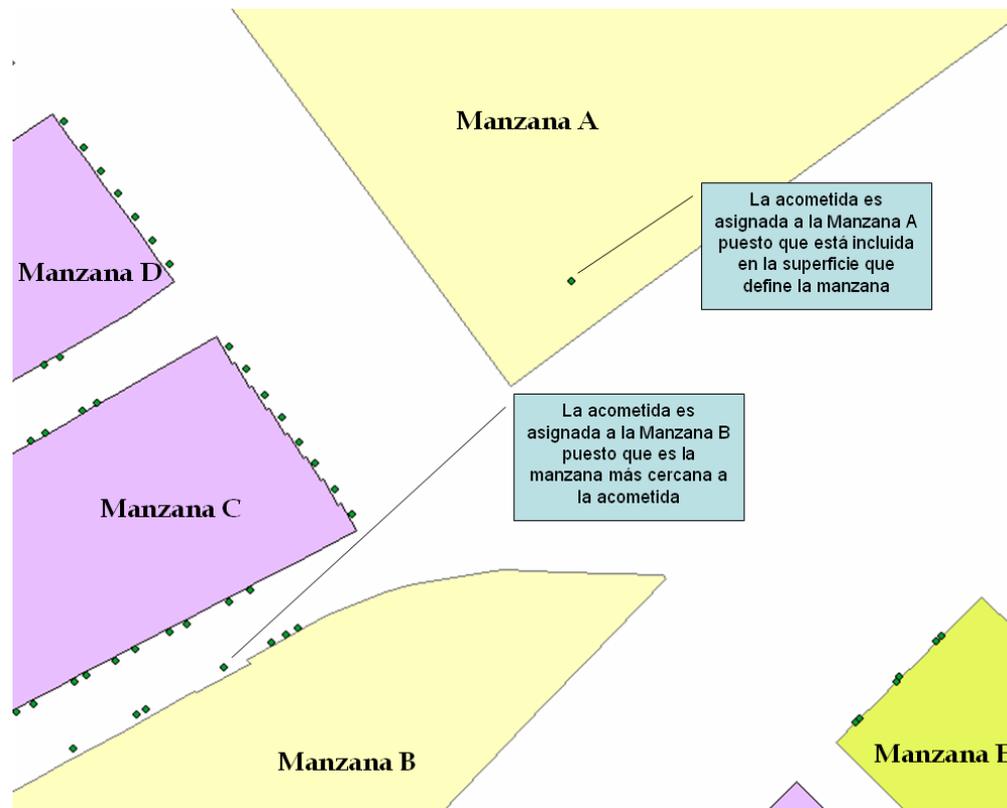
El problema ahora es cómo asignar cada uno de los consumos a cada manzana. No disponemos del consumo por abonado referenciado geográficamente por lo que el proceso de referenciación no es directo. Típicamente una manzana tendrá más de una acometida, algunas acometidas sirven agua a un portal y una manzana tiene varias parcelas cada una con su portal, o en el caso de bloques de viviendas adosadas, a uno o dos adosados, etc. (figura 127).



**Figura 127.** Captura de parte de la zona de Valladolid con las capas de acometidas, altura de manzanas y ortofotografía 1:10000.

El criterio de asignación de manzana para cada una de las diferentes acometidas se ha basado en un proceso de selección geográfica mediante distancia euclídea. Aquellas acometidas contenidas en el área de la manzana, y por tanto con

distancia del punto (la acometida) a la superficie (la manzana) igual a cero, son automáticamente asignadas a la manzana. Aquellas acometidas no incluidas en el área de la manzana (la mayoría por otra parte), son asignadas a la manzana de menor distancia, entendiendo distancia como la longitud entre el punto de asignación y el punto más cercano de la superficie a asignar (figura 128).



**Figura 128.** El dibujo muestra un ejemplo de asignación de dos acometidas (puntos verdes) a las unidades del modelo, las manzanas.

Una vez que hemos incluido toda la información de la que disponemos en el nivel de la manzana, hemos realizado un estudio estadístico para parametrizar el modelo híbrido implementado en esta tesis.



**Figura 129.** Estas fotografías muestran dos de las zonas de Valladolid de más alto consumo por persona. La fotografía de la izquierda hace referencia a la parcela 86492, el cementerio en la que hay censadas seis residentes, por lo que los consumos son altísimos; se trata claramente de un outlier. La fotografía de la derecha son las parcelas de referencia 29917 y 31901, en la zona de Santa Ana-El Peral, con unos consumos por persona incluso mayores que en la fotografía de la izquierda.

El objetivo del estudio es doble, primero determinar qué factores geográficos y sociales de los que disponemos son influyentes en el consumo por persona<sup>160</sup> (desde un punto de vista estadístico), y segundo cuantificar esa influencia. Para ello hemos decidido hacer un estudio multivariante, con el consumo por persona como variable independiente y con la tipología de vivienda como variable categórica, el % de analfabetos, el % de gente con bachillerato superior, la edad media, la nacionalidad y la densidad poblacional<sup>161</sup>.

Introduciendo todas las variables como regresores del modelo, el modelo es altamente significativo y es capaz de explicar la mayor parte de la variabilidad respecto a la media (ver las dos tablas siguientes).

**Tabla 36.** Tabla resumen del modelo.

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,915 <sup>a</sup>	,838	,837	98,97608

a. Variables predictoras (Constante), ANALF, ESPAÑ, EDADMEDIA, BajaAlta, DENSIDAD, BajaMedia, BajaMuyAlta, BajaBaja, BACHILL

b. Variable dependiente: CONS2005

<sup>160</sup> Consumo anual por persona y año (2005).

<sup>161</sup> Hemos desestimado utilizar datos diferentes a los de 2005 porque muchos datos de las series temporales para otros años no están completos.

**Tabla 37.** Tabla ANOVA.

Mdelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	54731402	9	6081266,9	620,774	,000 <sup>a</sup>
	Residual	10579966	1080	9796,265		
	Total	65311368	1089			

a. Variables predictoras: (Constante), ANALF, ESPAÑ, EDADMEDIA, BajaAlta, DENSIDAD, BajaMedia, BajaMuyAlta, BajaBaja, BACHILL

b. Variable dependiente: CONS2005

Sin embargo, la tabla 38 siguiente muestra que hemos introducido demasiadas variables en nuestro estudio. Algunas de las variables independientes simplemente no son significativas para explicar la variabilidad en el consumo, y aunque el modelo no presenta problemas de multicolinealidad, hemos decidido utilizar un modelo de regresión por pasos para depurar las variables con mayor significación en el modelo.

**Tabla 38.** Tabla de coeficientes.

Mdelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Correlaciones			Estadísticos de colinealidad	
		B	Error típ.	Beta			Orden cero	Parcial	Semparcial	Tolerancia	FV
1	(Constante)	91,391	59,615		1,533	,126					
	BajaBaja	-18,727	7,599	-,033	-2,464	,014	-,081	-,075	-,030	,835	1,197
	BajaMedia	12,666	11,138	,014	1,136	,256	-,001	,035	,014	,947	1,056
	BajaAlta	178,117	17,275	,128	10,310	,000	,123	,299	,126	,969	1,032
	BajaMuyAlta	4221,220	58,891	,903	71,678	,000	,905	,909	,878	,944	1,059
	EDADMEDIA	,358	,483	,009	,741	,459	-,104	,023	,009	,968	1,033
	DENSIDAD	-2,324	2,018	-,014	-1,152	,250	-,045	-,035	-,014	,969	1,032
	ESPAÑ	-,545	,589	-,012	-,927	,354	-,181	-,028	-,011	,919	1,088
	BACHILL	,090	,151	,008	,597	,550	,045	,018	,007	,819	1,222
	ANALF	-,094	1,412	-,001	-,067	,947	-,035	-,002	-,001	,871	1,148

a. Variable dependiente: CONS2005

Utilizando un método de selección por pasos con criterio de entrada de  $F \leq 0.05$  y con criterio de salida de  $F \geq 0.10$ , obtenemos una regresión con una significación en términos de  $R^2$  corregido de casi exactamente igual (hemos pasado de 0.838 a 0.837, pero eliminando seis variables independientes, tabla 40). En realidad con sólo tres variables categóricas (tabla 39 y tabla 41) explicamos más del 80% del modelo. Además estas tres variables son la tipología de vivienda, más exactamente: casas bajas de perfil de bajo consumo, casas bajas de perfil de alto consumo y casas bajas de perfil de muy alto consumo. De hecho, la ausencia de estos indicadores categóricos, es decir, el comportamiento en pisos y en casas bajas de

perfil de consumo medio (el término independiente en la regresión), nos indica que estos dos grupos no son significativamente diferentes en términos estadísticos frente al consumo de agua por persona.

**Tabla 39.** Variable introducidas/eliminadas.

Modelo	Variables introducidas	Variables eliminadas	Método
1	BajaMuyAlta	.	Por pasos (criterio: Prob. de F para entrar $\leq$ ,050, Prob. de F para salir $\geq$ ,100).
2	BajaAlta	.	Por pasos (criterio: Prob. de F para entrar $\leq$ ,050, Prob. de F para salir $\geq$ ,100).
3	BajaBaja	.	Por pasos (criterio: Prob. de F para entrar $\leq$ ,050, Prob. de F para salir $\geq$ ,100).

a. Variable dependiente: CONS2005

**Tabla 40.** Resumen de los modelos. Los modelos 1, 2 y 3 hacen referencia a los tres modelos que se forman mediante el método de selección por pasos antes de llegar a un punto de estabilidad. El modelo 1 tiene las variables independientes de la nota a), el modelo 2 las de la nota b) y el modelo 3, el modelo finalmente seleccionado, las de la nota c).

Mdelo	R	Rcuadrado	Rcuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,905 <sup>a</sup>	,819	,818	104,36913
2	,914 <sup>b</sup>	,836	,836	99,32153
3	,915 <sup>c</sup>	,837	,837	98,88873

- a. Variables predictoras: (Constante), BajaMuyAlta  
 b. Variables predictoras: (Constante), BajaMuyAlta, BajaAlta  
 c. Variables predictoras: (Constante), BajaMuyAlta, BajaAlta, BajaBaja  
 d. Variable dependiente: CONS2005

**Tabla 41.** Tablas ANOVA de los tres diferentes modelos.

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	53459877	1	53459877	4907,766	,000 <sup>a</sup>
	Residual	11851491	1088	10892,915		
	Total	65311368	1089			
2	Regresión	54588368	2	27294184	2766,836	,000 <sup>b</sup>
	Residual	10723000	1087	9864,766		
	Total	65311368	1089			
3	Regresión	54691395	3	18230465	1864,250	,000 <sup>c</sup>
	Residual	10619974	1086	9778,981		
	Total	65311368	1089			

- a. Variables predictoras: (Constante), BajaMuyAlta  
 b. Variables predictoras: (Constante), BajaMuyAlta, BajaAlta  
 c. Variables predictoras: (Constante), BajaMuyAlta, BajaAlta, BajaBaja  
 d. Variable dependiente: CONS2005

La tabla 42 muestra las estimaciones de los parámetros y las desviaciones típicas del consumo anual por persona en metros cúbicos en la región metropolitana de Valladolid durante el año 2005 en función de la tipología de vivienda. Junto con los datos de la tabla 43, en la tabla 44 mostramos el resumen de consumos de la ciudad.

**Tabla 42.** Tabla de los coeficientes de los diferentes modelos.

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Estadísticos de colinealidad	
		B	Error típ.	Beta			Tolerancia	FIV
1	(Constante)	57,867	3,166		18,280	,000		
	BajaMuyAlta	4227,191	60,341	,905	70,055	,000	1,000	1,000
2	(Constante)	51,990	3,062		16,978	,000		
	BajaMuyAlta	4233,068	57,425	,906	73,715	,000	1,000	1,000
	BajaAlta	182,525	17,065	,131	10,696	,000	1,000	1,000
3	(Constante)	57,805	3,536		16,346	,000		
	BajaMuyAlta	4227,253	57,203	,905	73,899	,000	,999	1,001
	BajaAlta	176,710	17,085	,127	10,343	,000	,989	1,011
	BajaBaja	-22,657	6,980	-,040	-3,246	,001	,988	1,012

a. Variable dependiente: CONS2005

**Tabla 43.** Descriptivos principales de los datos analizados sin el modelo de regresión.

	N	Mnimo	Máximo	Media	Desv. típ.
CONS2005	1090	1,06	4910,33	69,5016	244,89530
N válidos (según lista)	1090				

**Tabla 44.** Tabla resumen con los datos de consumos medios y desviaciones típicas por tipología de vivienda y total en diferentes unidades.

	Consumo medio (litros/hab·día)	Desviación típica (litros/hab·día)	Consumo medio (m <sup>3</sup> /hab·año)	Desviación típica (m <sup>3</sup> /hab·año)
Viviendas bajas de muy alto consumo	115821,57	156,72	4227,49	57,20
Viviendas bajas de alto consumo (ciudad jardín)	642,51	46,81	234,52	17,09
Pisos/viviendas bajas de medio consumo	158,37	9,69	57,81	3,54
Viviendas bajas de bajo consumo	96,30	19,12	35,15	6,98
<b>Media</b>	<b>190,69</b>	<b>670,95</b>	<b>69,60</b>	<b>244,90</b>

La tabla 45 muestra las diferentes etapas en la selección de variables según el método de selección por pasos.

**Tabla 45.** Variables excluidas en el método de selección por pasos.

Modelo	Beta dentro	t	Sig.	Correlación parcial	Estadísticos de colinealidad			
					Tolerancia	FIV	Tolerancia mínima	
1	BajaBaja	-,053 <sup>a</sup>	-4,156	,000	-,125	,999	1,001	,999
	BajaMedia	,013 <sup>a</sup>	1,018	,309	,031	1,000	1,000	1,000
	BajaAlta	,131 <sup>a</sup>	10,696	,000	,309	1,000	1,000	1,000
	Piso	-,008 <sup>a</sup>	-,615	,539	-,019	,995	1,005	,995
	EDADMEDIA	,010 <sup>a</sup>	,794	,428	,024	,984	1,016	,984
	DENSIDAD	-,027 <sup>a</sup>	-2,055	,040	-,062	1,000	1,000	1,000
	ESPAÑ	,000 <sup>a</sup>	,003	,997	,000	,960	1,042	,960
	BACHILL	,021 <sup>a</sup>	1,647	,100	,050	,999	1,001	,999
ANALF	-,018 <sup>a</sup>	-1,385	,166	-,042	1,000	1,000	1,000	
2	BajaBaja	-,040 <sup>b</sup>	-3,246	,001	-,098	,988	1,012	,988
	BajaMedia	,020 <sup>b</sup>	1,663	,097	,050	,997	1,003	,997
	Piso	,025 <sup>b</sup>	1,992	,047	,060	,937	1,067	,937
	EDADMEDIA	,008 <sup>b</sup>	,661	,509	,020	,984	1,016	,984
	DENSIDAD	-,017 <sup>b</sup>	-1,361	,174	-,041	,994	1,006	,994
	ESPAÑ	-,010 <sup>b</sup>	-,826	,409	-,025	,954	1,048	,954
	BACHILL	,019 <sup>b</sup>	1,536	,125	,047	,999	1,001	,999
	ANALF	-,013 <sup>b</sup>	-1,056	,291	-,032	,998	1,002	,998
3	BajaMedia	,014 <sup>c</sup>	1,101	,271	,033	,964	1,037	,956
	Piso	-,024 <sup>c</sup>	-1,101	,271	-,033	,318	3,146	,318
	EDADMEDIA	,008 <sup>c</sup>	,614	,539	,019	,984	1,017	,983
	DENSIDAD	-,015 <sup>c</sup>	-1,195	,232	-,036	,991	1,009	,984
	ESPAÑ	-,008 <sup>c</sup>	-,625	,532	-,019	,950	1,052	,950
	BACHILL	,007 <sup>c</sup>	,582	,561	,018	,907	1,103	,897
	ANALF	-,004 <sup>c</sup>	-,283	,777	-,009	,940	1,064	,930

a. Variables predictoras en el modelo: (Constante), BajaMuyAlta

b. Variables predictoras en el modelo: (Constante), BajaMuyAlta, BajaAlta

c. Variables predictoras en el modelo: (Constante), BajaMuyAlta, BajaAlta, BajaBaja

d. Variable dependiente: CONS2005

La tabla 46 muestra los principales estadísticos para el estudio de multicolinealidad. No existen problemas, ninguno de los autovalores es cercano a cero.

**Tabla 46.** Diagnósticos de colinealidad.

Mdelo	Dimensión	Autovalor	Indice de condición	Proporciones de la varianza			
				(Constante)	BajaMuyAlta	BajaAlta	BajaBaja
1	1	1,052	1,000	,47	,47		
	2	,948	1,054	,53	,53		
2	1	1,187	1,000	,41	,03	,38	
	2	1,000	1,089	,00	,92	,08	
	3	,813	1,208	,59	,05	,55	
3	1	1,532	1,000	,23	,00	,04	,21
	2	1,000	1,238	,00	,01	,84	,08
	3	1,000	1,238	,00	,97	,01	,01
	4	,468	1,808	,77	,01	,12	,70

a. Variable dependiente: CONS2005

Para estudiar el efecto de la estacionalidad en los modelos, y puesto que los datos de aguas de Valladolid están dados por trimestres, proponemos un modelo con componente estacional. El primer dilema que se nos plantea al incluir esta componente es si considerarla como un factor aditivo o multiplicativo. En el modelo implementado en esta tesis permitimos adoptar cualquiera de los dos.

En las siguientes tablas se muestran los valores en función de la estructura del modelo para las diferentes tipologías de viviendas. Se puede apreciar que el impacto estacional sólo tiene un efecto significativo en las tipologías de vivienda baja de perfil de alto consumo y de muy alto consumo. Estos resultados parecen razonables puesto que es este tipo de viviendas el que suele contar con características de consumo de muy alta estacionalidad como pueden ser jardines y piscinas.

**Tabla 47.** Tabla con el componente estacional de las casas bajas de perfil de consumo bajo. Datos tanto para el modelo aditivo como el multiplicativo.

	Factor Aditivo Trimestre 1	Factor Aditivo Trimestre 2	Factor Aditivo Trimestre 3	Factor Aditivo Trimestre 4
<b>Media</b>	-0,36	0,32	0,79	-0,74
<b>Desviación Típica</b>	1,60	2,05	2,30	1,72
	Factor Multiplicativo Trimestre 1	Factor Multiplicativo Trimestre 2	Factor Multiplicativo Trimestre 3	Factor Multiplicativo Trimestre 4
<b>Media</b>	0,97	1,04	1,09	0,91
<b>Desviación Típica</b>	0,24	0,25	0,25	0,20

**Tabla 48.** Tabla con el componente estacional de pisos y viviendas bajas de consumo medio. Datos tanto para el modelo aditivo como el multiplicativo.

	Factor Aditivo Trimestre 1	Factor Aditivo Trimestre 2	Factor Aditivo Trimestre 3	Factor Aditivo Trimestre 4
<b>Media</b>	0,07	0,68	0,23	-0,98
<b>Desviación Típica</b>	4,87	7,00	7,55	8,51
	Factor Multiplicativo Trimestre 1	Factor Multiplicativo Trimestre 2	Factor Multiplicativo Trimestre 3	Factor Multiplicativo Trimestre 4
<b>Media</b>	1,02	1,02	1,00	0,95
<b>Desviación Típica</b>	0,20	0,25	0,24	0,23

**Tabla 49.** Tabla con el componente estacional de viviendas bajas de consumo alto. Datos tanto para el modelo aditivo como el multiplicativo.

	Factor Aditivo Trimestre 1	Factor Aditivo Trimestre 2	Factor Aditivo Trimestre 3	Factor Aditivo Trimestre 4
<b>Media</b>	-60,20	65,49	5,76	-11,05
<b>Desviación Típica</b>	84,62	95,57	24,26	18,20
	Factor Multiplicativo Trimestre 1	Factor Multiplicativo Trimestre 2	Factor Multiplicativo Trimestre 3	Factor Multiplicativo Trimestre 4
<b>Media</b>	0,57	1,30	1,28	0,85
<b>Desviación Típica</b>	0,43	0,62	0,54	0,28

**Tabla 50.** Tabla con el componente estacional de viviendas bajas de consumo muy alto. Datos tanto para el modelo aditivo como el multiplicativo.

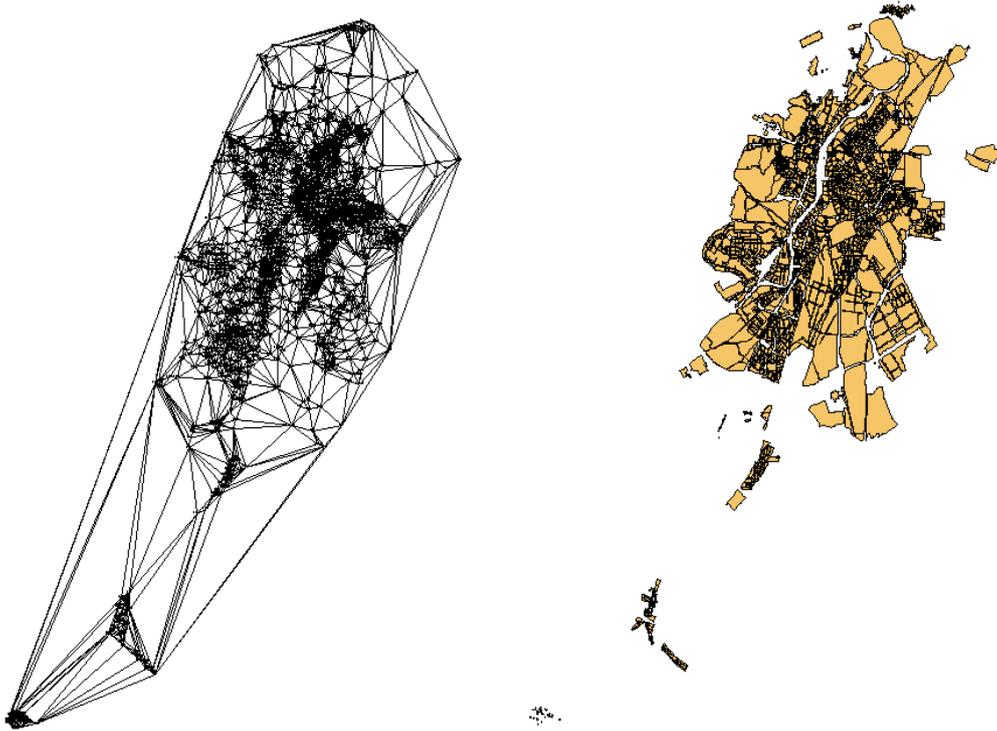
	Factor Aditivo Trimestre 1	Factor Aditivo Trimestre 2	Factor Aditivo Trimestre 3	Factor Aditivo Trimestre 4
<b>Media</b>	-110,54	461,44	-14,67	-336,23
<b>Desviación Típica</b>	88,75	273,51	51,93	222,49
	Factor Multiplicativo Trimestre 1	Factor Multiplicativo Trimestre 2	Factor Multiplicativo Trimestre 3	Factor Multiplicativo Trimestre 4
<b>Media</b>	0,89	1,45	0,99	0,67
<b>Desviación Típica</b>	0,08	0,27	0,05	0,23

## C.4 Cálculo de vecindades

En el modelo hemos considerado los puntos generadores de las celdas de Voronoi a los centroides de los bloques de viviendas (manzanas) importados de un sistema de información geográfica. Consideramos dos manzanas vecinas si comparten un lado de Voronoi. Además hemos exigido una segunda condición para evitar efectos esquina de cierre de grafo, los centroides han de estar a una distancia

menor de un determinado umbral máximo para que se les pueda considerar vecinos (en nuestro caso hemos considerado esa distancia de 300 metros entre centroides). Este proceso algorítmico se ha implementado en Mathematica™.

En realidad las vecindades de Voronoi las calculamos indirectamente mediante el problema dual de triangulación de Delaunay (figura 130).



**Figura 130.** La figura de la derecha muestra el mapa de manzanas de la ciudad de Valladolid, la figura de la izquierda muestra el diagrama de Delaunay de la misma región. Los nodos del gráfico de Delaunay muestran los centroides de las manzanas, los segmentos de unión la relación de vecindad de los nodos. Los segmentos de tamaño mayor a 300 metros se excluyen en términos de cómputo de vecindades (no en el dibujo).

A continuación se muestra el código de selección de vecindades y de evaluación de umbral:

```
[data2D]= {{PosX1, PosY1}, ...{PosXn, PosYn}};

(delval=DelaunayTriangulation[data2D])
PlanarGraphPlot[data2D, DefaultFont->"Courier", 8.]]
DiagramPlot[data2D]
```

```

myList=delval[[1]]
ref=myList[[1]]
sublista=myList[[2]]
distThreshold=400
Select[sublista, (Norm[data2D[[ref]]-
data2D[[#]]]<distThreshold) &]

SeleccionaVecinos[x_]:=Module[{sublista = x[[2]]},
  Select[sublista, (Norm[data2D[[x[[1]]]-
data2D[[#]]]<distThreshold) &]
];

SeleccionaVecinos[myList]
Map[SeleccionaVecinos, delval]

```

## C.5 Otra información utilizada

### C.5.1 Cálculo de la actitud social inicial de la población

El modelo necesita como parámetro conocer el porcentaje de la población inicial en cada manzana que tiene un comportamiento solidario y el que no lo tiene. Para estimar estos valores iniciales haremos la hipótesis de que dos agentes en la misma tipología de vivienda en el momento inicial de la simulación deberían consumir lo mismo. Si no es así, asumiremos que la razón de la divergencia de consumo se debe a la actitud social.

Para estimar el porcentaje en cada bloque de agentes con cada actitud y apoyándonos en la hipótesis de normalidad, sabemos que la mayoría de los consumos por persona de cada tipo estarán contenidos en el intervalo  $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$  donde  $\mu$  es la media de consumo en la tipología de vivienda y  $\sigma$  es la desviación típica del proceso. Para calcular el porcentaje de cada tipo de comportamiento, consideraremos que la probabilidad de tener un consumo no solidario en cuanto a consumo doméstico por un agente en un bloque  $i$  en el tiempo 0 vendrá dada por:

$$\rho_i(S)_0 = \frac{\mu_i - (\bar{\mu} - 3\sigma)}{6\sigma} \quad (67)$$

El resultado de aplicar esta fórmula da un mapa de comportamientos como el mostrado en la figura 131.



**Figura 131.** Esta figura muestra un mapa de densidades de una zona de Valladolid en cuanto al comportamiento inicial. Mayor intensidad de verde implica un porcentaje mayor de comportamiento S, mayor intensidad de azul implica un porcentaje mayor de comportamiento NS.

## C.5.2 Gestión de agua en el alfoz

**Tabla 51.** Municipios del alfoz y empresa encargada de la gestión

Identificador Municipal	Nombre del Municipio	Área del municipio	Gestor de agua	Alcance
47155	Santovenia de Pisuerga	13742957,2	Desconocido	
47050	Cigales	61021444	Desconocido	
47098	Mucientes	63552121,6	Aquagest	Red en alta
47027	Cabezón de Pisuerga	45277625,7	Desconocido	
47066	Fuensaldaña	25085150,1	Aquagest	Red en alta
47217	Villanubla	45361268,4	Aquagest	Red en alta
47224	Villarmentero de Esgueva	13474861,6	Desconocido	
47186	Valladolid	142063663	Aguas de Valladolid	Ciclo integral
47044	Castronuevo de Esgueva	29435685,2	Desconocido	
47133	Renedo de Esgueva	28846720	Desconocido	
47231	Zaratán	20265655,1	Aquagest	Red en alta
47051	Ciguñuela	30398467,6	Desconocido	
47010	Arroyo de la Encomienda	11778741,9	Aquagest	ETAP, Abastecimiento y Sanearamiento
47161	Simancas	42531559,9	Aquagest	Red en alta
47052	Cistérniga	31489002,4	Aquagest	Red en alta
47071	Geria	18022024,5	Desconocido	
47076	Laguna de Duero	29254917,4	Desconocido	
47023	Boecillo	24091879	Aquagest	Parque Tecnológico
47193	Viana de Cega	18004797,2	Desconocido	

### C.5.3 Número de miembros de las familias

Las probabilidades de que una familia tengan un número de miembros determinado a la hora de crearlas se calculan a partir de datos referentes al municipio de Valladolid obtenidos del Censo de Población y Vivienda 2001 del I.N.E. (Instituto Nacional de Estadística). Estos datos son los que se reflejan en tabla 52.

**Tabla 52.** Número de familias según el número de miembros que las componen

	Nº MIEMBROS DE LAS FAMILIAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10-15	TOTAL
Número Familias	20068	26948	25553	25781	7841	2087	587	216	97	103	109281

Sabiendo el número total de familias que tiene el municipio y también el número de familias según el número de miembros que las componen, entonces se puede calcular la probabilidad de que exista una familia con un determinado número de miembros, simplemente dividiendo el número de familias que tienen un determinado número de miembros entre el total de familias que existen en el municipio. Estas probabilidades, en tanto por cien, se reflejan en la tabla 53.

**Tabla 53.** Probabilidad de existencia de familias según su número de miembros

Nº Miembros	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10-15
Probabilidad (%)	18.36	24.66	23.38	23.59	7.18	1.91	0.54	0.20	0.09	0.09



---

## REFERENCIAS

---

- Abu-Mostafa, Y. S., LeBaron, B., Lo, A. W. & Weigend, A. S. (1999).** *Computational Finance - Proceedings of the Sixth International Conference*. Cambridge, MA: MIT Press.
- ADB (1999).** *Handbook for the Economic Analysis of Water Supply Projects*. Manila: Asian Development Bank. [http://www.adb.org/Documents/Handbooks/Water\\_Supply\\_Projects](http://www.adb.org/Documents/Handbooks/Water_Supply_Projects).
- Agthe, D. E. & Billings, R. B. (1997).** Equity and conservation pricing policy for a government-run water utility. *Journal of Water Supply Research and Technology* **46**(5): 252-260.
- Agthe, D. E. & Billings, R. B. (1987).** Equity, price elasticity, and household income under increasing block rates for water. *American Journal of Economics and Sociology* **46**(3): 273-286.
- Aguilera, A. (2002).** *Ciudades como tableros de ajedrez: introducción al modelado de dinámicas urbanas con autómatas celulares*. San Luis Potosí: El Colegio de San Luis.
- Aguilera, A. & López-Paredes, A. (2001).** *Modelado multiagente de sistemas socioeconómicos: una introducción al uso de la inteligencia artificial en la investigación social*. San Luis Potosí: El Colegio de San Luis.
- Aguilera, A., López-Paredes, A. & Martínez Mendoza, J. R. (2004a).** *Sociedades Artificiales: Aplicación de la simulación en la teoría social*. San Luis Potosí: Fac.de Ciencias-UASLP, INSISOC.
- Aguilera, A. & Ugalde, E. (2006).** A Spatially Extended Model for Residential Segregation. [http://lanl.arxiv.org/PS\\_cache/nlin/pdf/0607/0607026.pdf](http://lanl.arxiv.org/PS_cache/nlin/pdf/0607/0607026.pdf).
- Aguilera, F., Arrojo, P., Barreira, A., Carles, J., Lacalle, A., Llamas, M. R., Martínez, F. J., del Moral, L., Pérez, M. T. & Pérez, A. (2004b).** *El agua en España. Propuestas de futuro*. Guadarrama, Madrid: Ediciones del oriente y del mediterráneo.
- Albayrak, S. & Garijo, F. J. (1998).** *Intelligent Agents for Telecommunication Applications, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1437*. Berlin: Springer-Verlag.
- Anderson, J. R., Bothell, D., Byrne, M. D., Douglass, S., Lebiere, C. & Qin, Y. (2004).** An integrated theory of the mind. *Psychological Review* **111**(4): 1036-1060.
- Aracil, J. & Gordillo, F. (1997).** *Dinámica de Sistemas*. Madrid: Alianza Editorial.
- Arauzo, J. A., Benito, J. J. & del Olmo, R. (2003).** El Control de Planta: Una Solución Basada en Agentes. En Benito, J. J. & Redondo, A. (Eds), *Actas del Congreso de Ingeniería de Organización 2003*: V.S. Merino.
- Arauzo, J. A., Benito, J. J., del Olmo, R. & Sanz, P. (2004a).** Situación actual y expectativas de los sistemas de fabricación basados en agentes. *Actas del VIII Congreso de Ingeniería de Organización*: 1043-1052. Leganés: ADINGOR.
- Arauzo, J. A., Benito, J. J., del Olmo, R. & Sanz, P. (2006).** Diseño de subastas para la programación job shop. *X Congreso de Ingeniería de Organización*. Valencia: ADINGOR.
- Arauzo, J. A., Benito, J. J., Sanz, P. & del Olmo, R. (2005).** Propuesta de un sistema de programación y control distribuido para sistemas de fabricación tipo Job Shop. En de la Fuente, D. (Eds), *IX Congreso de Ingeniería de Organización*: 174-175. Oviedo: ADINGOR.

- Arauzo, J. A., De Benito, J. J. & del Olmo, R. (2004b).** Diseño e implantación de un sistema multiagente para el control de sistemas de fabricación tipo job shop. *V Workshop en Agentes Físicos*. Girona
- Arauzo, J. A., De Benito, J. J., del Olmo, R. & Sanz, P. (2004c).** A multiagent system for job shop manufacturing control. *Image Processing, Biomedicine, Multimedia, Financial Engineering and Manufacturing - Proceedings of the Sixth Biannual World Automation Congress*: 485-490
- Arauzo, J. A., De Benito, J. J., Sanz, P. & del Olmo, R. (2004d).** Modelling shop floor control as multi agent system. *Decision and Simulation in Engineering and Management Science - International Conference on Modelling and Simulation, ICMS'04*: 19-20
- Arbués, F., García, M. A. & Martínez-Espiñeira, R. (2003).** Estimation of residential water demand: a state of the art review. *Journal of Socioeconomics* **32**: 81-102.
- Arrojo, P. (2003).** *El Plan Hidrológico Nacional: una cita frustrada con la historia*. Barcelona: RBA Libros.
- Arthur, W. B. (1991).** Designing Economic Agents that Act Like Human Agents: A Behavioral Approach to Bounded Rationality. *American Economic Review* **81**(2): 353-359.
- Arthur, W. B., Durlauf, S. & Lane, D. (1997a).** *The Economy as an Evolving Complex System II*. Reading, MA.: Addison-Wesley Longman.
- Arthur, W. B., Holland, J. H., LeBaron, B., Palmer, R. & Tayler, P. (1997b).** Asset Pricing under Endogenous Expectations in an Artificial Stock Market. En Arthur, W. B., Durlauf, S. & Lane, D. (Eds), *The Economy as an Evolving Complex System II*: 15-44. Reading, MA: Addison-Wesley Longman.
- Athanasiadis, I. N., Mentes, A. K., Mitkas, P. A. & Mylopoulos, Y. A. (2005).** A hybrid agent-based model for estimating residential water demand. *Simulation* **81**(3): 175-187.
- Athanasiadis, I. N. & Mitkas, P. A. (2005).** Social influence and water conservation: An agent-based approach. *Computing in Science and Engineering* **7**(1): 65-70.
- Athanasiadis, I. N., Vartalas, P. & Mitkas, P. A. (2004).** DAWN: A Platform for Evaluating Water-Pricing Policies Using a Software Agent Society. En *IEMSs*, 2 edn: 643-648. Editado por Pahl-Wostl, C., Schmidt, A., Rizzoli, A. & Jakeman, A. Manno, Switzerland
- Axelrod, R. M. (2005a).** Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences. En Rennard, J. P. (Eds), *Handbook of Research on Nature Inspired Computing for Economy and Management*. Hersey, PA: Idea Group.
- Axelrod, R. M. (2005b).** Agent-based Modeling as a Bridge Between Disciplines. En Judd, K. L. & Tesfatsion, L. (Eds), *Handbook of Computational Economics, Vol. 2: Agent-Based Computational Economics*. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland.
- Axelrod, R. M. (1997c).** The Dissemination of Culture: A Model with Local Convergence and Global Polarization. *Journal of Conflict Resolution* **41**(2): 203-226.
- Axelrod, R. M. (1997b).** Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences. En Conte, R., Hegselmann, R. & Terna, P. (Eds), *Simulating Social Phenomena, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems* **456**: 21-40. Berlin: Springer-Verlag.
- Axelrod, R. M. (1997a).** *The complexity of cooperation. Agent-based models of competition and collaboration*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Axelrod, R. M. (1986).** An Evolutionary Approach to Norms. *American Political Science Review* **80**(4): 1095-1111.

- Axelrod, R. M. & Tesfatsion, L. (2005).** A Guide for Newcomers to Agent-Based Modeling in the Social Sciences. En Judd, K. L. & Tesfatsion, L. (Eds), *Handbook of Computational Economics, Vol. 2: Agent-Based Computational Economics*. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland.
- Axtell, R. L. (2000).** Why Agents? On the Varied Motivations for Agent Computing in the Social Sciences. En Macal, C. M. & Sallach, D. (Eds), *Proceedings of the Workshop on Agent Simulation: Applications, Models, and Tools*: 3-24. Argonne, IL: Argonne National Laboratory.
- Axtell, R. L. (1999).** The Emergence of Firms in a Population of Agents: Local Increasing Returns, Unstable Nash Equilibria, and Power Law Size Distributions. *CSED Working Paper N° 3*. <http://www.brookings.edu/es/dynamics/papers/firms/firmspage.htm>.
- Axtell, R. L., Axelrod, R. M., Epstein, J. M. & Cohen, M. D. (1996).** Aligning Simulation Models: A Case Study and Results. *Computational and Mathematical Organization Theory* **1**(2): 123-141.
- Aydinalp, M., Ugursal, V. I. & Fung, A. S. (2004).** Modeling of the space and domestic hot-water heating energy-consumption in the residential sector using neural networks. *Applied Energy* **79**(2): 159-178.
- Bachrach, M and Vaughan, M. J. (1994).** Household Water Demand Estimation. *Environment Protection Division Working Paper ENP 106* Washington, D.C: Inter-American Development Bank.
- Bagehot, W. (1872).** *Physics and politics, or, Thoughts on the application of natural selection and inheritance to political society*. Lond: H.S.King.
- Banks, S. C. (2002).** Agent-based modeling: A revolution? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **99**(3): 7199-7200.
- Banks, J. (1999).** Introduction to Simulation. En Farrington, P. A., Nembhard, H. B., Sturrock, D. T. & Evans, G. W. (Eds), *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*: 7-13. Phoenix, AZ
- Banks, J., Carson, J. S. & Nelson, B. L. (1995).** *Discrete-Event System Simulation*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Barreteau, O. (2003).** The joint use of role-playing games and models regarding negotiation processes: Characterization of associations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **6**(2). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/2/3.html>.
- Barreteau, O. & Bousquet, F. (2000).** SHADOC: a multi-agent model to tackle viability of irrigated systems. *Annals of Operations Research* **94**(1-4): 139-162.
- Barreteau, O., Bousquet, F. & Attonaty, J. M. (2001).** Role-playing games for opening the black box of multi-agent systems: method and lessons of its application to Senegal River Valley irrigated systems. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **4**(2): U75-U93. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/2/5.html>.
- Barreteau, O., Bousquet, F., Millier, C. & Weber, J. (2004).** Suitability of Multi-Agent Simulations to study irrigated system viability: application to case studies in the Senegal River Valley. *Agricultural Systems* **80**(3): 255-275.
- Barreteau, O., Garin, P., Dumontier, A., Abrami, G. & Cernesson, F. (2003a).** Agent-based facilitation of water allocation: Case study in the Drome River Valley. *Group Decision and Negotiation* **12**(5): 441-461.

- Barreteau, O., Le Page, C. & d'Aquino, P. (2003b).** Role-playing games, models and negotiation processes. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **6**(2).  
<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/2/10.html>.
- Barthel, R., Rojanschi, V., Wolf, J. & Braun, J. (2005).** Large-scale water resources management within the framework of GLOWA-Danube. Part A: The groundwater model. *Physics and Chemistry of the Earth* **30**(6-7 SPEC. ISS.): 372-382.
- Barthélemy, O. (2006).** Untangling Scenario Components with Agent Based Modelling: an Example of Social Simulations of Water Demand Forecasts. Manchester, UK: Manchester Metropolitan University
- Barthélemy, O., Moss, S., Downing, T. E. & Rouchier, J. (2001).** Policy Modelling with ABSS: The Case of Water Demand Management. *Centre for Policy Modelling Report No.: 02-92*.  
<http://cfpm.org/cpmrep92.html>.
- Basmdjian, D. (1999).** *The art of modeling in science and engineering*. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: Chapman & Hall/CRC.
- Bass, F. M. (1969).** A new product growth for model consumer durables. *Management Science* **15**(5): 215-227.
- Baumann, D. D. & Boland, J. J. (1998).** The Case for Managing Urban Water. En Baumann, D. D., Boland, J. J. & Hanemann, W. M. (Eds), *Urban water demand management and planning*: 1-30. New York: McGraw-Hill.
- Baumann, D. D., Boland, J. J. & Hanemann, W. M. (1998).** *Urban water demand management and planning*. New York: McGraw-Hill.
- Beard, D. (1995).** Intervención ante la Comisión Internacional de Grandes Presas-Durban-Sudáfrica. *Tecnología del Agua* **137**: 77-78.
- Becu, N., Perez, P., Walker, A., Barreteau, O. & Le Page, C. (2003).** Agent based simulation of a small catchment water management in northern Thailand description of the CATCHSCAPE model. *Ecological Modelling* **170**(2-3): 319-331.
- Beecher, J. A. (1995).** Integrated Resource Planning Fundamentals. *American Water Works Association Journal* **87**(6): 34-48.
- Benenson, I. (2004).** Agent-Based Modeling: From Individual Residential Choice to Urban Residential Dynamics. En Goodchild, M. F. & Janelle, D. G. (Eds), *Spatially Integrated Social Science: Examples in Best Practice*: 67-95. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Benenson, I. (1998).** Multi-Agent Simulations of Residential Dynamics in the City. *Computing, Environment and Urban Systems* **22**(1): 25-42.
- Benenson, I. (1999).** Modeling population dynamics in the city: from a regional to a multi-agent approach. *Discrete Dynamics in Nature and Society* **3**: 149-170.
- Benenson, I., Omer, I. & Hatna, E. (2002).** Entity-based modeling of urban residential dynamics: the case of Yaffo, Tel Aviv. *Environment & Planning B: Planning & Design* **29**(4): 491-512.
- Benenson, I. & Torrens, P. M. (2004).** *Geosimulation: automata-based modeling of urban phenomena*. Chichester, UK: John Wiley and Sons.
- Benito, J. J., Arauzo, J. A., del Olmo, R. & Sanz, P. (2005).** Los sistemas multi-agentes en la formación de empresas virtuales dinámicas. En de la Fuente, D. (Eds), *IX Congreso de Ingeniería de Organización*: 107-108. Oviedo: ADINGOR.
- Bennet, B. S. (1995).** *Simulation Fundamentals*. London, New York: Prentice Hall.

- Berg, M. d., van Kreveld, M., Overmars, M. & Schwarzkopf, O. (2000).** *Computational Geometry: Algorithms and applications*. Berlin: Springer-Verlag.
- Bergman, A. & Tennenholtz, M. (2002).** On the Natural Selection of Market Choice. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* **5**(4): 387-395.
- Billings, R. B. (1982).** Specification of Block Rate Price Variables in Demand Models. *Land Economics* **58**(3): 386-393.
- Billings, R. B. & Day, W. M. (1989).** Demand Management Factors in Residential Water Use: The Southern Arizona Experience. *American Water Works Association Journal* **81**(3): 58-64.
- Billings, R. B. & Jones, C. V. (1996).** *Forecasting Urban Water Demand*. Denver, CO: American Water Works Association.
- Binmore, K. (1998).** Review of the book: The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration, by Axelrod, R., Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1997. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **1**(1).  
<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/1/1/review1.html>.
- Boccaro, N. & Fuks, H. (1998).** Modeling diffusion of innovations with probabilistic cellular automata. En Delorme, M. & Mazoyer, J. (Eds), *Cellular Automata: A Parallel Model*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Boland, J. J., Dziegielewski, B., Baumann, D. D. & Opitz, E. M. (1984).** Influence of Price and Rate Structures on Municipal and Industrial Water Use. *IWR Report 84-C-2*. Fort Belvoir, VA: U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources.
- Bollacker, K., Lawrence, S. & Giles, C. L. (1998).** CiteSeer: An Autonomous Web Agent for Automatic Retrieval and Identification of Interesting Publications. En Sycara, K. P. & Wooldridge, M. J. (Eds), *Proceedings of the Second International Conference on Autonomous Agents*: 116-123. New York: ACM Press.
- Bonabeau, E. (2002).** Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **99**(2): 7280-7287.
- Booth, G. (1997).** Gecko: a continuous 2-D world for ecological modeling. *Artificial Life* **3**(3): 147-163.
- Bordini, R. H., da Rocha Costa, A. C., Hübner, J. F., Moreira, A. F., Okuyama, F. Y. & Vieira, R. (2005).** MAS-SOC: a Social Simulation Platform Based on Agent-Oriented Programming. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **8**(3).  
<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/3/7.html>.
- Borshchev, A. & Filippov, A. (2004).** From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools. En Kennedy, M., Winch, W. G., Langer, R. S., Rowe, J. I. & Yanni, J. M. (Eds), *Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamics Society*. Albany, NY: Systems Dynamics Society.  
[http://www.systemdynamics.org/conf2004/SDS\\_2004/PAPERS/381BORSH.pdf](http://www.systemdynamics.org/conf2004/SDS_2004/PAPERS/381BORSH.pdf).
- Bougadis, J., Adamowski, K. & Diduch, R. (2005).** Short-term municipal water demand forecasting. *Hydrological Processes* **19**(1): 137-148.
- Bousquet, F., Bakam, I., Proton, H. & Le Page, C. (1998).** Cormas: Common-Pool Resources and Multi-Agent Systems. En Pasqual del Pobil, A., Mira, J. & Moonis, A. (Eds), *Proceedings of the 11th International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems: Tasks and Methods in Applied Artificial Intelligence. Lecture Notes in Artificial Intelligence, 1416*: 826-837. London, UK: Springer-Verlag.

- Bousquet, F., Barreteau, O., Le Page, C., Mullon, C. & Weber, J. (1999).** An environmental modelling approach. The use of multi-agent simulations. En Blasco, F. & Weill, A. (Eds), *Advances in environmental and ecological modelling*: 113-122. New York, NY: Elsevier.
- Bousquet, F. & Le Page, C. (2004).** Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecological Modelling* **176**: 313-332.
- Bousquet, F., Le Page, C., Bakam, I. & Takforyan, A. (2001).** Multiagent simulations of hunting wild meat in a village in eastern Cameroon. *Ecological Modelling* **138**(1-3): 331-346.
- Bousquet, F., Morand, P., Quensière, J. & Pavé, A. (1993).** Simulating the interaction between a society and a renewable resource. *Journal of Biological Systems* **1**(2): 199-214.
- Box, G. E. P. & Jenkins, G. M. (1976).** *Time series analysis: forecasting and control*. San Francisco: Holden-Day.
- Box, P. (2002).** Spatial Units as Agents. En Gimblett, H. R. (Eds), *Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Modeling Techniques for Simulating Social and Ecological Processes*: 59-82. New York: Oxford University Press.
- Bradbury, R. H. (2002).** Futures, predictions and other foolishness. En Janssen, M. (Eds), *Complexity and Ecosystem Management: The Theory and Practice of Multi-agent Systems*: 48-62. Cheltenham: Edward Elgar.
- Brassel, K. (2001).** Flexible Modelling with VSEit, the Versatile Simulation Environment for the Internet. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **4**(3).  
<http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/4/3/10.html>.
- Bredin, J., Kotz, D., Rus, D., Maheswaran, R. T., Imer, C. & Basar, T. (2003).** Computational Markets to Regulate Mobile-Agent Systems. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* **6**(3): 235-263.
- Brown, D. G., Page, S. E., Riolo, R. & Rand, W. (2004).** Agent-based and analytical modeling to evaluate the effectiveness of greenbelts. *Environmental Modelling and Software* **19**(12): 1097-1109.
- Brown, D. G., Riolo, R., Robinson, D. T., North, M. & Rand, W. (2005).** Spatial process and data models: Toward integration of agent-based models and GIS. *Journal of Geographical Systems* **7**(1): 25-47.
- Brown, T. N. & Kulasiri, D. (1996).** Validating models of complex, stochastic, biological systems. *Ecological Modelling* **86**(2-3): 129-134.
- Bruun, C. (2001).** Prospects for an Economics Framework for Swarm. En Luna, F. & Perrone, A. (Eds), *Agent-Based Methods in Economics and Finance: Simulations in Swarm*: 1-21. Dordrecht / Boston / London: Kluwer Academic Publisher.
- Cabrera, E. (2000).** Estado general de los abastecimientos de agua en España. En Estevan, A. & Viñuales, V. (Eds), *La eficiencia del agua en las ciudades*. Bakeaz: Fundación Ecología y Desarrollo.
- Caridad, J. M. & Moreno, I. (2002).** La demanda de agua en zonas urbanas: métodos alternativos de predicción a corto plazo. En *III Congreso Ibérico Sobre Gestión y Planificación de Aguas. La Directiva Marco del agua: realidades y futuros*: 210-222.  
[www.us.es/ciberico/archivos\\_acrobat/sevilla2caridad.pdf](http://www.us.es/ciberico/archivos_acrobat/sevilla2caridad.pdf).
- Carley, K. M. & Gasser, L. (1999).** Computational Organization Theory. En Weiss, G. (Eds), *Multiagent Systems. A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*: 299-330. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.

- Carpenter, J. (2002).** Evolutionary Models of Bargaining: Comparing agent-based computational and analytical approaches to understanding convention evolution. *Computational Economics* 19(1): 25-49.
- Carvalho, J. (2000).** Using AgentSheets to teach simulation to undergraduate students. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 3(3).  
<http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/3/3/forum/2.html>.
- Castella, J. C., Trung, T. N. & Boissau, S. (2005).** Participatory simulation of land-use changes in the northern mountains of Vietnam: The combined use of an agent-based model, a role-playing game, and a geographic information system. *Ecology and Society* 10(1).  
<http://www.ecologyandsociety.org/vol10/iss1/art27/>.
- Cavallo, B. (2005).** *Computational Economics. Research lines, trends and opportunities*. Benevento: RCOST-University of Sannio. [www.cise.rcost.unisannio.it](http://www.cise.rcost.unisannio.it).
- Cederman, L. E. (2002).** Endogenizing geopolitical boundaries with agent-based modeling. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99(3): 7296-7303.
- Cheng, B. & Titterington, D. M. (1994).** Neural Networks: A Review from a Statistical Perspective. *Statistical Science* 9(1): 2-30.
- Chicoine, D. & Ramamurthy, G. (1986).** Evidence on the Specification of Price in the Study of Domestic Water Demand. *Land Economics* 62(1): 26-32.
- Christley, S., Xiang, X. & Madey, G. (2004).** Ontology for agent-based modeling and simulation. En Macal, C. M., Sallach, D. & North, M. J. (Eds), *Proceedings of the Agent 2004 Conference on Social Dynamics: Interaction, Reflexivity and Emergence*. Chicago, IL: Argonne National Laboratory and The University of Chicago. <http://www.agent2005.anl.gov/Agent2004.pdf>.
- Chung, C. A. (2004).** *Simulation modeling handbook: a practical approach*. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press.
- Cioffi-Revilla, C. (2002).** Invariance and universality in social agent-based simulations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99(3): 7314-7316.
- Clarke, K. C. (1999).** *Getting started with Geographic Information Systems*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- CNUMAD (1992).** *Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Río de Janeiro: NU.
- Cohen, P. R. (1985).** *Heuristic Reasoning about Uncertainty: an Artificial Intelligence Approach*. Boston, MA: Pitman Advanced Publishing Program.
- Collier, N. (2003).** RePast: An Extensible Framework for Agent Simulation.  
<http://repast.sourceforge.net/>
- Collier, N., Howe, T. & North, M. (2003).** Onward and Upward: The Transition to Repast 2.0. *Proceedings of the First Annual North American Association for Computational Social and Organizational Science Conference*. Pittsburgh, PA
- Conlisk, J. (1996).** Why bounded rationality? *Journal of Economic Literature* 34(2): 669-700.
- Conte, R., Hegselmann, R. & Terna, P. (1997).** *Simulating Social Phenomena, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems* 456. New York, NY: Springer-Verlag.

- Dal Forno, A. & Merlone, U. (2002).** A multi-agent simulation platform for modeling perfectly rational and bounded-rational agents in organizations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 5(2). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/2/3.html>.
- Dandy, G., Nguyen, T. & Davies, C. (1997).** Estimating residential water demand in the presence of free allowances. *Land Economics* 73(1): 125-139.
- Daniels, M. (2000).** Integrating Simulation Technologies with Swarm. En Macal, C. M. & Sallach, D. (Eds), *Proceedings of the Workshop on Agent Simulation: Applications, Models, and Tools*. Argonne, IL: Argonne National Laboratory.
- David, N., Marietto, M. B., Sichman, J. S. & Coelho, H. (2004).** The Structure and Logic of Interdisciplinary Research in Agent-Based Social Simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 7(3). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/3/4.html>.
- Davidsson, P. (2001).** Multi agent based simulation: beyond social simulation. En Moss, S. & Davidsson, P. (Eds), *Multi-Agent-Based Simulation, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1979*: 97-107. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Davidsson, P. (2002).** Agent Based Social Simulation: A Computer Science View. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 5(1). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/1/7.html>.
- Davis, D. N. (2000).** Agent-based decision-support framework for water supply infrastructure rehabilitation and development. *Computers, Environment and Urban Systems* 24(3): 173-190.
- Deadman, P. J. (1999).** Modelling individual behaviour and group performance in an intelligent agent-based simulation of the tragedy of the commons. *Journal of Environmental Management* 56(3): 159-172.
- Deadman, P. J. & Gimblett, H. R. (1994).** The Role of Goal-Oriented Autonomous Agents in Modeling People-Environment Interactions in Forest Recreation. *Mathematics and Computers Modelling* 20(8): 121-133.
- Dean, J. S., Gumerman, G. J., Epstein, J. M., Axtell, R. L., Swedlund, A. C., Parker, M. T. & McCarrroll, S. (2000).** Understanding Anasazi Culture Change Through Agent-Based Modeling. En Kohler, T. & Gumerman, G. J. (Eds), *Dynamics in Human and Primate Societies. Agent-Based Modeling of Social and Spatial Processes*: 179-205. New York: Oxford University Press and Santa Fe Institute.
- Delaunay, B. N. (1934).** Sur la sphère vide. *Bulletin of the Academy of Sciences of USSR Classe Sci Mat Nat* 7(6): 793-800.
- Demazeau, Y. (2001).** La méthode VOYELLES, dans Systèmes Multi-Agents: Des Théories Organisationnelles aux Applications Industrielles. Hermès.
- Dibble, C. & Feldman, P. G. (2004).** The GeoGraph 3D Computational Laboratory: Network and Terrain Landscapes for RePast. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 7(1). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/1/7.html>.
- Domene, E. & Saurí, D. (2003).** Modelos urbanos y consumo de agua: el riego de jardines privados en la región metropolitana de Barcelona. *Investigaciones Geográficas* 32: 5-17.
- Doorenbos, R., Etzioni, O. & Weld, D. (1997).** A scaleable comparison-shopping agent for the world wide web. *Proceedings of the 1st Conference on Autonomous Agents (Agents 97)*: 39-48. Marina del Rey, CA
- Doran, J. (2001).** Intervening to Achieve Co-operative Ecosystem Management: Towards an Agent Based Model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 4(2). <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/4/2/4.html>.

- Downing, T. E., Moss, S. & Pahl-Wostl, C. (2001).** Understanding climate policy using participatory agent-based social simulation. En Moss, S. & Davidsson, P. (Eds), *Multi-Agent-Based Simulation: Second International Workshop, MABS 2000, Boston, MA, USA, July. Revised and Additional Papers, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1979*: 198-213. Berlin: Springer-Verlag.
- Drogoul, A., Vanbergue, D. & Meurisse, T. (2003).** Multi-Agent Based Simulation: Where are the Agents? En Sichman, J. S., Bousquet, F. & Davidsson, P. (Eds), *Proceedings of MABS 2002 Multi-Agent-Based Simulation, Lecture Notes in Computer Science 2581*: 1-15. Bologna, Italy: Springer-Verlag.
- Ducrot, R., Le Page, C., Bommel, P. & Kuper, M. (2004).** Articulating land and water dynamics with urbanization: An attempt to model natural resources management at the urban edge. *Computers, Environment and Urban Systems* **28**(1-2): 85-106.
- Dumont, B. & Hill, D. R. C. (2001).** Multi-agent simulation of group foraging in sheep: Effects of spatial memory, conspecific attraction and plot size. *Ecological Modelling* **141**(1-3): 201-215.
- DWR (1998).** *California Water Plan Update Bulletin 160-98*. Sacramento, CA: California Department of Water Resources.
- Edmonds, B. (2001).** The Use of Models - making MABS actually work. En Moss, S. & Davidsson, P. (Eds), *Multi-Agent-Based Simulation, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1979*: 15-32. Berlin: Springer-Verlag.
- Edmonds, B. (2005).** Simulation and Complexity - how they can relate. En Feldmann, V. & Mühlfeld, K. (Eds), *Virtual Worlds of Precision - computer-based simulations in the sciences and social sciences*: 5-32. Münster, Germany: Lit-Verlag.
- Edmonds, B. (2003).** Towards an ideal social simulation language. En Sichman, J. S., Bousquet, F. & Davidsson, P. (Eds), *Multi-Agent-Based Simulation II: 3rd Int. Workshop, MABS02, Lecture Notes in Computer Science 2581*: 104-124: Springer.
- Edmonds, B., Barthélemy, O. & Moss, S. (2002).** Domestic Water Demand and Social Influence - an agent-based modelling approach. *Centre for Policy Modelling Report 02-103*.  
<http://cfpm.org/cpmrep103.html>.
- Edmonds, B. & Hales, D. (2003).** Replication, replication and replication: Some hard lessons from model alignment. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **6**(4).  
<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/4/11.html>.
- Edmonds, B. & Hales, D. (2005).** Computational Simulation as Theoretical Experiment. *Journal of Mathematical Sociology* **29**: 1-24.
- Edmonds, B. & Moss, S. (2005).** From KISS to KIDS - An 'anti-simplistic' modelling approach. En Davidsson, P., Logan, B. & Takadama, K. (Eds), *Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation, Joint Workshop MABS 2004. Lecture Notes in Artificial Intelligence 3415*: 130-144. Berlin / Heidelberg: Springer.
- Edmonds, B., Moss, S. & Wallis, S. (1996).** Logic, Reasoning and A Programming Language for Simulating Economic and Business Processes with Artificially Intelligent Agents. En Ein-Dor, P. (Eds), *Artificial Intelligence in Economics and Management*: 221-230. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers.
- Edwards, M., Ferrand, N., Goreaud, F. & Huet, S. (2005).** The relevance of aggregating a water consumption model cannot be disconnected from the choice of information available on the resource. *Simulation Modelling Practice and Theory* **13**(4): 287-307.

- Edwards, M., Huet, S., Goreaud, F. & Deffuant, G. (2003). Comparing an individual-based model of behaviour diffusion with its mean field aggregate approximation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 6(4). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/4/9.html>.
- Ehrentreich, N. (2002). The Santa Fe Artificial Stock Market Re-Examined - Suggested Corrections. *Economics Working Paper Archive at WUSTL*. <http://econwpa.wustl.edu:80/eps/comp/papers/0209/0209001.pdf>.
- Epstein, J. M. (1999). Agent-based computational models and generative social science. *Complexity* 4(5): 41-60.
- Epstein, J. M. & Axtell, R. L. (1996). *Growing Artificial Societies. Social Science From the Bottom Up*. Cambridge, MA: Brookings Institution Press-MIT Press.
- Etienne, M. (2003). SYLVOPAST: A multiple target role-playing game to assess negotiation processes in sylvopastoral management planning. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 6(2). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/2/5.html>.
- Etienne, M., Le Page, C. & Cohen, M. (2003). A step-by-step approach to building land management scenarios based on multiple viewpoints on multi-agent system simulations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 6(2). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/2/2.html>.
- Fahey, L. & Randall, R. M. (1998). *Learning from the future: competitive foresight scenarios*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Fatima, S. S., Wooldridge, M. J. & Jennings, N. R. (2005). A Comparative Study of Game Theoretic and Evolutionary Models of Bargaining for Software Agents. *Artificial Intelligence Review* 23: 185-203.
- Ferber, J. (1999). *Multi-agent systems. An introduction to distributed artificial intelligence*. Harlow, UK: Addison-Wesley.
- Feuillette, S., Bousquet, F. & Le Goulven, P. (2003). SINUSE: A multi-agent model to negotiate water demand management on a free access water table. *Environmental Modelling and Software* 18(5): 413-427.
- FIRMA (2003). Participatory Integrated Assessment in Five Case Studies. *Report of Workpackage 4 of the FIRMA Project*. <http://firma.cfpm.org/>
- Fisher, M. (2004). Temporal Development Methods for Agent-Based. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 10(1): 41-66.
- Flache, A. & Hegselmann, R. (2001). Do Irregular Grids make a Difference? Relaxing the Spatial Regularity Assumption in Cellular Models of Social Dynamics. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 4(4). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/4/6.html>.
- Franklin, S. & Graesser, A. (1997). Is it an agent, or just a program? A Taxonomy for Autonomous Agents. En Müller, J. P., Wooldridge, M. J. & Jennings, N. R. (Eds), *Intelligent Agents III: Proceedings of the Third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1193*: 21-36. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Franses, H. P. (2006). Forecasting in Marketing. En Elliot, G., Granger, C. W. J. & Timmermann, A. (Eds), *Handbook of Economic Forecasting*: 984-1012. Amsterdam: North-Holland.
- Galán, J. M., Downing, T. E., López-Paredes, A. & Warwick, C. (2003a). Rigour and reliability in agent-based social simulation through replication. *Online Proceedings of the First Conference of the European Social Simulation Association*. Groningen, The Netherlands <http://www.uni-koblenz.de/~kgt/ESSA/ESSA1/Galan.doc>.

- Galán, J. M. & Izquierdo, L. R. (2005).** Appearances Can Be Deceiving: Lessons Learned Re-Implementing Axelrod's 'Evolutionary Approach to Norms'. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 8(3). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/3/2.html>.
- Galán, J. M., Izquierdo, L. R., Izquierdo, S. S., Santos, J. I., del Olmo, R. & López-Paredes, A. (2006).** Assessing the Reliability and Usefulness of Agent-Based Models. Enviado al Model To Model Workshop 2007.
- Galán, J. M., López-Paredes, A. & del Olmo, R. (2005a).** Simulación basada en agentes en Teoría de Juegos Evolutiva: ¿pueden las metanormas evitar el colapso de una norma social? En de la Fuente, D. (Eds), *IX Congreso de Ingeniería de Organización*: 65-66. Oviedo: ADINGOR.
- Galán, J. M., López-Paredes, A. & del Olmo, R. (2004).** Simulación de sociedades artificiales de agentes y autómatas celulares en Ingeniería de Organización: aplicación a la gestión del agua. En *Actas del VIII Congreso de Ingeniería de Organización*: 1033-1042. Leganés: ADINGOR
- Galán, J. M., López-Paredes, A., Hernández, C. & Pajares, J. (2003b).** La replicación en la Simulación Social Basada en Agentes. El caso de SDML y RePast. *Vetas* 13: 75-102.
- Galán, J. M., Santos, J. I., Izquierdo, S. S., Pascual, J. A., del Olmo, R. & López-Paredes, A. (2007).** Agent-Based Modelling in Domestic Water Management: Barcelona and Valladolid case studies. En López-Paredes, A. & Hernández, C. (Eds), *Agent-Based Modelling in Natural Resources Management*: Pearson Education.
- Galán, J. M., Santos, J. I., Izquierdo, S. S., del Olmo, R. & López-Paredes, A. (2005b).** Simulating complex adaptive social systems with agents: domestic water management. *Proceedings of the IV International Workshop on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems*: 79-86. León: Universidad de León.
- Garijo, F. J. (2005).** Telecomunicaciones. En Mas, A. (Eds), *Agentes Software y Sistemas Multi-Agente. Conceptos, Arquitecturas y Aplicaciones*: 241-253. Madrid, Spain: Pearson Educación.
- Gilbert, N. (2005).** Agent-based social simulation: Dealing with complexity. <http://www.complexityscience.org/NoE/ABSS-dealing%20with%20complexity-1-1.pdf>.
- Gilbert, N. (1999a).** Simulation: A new way of doing social science. *The American Behavioral Scientist* 42(10): 1485-1487.
- Gilbert, N. (1999b).** Multi-level simulation in Lisp-Stat. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 2(1). <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/2/1/3.html>.
- Gilbert, N. (1995).** Emergence in social simulation. En Gilbert, N. & Conte, R. (Eds), *Artificial Societies: the computer simulation of social life*: 144-156. London, UK: UCL Press.
- Gilbert, N. & Banks, S. C. (2002).** Platforms and methods for agent-based modeling. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99(3): 7197-7198.
- Gilbert, N. & Conte, R. (1995).** *Artificial Societies: the Computer Simulation of Social Life*. London, UK: UCL Press.
- Gilbert, N. & Doran, J. (1995).** *Simulating Societies*. London, UK: UCL Press.
- Gilbert, N. & Terna, P. (2000).** How to build and use agent-based models in social science. *Mind and Society* 1(1): 57-72.
- Gilbert, N. & Troitzsch, K. G. (1999).** *Simulation for the social scientist*. Buckingham, UK: Open University Press.

- Gimblett, H. R. (2002).** *Integrating geographic information systems and agent-based modeling techniques for simulating social and ecological processes*. Oxford: Oxford University Press.
- Giret, A., Julián, V. & Botti, V. J. (2005).** Aplicaciones Industriales de los Sistemas Multiagente. En Mas, A. (Eds), *Agentes Software y Sistemas Multi-Agente. Conceptos, Arquitecturas y Aplicaciones*: 186-203. Madrid, Spain: Pearson Educación.
- Gistau, R. & García-Poveda, M. (1993).** Previsión de la demanda en los sistemas de abastecimiento de agua. *Abastecimientos de Agua Urbanos. Estado actual y tendencias futuras*: 41-64. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Goldenberg, J., Libai, B. & Muller, E. (2001).** Talk of the Network: A Complex Systems Look at the Underlying Process of Word-of-Mouth. *Marketing Letters* **12**(3): 211-223.
- Gonçalves, A., Rodrigues, A. & Correia, L. (2004).** Multi-Agent Simulation within Geographic Information Systems. *Proceedings of the 5th International Workshop on Agent-Based Simulation*: 107-112. Lisboa
- González, S. (1998).** Predicciones de variables energéticas mediante análisis de series temporales. *Tecnia* **8**(2): 81-87.
- Goodchild, M. F. & Longley, P. A. (2005).** The future of GIS and spatial analysis. En Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J. & Rhind, D. W. (Eds), *Geographical information systems: principles, techniques, management and applications*: 567-580. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons.
- Gotts, N. M., Polhill, J. G. & Adam, W. J. (2003a).** Simulation and Analysis in Agent-Based Modelling of Land Use Change. *Online proceedings of the First Conference of the European Social Simulation Association, Groningen, The Netherlands, 18-21 September 2003*  
<http://www.uni-koblenz.de/~kgt/ESSA/ESSA1/proceedings.htm>.
- Gotts, N. M., Polhill, J. G. & Law, A. N. R. (2003b).** Aspiration levels in a land use simulation. *Cybernetics and Systems* **34**(8): 663-683.
- Granovetter, M. (1978).** Threshold models of collective behaviour. *American Journal of Sociology* **83**(6): 1420-1443.
- Grimm, V. (1999).** Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned and what could we learn in the future? *Ecological Modelling* **115**: 129-148.
- Gulyás, L., Kozsik, T. & Corliss, J. B. (1999).** The Multi-Agent Modelling Language and the Model Design Interface. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **2**(3).  
<http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/2/3/8.html>.
- Haken, H. & Portugali, J. (1995).** A synergetic approach to the self-organization of cities and settlements. *Environment & Planning B: Planning & Design* **22**(1): 35-46.
- Hales, D. (2005).** Engineering with Sociological Metaphors: Examples and Prospects. *AISB 2005 Symposium, Engineering with Social Metaphors*: University of Hertfordshire, UK.
- Hall, S. G. (1994).** Time series forecasting. En Hall, S. G. (Eds), *Applied Economic Forecasting Techniques*: 9-28. Hertfordshire: Harvester-Wheatsheaf.
- Halls, P. J., Bulling, M., White, P. C. L., Garland, L. & Harris, S. (2001).** Dirichlet neighbours: Revisiting Dirichlet tessellation for neighbourhood analysis. *Computers, Environment and Urban Systems* **25**(1): 105-117.
- Hamilton, W. D., Axelrod, R. M. & Tanese, R. (1990).** Sexual Reproduction as an Adaptation to Resist Parasites. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **87**: 3566-3573.

- Hanemann, M. (1998).** Determinants of urban water use. En Baumann, D. D., Boland, J. J. & Hanemann, W. M. (Eds), *Urban water demand management and planning*: 31-75. New York: McGraw-Hill.
- Hare, M. & Deadman, P. (2004).** Further towards a taxonomy of agent-based simulation models in environmental management. *Mathematics and Computers in Simulation* **64**(1): 25-40.
- Haynes, K. E., Mahajan, V. & White, G. M. (1977).** Innovation diffusion: A deterministic model of space-time integration with physical analog. *Socio-Economic Planning Science* **11**: 25-29.
- Hegselmann, R. & Flache, A. (1998).** Understanding Complex Social Dynamics: A Plea For Cellular Automata Based Modelling. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **1**(3). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/1/3/1.html>.
- Hernández, C. (2004).** Herbert A. Simon, 1916-2001, y el Futuro de la Ciencia Económica. *Revista Europea de Dirección y Economía de la Empresa* **13**(2): 7-23.
- Hernández, C. & Hernández, F. (1981).** Causality and the Independence Phenomenon: the Case of the Demand for Money. *Journal of Econometrics* **15**: 247-263.
- Hernández, C. & López-Paredes, A. (1999).** Beyond Experimental Economics: Trading Institutions and Multiagent Systems. *Computing in Economics and Finance 1999 from Society for Computational Economics* **1351**. <http://fmwww.bc.edu/cef99/papers/hernandez.pdf>.
- Herrington, P. (1996).** *Climate change and the demand for water*. London, UK: HMSO.
- Hewitt, J. A. & Hanemann, W. M. (1995).** A discrete/continuous choice approach to residential water demand under block rate pricing. *Land Economics* **71**(2): 173-192.
- Heywood, J. G. (1990).** *The Navier-Stokes equations. Theory and numerical methods. Proceedings of a conference held at Oberwolfach, FRG, Sept. 18-24, 1988. Lecture Notes in Mathematics*. Berlin: Springer-Verlag.
- Hiebeler, D. (1994).** The swarm simulation system and individual-based modeling. En Power, J. M., Strome, M. & Daniel, T. C. (Eds), *Decision Support 2001. 17th Annual Geographic Information Seminar and the Resource Technology '94 Symposium*: 474-494: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Hills, S. & Birks, R. (2004).** Washroom behaviour and users' perceptions of "novel" water-efficient appliances. *Water Science and Technology: Water Supply* **4**(3): 13-23.
- Hittle, D. C., Flocken, P. A. & Anderson, C. W. (1996).** Neural networks for predicting chilled water demand in buildings. 387-394
- Hogg, R. V. & Craig, A. T. (1978).** *Introduction to Mathematical Statistics*. New York, NY: Collier-Macmillan.
- Höglund, L. (1999).** Household demand for water in Sweden with implications of a potential tax on water use. *Water Resources Research* **35**(12): 3853-3863.
- Holland, J. H. (1998).** *Emergence. From chaos to order*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Holland, J. H. & Miller, J. H. (1991).** Artificial adaptive agents in economic theory. *American Economic Review* **81**(2): 365-370.
- Hommes, C. H. (2002).** Modeling the stylized facts in finance through simple nonlinear adaptive systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **99**(3): 7221-7228.

- Hopgood, A. A. (2000).** *Intelligent Systems for Engineers and Scientists*. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press.
- Hornik, K., Stinchcombe, M. & White, H. (1990).** Universal approximation of an unknown mapping and its derivatives using multilayer feedforward networks. *Neural Networks* **3**(5): 551-560.
- Howe, C. & White, S. (1999).** Integrated resource planning for water and waste water: Sydney case studies. *Water International* **24**(4): 356-362.
- Iglesias, C., Garijo, M. & Gonzalez, J. C. (1999).** A Survey of Agent-Oriented Methodologies. En Müller, J., Singh, M. P. & Rao, A. S. (Eds), *Proceedings of the 5th International Workshop on Intelligent Agents V: Agent Theories, Architectures, and Languages (ATAL-98), Lecture Notes in Artificial Intelligence 1555*: 317-330. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Ilonen, J., Kamarainen, J. K., Puumalainen, K., Sundqvist, S. & inen, H. (2006).** Toward automatic forecasts for diffusion of innovations. *Technological Forecasting & Social Change* **73**: 182-198.
- Inchiosa, M. E. & Parker, M. T. (2002).** Overcoming design and development challenges in agent-based modeling using ASCAPE. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **99**(3): 7304-7308.
- Izquierdo, L. R., Izquierdo, S. S., Gotts, N. M. & Polhill, J. G. (2007).** Transient and Asymptotic Dynamics of Reinforcement Learning in Games. *Games and Economic Behavior* **61**(2): 259-276.
- Izquierdo, S. S. & Izquierdo, L. R. (2007).** The Impact on Market Efficiency of Quality Uncertainty without Asymmetric Information. *Journal of Business Research* **60**(8): 858-867.
- Izquierdo, S. S. & Izquierdo, L. R. (2006).** On the Structural Robustness of Evolutionary Models of Cooperation. En Corchado, E., Yin, H., Botti, V. J. & Fyfe, C. (Eds), *Intelligent Data Engineering and Automated Learning - IDEAL 2006. Lecture Notes in Computer Science 4224*: 172-182. Berlin Heidelberg: Springer.
- Izquierdo, S. S., Izquierdo, L. R., Galán, J. M. & Hernández, C. (2006).** Market Failure Caused by Quality Uncertainty. En Mathieu, P., Beaufiles, B. & Brandouy, O. (Eds), *Artificial Economics. A Symposium in Agent-based Computational Methods in Finance, Game Theory and their applications. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 564*: 203-214. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Jacobs, H. & Haarhoff, J. (2004a).** Application of a residential end-use model for estimating cold and hot water demand, wastewater flow and salinity. *Water SA* **30**(3): 305-316.
- Jacobs, H. & Haarhoff, J. (2004b).** Structure and data requirements of an end-use model for residential water demand and return flow. *Water SA* **30**(3): 293-304.
- Jain, A. & Ormsbee, L. E. (2002).** Short-term water demand forecast modeling techniques - Conventional methods versus AI. *American Water Works Association Journal* **94**(7): 64-72.
- Jain, A., Varshney, A. K. & Joshi, U. C. (2001).** Short-term water demand forecast modelling at IIT Kanpur using artificial neural networks. *Water Resources Management* **15**(5): 299-321.
- Janssen, M. A. (2002).** *Complexity and ecosystem management. The theory and practice of multi-agent systems*. Cheltenham, UK: Edward Elgar Pub.
- Jaramillo-Mosqueira, L. A. (2005).** Evaluación econométrica de la demanda de agua de uso residencial en México. *El Trimestre Económico* **72**(286): 367-390.

- Jennings, N. R., Sycara, K. P. & Wooldridge, M. J. (1998).** A Roadmap of Agent Research and Development. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* **1**(1): 7-38.
- Jennings, N. R. & Wooldridge, M. J. (1995).** Applying agent technology. *Applied Artificial Intelligence* **9**(4): 357-369.
- Jennings, N. R. & Wooldridge, M. J. (1998).** Applications of Intelligent Agents. En Jennings, N. R. & Wooldridge, M. J. (Eds), *Agent Technology Foundations, Applications, and Markets*: 3-28. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag.
- Johnson, P. E. (1999).** Simulation modeling in political science. *The American Behavioral Scientist* **42**(10): 1509-1530.
- Johnson, S. (2001).** *Emergence: the connected lives of ants, brains, cities, and software*. New York: Scribner.
- Joo, C. N., Koo, J. Y. & Yu, M. J. (2002).** Application of short-term water demand prediction model to Seoul. *Water Science and Technology* **46**(6-7): 255-261.
- Julián, V., Giret, A. & Botti, V. J. (2005).** Aplicaciones en Recuperación de Información. En Mas, A. (Eds), *Agentes Software y Sistemas Multi-Agente. Conceptos, Arquitecturas y Aplicaciones*: 221-231. Madrid, Spain: Pearson Educación.
- Kleijnen, J. P. C. (1995).** Verification and validation of simulation models. *European Journal of Operational Research* **82**(1): 145-162.
- Kleindorfer, G. B., O'Neill, L. & Ganeshan, R. (1998).** Validation in simulation: Various positions in the philosophy of science. *Management Science* **44**(8): 1087-1099.
- Klügl, F., Herrler, R. & Oechslein, C. (2003).** From Simulated to Real Environments: How to Use SeSAM for Software Development. En Schillo, M., Klusch, M., Müller, J. P. & Tianfield, H. (Eds), *Multiagent System Technologies, First German Conference, MATES 2003. Lecture Notes in Computer Science 2831*: 13-24. Berlin: Springer.
- Kohler, T. & Gumerman, G. J. (2000).** *Dynamics in human and primate societies: Agent-based modeling of social and spatial processes*. New York: Oxford University Press and Santa Fe Institute.
- Kohler, T. A., Gumerman, G. J. & Reynolds, R. G. (2005).** Simulating ancient societies. *Scientific American* **293**(1): 76-84.
- Konolige, K. (1992).** Autoepistemic Logic. En Gabbay, D. M., Hogger, C. J. & Robinson, J. A. (Eds), *Handbook of Logic in Artificial Intelligence and Logic Programming. Vol III*. Oxford, UK: Clarendon Press.
- Kotz, C. & Hiessl, H. (2005).** Analysis of system innovation in urban water infrastructure systems: An agent-based modelling approach. *Water Science and Technology: Water Supply* **5**(2): 135-144.
- Kreft, J. U., Booth, G. & Wimpenny, J. W. T. (1998).** BacSim, a simulator for individual-based modelling of bacterial colony growth. *Microbiology* **144**: 3275-3287.
- Kroll, N. & Fassbender, J. K. (2005).** *MEGAFLOW - Numerical Flow Simulation for Aircraft Design*. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Kulshreshtha, S. N. (1996).** Residential water demand in Saskatchewan communities: Role played by block pricing system in water conservation. *Canadian Water Resources Journal* **21**(2): 139-155.
- Lansing, J. S. (2003).** Complex Adaptive Systems. *Annual Review of Anthropology* **32**: 183-204.

- Lansing, J. S. & Kremer, J. N. (1993).** Emergent Properties of Balinese Water Temple Networks: Coadaptation on a Rugged Fitness Landscape. *American Anthropologist* **95**(1): 97-114.
- Lavios, J. J., Galán, J. M., Santos, J. I. & del Olmo, R. (2006).** Could TAC be a laboratory for economists? En Díaz, F., Corchado, J. M. & Fdez-Riverola, F. (Eds), *Proceedings of the Fifth International Workshop on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (IWPAAMS'06)*: 209-212. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- LeBaron, B. (2000).** Agent Based Computational Finance: Suggested Readings and Early Research. *Journal of Economic Dynamics & Control* **24**(5-7): 679-702.
- Lempert, R. (2002).** Agent-based modeling as organizational and public policy simulators. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **99**: 7195-7196.
- Leombruni, R. (2002).** The Methodological Status of Agent-Based Simulations. *LABORatorio R Revelli, Working Paper* **19**.
- Leombruni, R. & Richiardi, M. (2005).** Why are economists sceptical about agent-based simulations? *Physica A* **355**: 103-109.
- Lieberson, S. (1981).** An asymmetrical approach to segregation. En Peach, C., Robinson, V. & Smith, S. (Eds), *Ethnic segregation in the cities*: 61-82. London, UK: Croom Helm.
- Linstone, H. A. & Turoff, M. (2002).** *The Delphi Method: Techniques and Applications*. Murray Turoff and Harold Linstone. <http://www.is.njit.edu/pubs/delphibook/index.html>.
- Liu, J., Savenije, H. H. G. & Xu, J. (2003).** Forecast of water demand in Weinan City in China using WDF-ANN model. *Physics and Chemistry of the Earth* **28**(4-5): 219-224.
- Llamas, M. R. (2004a).** La crisis de la política hidrológica tradicional: nuevas perspectivas. En Aguilera, F., Arrojo, P., Barreira, A. & other authors (Eds), *El Agua en España. Propuestas de Futuro*: 27-68. Guadarrama, Madrid: Ediciones del oriente y del mediterráneo.
- Llamas, M. R. (2004b).** ¿Cuánta agua hay en España, a qué precio y de quién es?: análisis de los recursos hídricos en España ante la nueva Directiva marco del Agua. *Meda: Medio ambiente, biodiversidad y desarrollo sostenible* **29**: 40-45.
- Llamas, M. R., Fornés, J., Hernández-Mora, N. & Martínez, L. (2001).** *Aguas subterráneas: retos y oportunidades*. Madrid: Fundación Marcelino Botín y Mundi-Prensa.
- Loh, M. & Coghlan, P. (2003).** *Domestic Water Use Study. In Perth, Western Australia 1998-2001*. Perth: Water Corporation.
- López-Paredes, A. (2001).** *Análisis e Ingeniería de la Instituciones Económicas. Una metodología basada en agentes*. Zarautz: Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.
- López-Paredes, A. (2000).** *Análisis e Ingeniería de la Instituciones Económicas. Una metodología basada en agentes. Tesis Doctoral*. Universidad del País Vasco.
- López-Paredes, A. (2004).** *Ingeniería de Sistemas Sociales. Diseño, Modelado y Simulación de Sociedades Artificiales de Agentes*. Valladolid: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Valladolid.
- López-Paredes, A. & del Olmo, R. (1998).** The Social Dimension of Economics and Multiagent Systems. En Edmonds, B. & Dautenhahn, K. (Eds), *Socially Situated Intelligence: a workshop held at SAB'98*: 73-79. Zürich: University of Zürich.
- López-Paredes, A. & Galán, J. M. (2003).** Gestión del agua doméstica en la Región Metropolitana de Barcelona: Una aproximación participativa, basada en agentes. En *Actas del V Congreso*

- de Ingeniería de Organización*: 169-170. Editado por Redondo, A. & De Benito, J. J. Valladolid-Burgos: ADINGOR
- López-Paredes, A., Hernández, C. & Pajares, J. (2002)**. Towards a New Experimental Socio-economics. Complex Behaviour in Bargaining. *Journal of Socioeconomics* **31**: 423-429.
- López-Paredes, A., Saurí, D. & Galán, J. M. (2005)**. Urban water management with artificial societies of agents: The FIRMABAR simulator. *Simulation* **81**(3): 189-199.
- Luck, M., McBurney, P. & Preist, C. (2003)**. *Agent Technology: Enabling Next Generation Computing. A Roadmap for Agent-Based Computing*. AgentLink.
- Luck, M., McBurney, P. & Preist, C. (2004a)**. A Manifesto for Agent Technology: Towards Next Generation Computing. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* **9**(3): 203-252.
- Luck, M., McBurney, P., Shehory, O. & Willmott, S. (2004b)**. *Agent Technology Roadmap: Overview and Consultation Report*. AgentLink.
- Luke, S., Balan, G. C., Panait, L., Cioffi-Revilla, C. & Paus, S. (2003)**. MASON: A Java Multi-Agent Simulation Library. En Macal, C. M., North, M. & Sallach, D. (Eds), *Proceedings of Agent 2003, Conference on Challenges in Social Simulation*: 49-64. Argonne, IL: Argonne National Laboratory.
- Luke, S., Cioffi-Revilla, C., Panait, L., Sullivan, K. & Balan, G. C. (2005)**. MASON: A Multi-Agent Simulation Environment. *Simulation* **81**(7): 517-527.
- Luna, F. & Perrone, A. (2001)**. *Agent-Based Methods in Economics and Finance: Simulations in Swarm*. Dordrecht / Boston / London: Kluwer Academic Publisher.
- Luna, F. & Stefansson, B. (2000)**. *Economic Simulations in Swarm: Agent-Based Modelling and Object Oriented Programming*. Dordrecht / Boston / London: Kluwer Academic Publisher.
- Lustick, I. (2002)**. PS-I: A User-Friendly Agent-Based Modeling Platform for Testing Theories of Political Identity and Political Stability. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **5**(3). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/3/7.html>.
- Lyman, R. A. (1992)**. Peak and off-peak residential water demand. *Water Resources Research* **28**(9): 2157-2167.
- Macy, M. W. & Willer, R. (2002)**. From factors to actors: Computational sociology and agent-based modeling. *Annual Review of Sociology* **28**: 143-166.
- Maes, P. (1994)**. Social Interface Agents: acquiring competence by learning from users and other agents. En Etzioni, O. (Eds), *Software Agents - Papers 1994 Spring Symposium*: 71-78: AAAI Press.
- Maguire, D. J. (2005)**. Towards a GIS Platform for Spatial Analysis and Modeling. En Maguire, D. J., Batty, M. & Goodchild, M. F. (Eds), *GIS, Spatial Analysis, and Modeling*: 19-39. Redlands, CA: ESRI Press.
- Maguire, D. J., Batty, M. & Goodchild, M. F. (2005)**. *GIS, spatial analysis, and modeling*. Redlands, Calif: ESRI Press.
- Mahajan, V., Muller, E. & Bass, F. M. (1990)**. New Product Diffusion Models in Marketing: A Review and Directions for Research. *Journal of Marketing* **54**(1): 1-26.
- Mainardi, S. (2003)**. Water availability and infrastructure development: Cross-country econometric and neural network estimates. *Desalination* **158**(1-3): 241-254.

- Makse, H. A., Andrade, J., Batty, M., Havlin, S. & Eugene Stanley, H. (1998).** Modeling urban growth patterns with correlated percolation. *Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics* **58**(6 SUPPL. A): 7054-7062.
- Makse, H. A., Havlin, S. & Stanley, H. E. (1995).** Modelling urban growth patterns. *Nature* **377**(6550): 608-612.
- Margarita, S. & Sonnesa, M. (2003).** Sim2Web: an Open Source system for web-enabling economic and financial simulations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **6**(4). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/4/12.html>.
- Marietto, M. B., David, N., Sichman, J. S. & Coelho, H. (2003).** Requirements Analysis of Agent-Based Simulation Platforms: State of the Art and New Prospects. En Sichman, J. S., Bousquet, F. & Davidsson, P. (Eds), *Multi-Agent-Based Simulation II: 3rd Int. Workshop, MABS02, Lecture Notes in Computer Science 2581*: 125-141: Springer.
- Marshall, A. (1879).** Water as an element of national wealth. En Pigou, A. (Eds), *Memorials of Alfred Marshall*: 134-141. New York (1956): Kelley & Millman.
- Martínez-Espiñeira, R. (2002).** Residential Water Demand in the Northwest of Spain. *Environmental and Resource Economics* **21**: 161-187.
- Martínez-Espiñeira, R. (2003a).** Estimating Water Demand under Increasing-Block Tariffs Using Aggregate Data and Proportions of Users per Block. *Environmental and Resource Economics* **26**(1): 5-23.
- Martínez-Espiñeira, R. (2003b).** Price specification issues under block tariffs: A Spanish case study. *Water Policy* **5**(3): 237-256.
- Martínez-Espiñeira, R. (2004).** An Estimation of Residential Water Demand Using Co-integration and Error Correction Techniques. *Economics Working Paper Archive at WUSTL*. <http://econwpa.wustl.edu:80/eps/othr/papers/0410/0410002.pdf>.
- Martínez-Espiñeira, R. & Nauges, C. (2004).** Is all domestic water consumption sensitive to price control? *Applied Economics* **36**(15): 1697-1703.
- Mas, A. (2004).** *Agentes software y sistemas multiagente*. Madrid, Spain: Pearson Educación.
- Mathevet, R., Bousquet, F., Le Page, C. & Antona, M. (2003a).** Agent-based simulations of interactions between duck population, farming decisions and leasing of hunting rights in the Camargue (Southern France). *Ecological Modelling* **165**(2-3): 107-126.
- Mathevet, R., Mauchamp, A., Lifran, R., Poulin, B. & Lefebvre, G. (2003b).** Territorial interaction, uses and biodiversity dynamics within the wetlands of the rhone river delta: A multi agent modelling approach [Interactions territoriales, dynamique des usages et de la biodiversite? dans les zones humides du delta du Rho?ne: Une approche par la modelisation multi-agents]. *Bulletin d'Association de Geographes Francais* **2003**(4): 417-429.
- McFadzean, D. & Tesfatsion, L. (1999).** A C++ Platform for the Evolution of Trade Networks. *ISU Economic Report* N° 39. <http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/platroot.ps>.
- Meade, N. & Islam, T. (2006).** Modelling and forecasting the diffusion of innovation - A 25-year review. *International Journal of Forecasting* **22**(3): 519-545.
- MIMAM (2000).** *Libro blanco del agua en España*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente.
- Minar, N., Burkhart, R., Langton, C. & Askenazi, M. (1996).** The Swarm Simulation System: A Toolkit for Building Multi-Agent Simulations. *Santa Fe Institute Working Paper* **96-06-042**.

- Möhring, M. (1996).** Social Science Multilevel Simulation with MIMOSE. En Troitzsch, K., Mueller, U., Gilbert, N. & Doran, J. (Eds), *Social Science Microsimulation*: 123-137. Berlin: Springer-Verlag.
- Moreno, A. (2005).** Aplicaciones en Medicina. En Mas, A. (Eds), *Agentes Software y Sistemas Multi-Agente. Conceptos, Arquitecturas y Aplicaciones*: 203-220. Madrid, Spain: Pearson Educación.
- Moss, S. (1995).** Control Metaphors in the Modelling of Economic Learning and Decision-Making Behavior. *Computational Economics* **8**(4): 283-301.
- Moss, S. (1998).** Critical Incident Management: An Empirically Derived Computational Model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **1**(4). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/1/4/1.html>.
- Moss, S. (2000).** Canonical Tasks, Environments and Models for Social Simulation. *Computational & Mathematical Organization Theory* **6**(3): 249-275.
- Moss, S. (2001).** Game theory: Limitations and an alternative. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **4**(2). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/2/2.html>.
- Moss, S. (2002b).** Agent Based Modelling for Integrated Assessment. *Integrated Assessment* **3**(1): 63-77.
- Moss, S. (2002a).** Policy analysis from first principles. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **99**: 7267-7274.
- Moss, S. & Davidsson, P. (2001).** *Multi-Agent-Based Simulation, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1979*. Boston, MA, USA: Springer-Verlag.
- Moss, S. & Edmonds, B. (2005).** Sociology and Simulation: - Statistical and Qualitative Cross-Validation. *American Journal of Sociology* **110**(4): 1095-1131.
- Moss, S., Edmonds, B. & Wallis, S. (1997).** Validation and Verification of Computational Models with Multiple Cognitive Agents. *Centre for Policy Modelling Report No.:* **97-25**. <http://cfpm.org/cpmrep25.html>.
- Moss, S., Gaylard, H., Wallis, S. & Edmonds, B. (1998).** SDML: A Multi-Agent Language For Organizational Modelling. *Computational & Mathematical Organization Theory* **4**(1): 43-63.
- Mukhopadhyay, A., Akber, A. & Al-Awadi, E. (2001).** Analysis of freshwater consumption patterns in the private residences of Kuwait. *Urban Water* **3**(1-2): 53-62.
- Musselman, K. J. (1994).** Guidelines for Simulation Project Success. En Tew, J. D., Manivannan, M. S., Sadowski, D. A. & Seila, A. F. (Eds), *Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference*: 88-95. New York: Association for Computing Machinery.
- Nagel, K. & Rasmussen, S. (1994).** Traffic at the edge of chaos. En Brooks, R. A. & Maes, P. (Eds), *Artificial Life IV*: 222-235. Cambridge, MA: MIT Press.
- Nauges, C. & Thomas, A. (2003).** Long-run study of residential water consumption. *Environmental and Resource Economics* **26**(1): 25-43.
- Nauges, C. & Thomas, A. (2000).** Privately operated water utilities, municipal price negotiation, and estimation of residential water demand: The case of France. *Land Economics* **76**(1): 68-85.
- Negroponte, N. (1995).** *Being Digital*. London, UK: Hodder and Stoughton.
- Newman, M. E. J. (2003).** The structure and function of complex networks. *SIAM Review* **45**(2): 167-256.

- Nieswiadomy, M. L. & Molina, D. J. (1991).** A note on price perception in water demand models. *Land Economics* **67**(3): 352-359.
- Nieswiadomy, M. L. & Molina, D. J. (1989).** Comparing Residential Water Estimates Under Decreasing and Increasing Block Rates Using Household Data. *Land Economics* **65**(3): 280-289.
- Niu, S. (2002).** A Stochastic Formulation of the Bass Model of New-Product Diffusion. *Review of Marketing Science Working Papers* **1**(4).
- Nordin, J. A. (1976).** A proposed modification on Taylor's demand-supply analysis: comment. *Bell Journal of Economics* **7**(2): 719-721.
- North, M. (2005).** Agent-Based Modeling Using Agent Analyst Extension for ArcGIS. En *GeoComputation 2005*
- North, M. J., Collier, N. T. & Vos, J. R. (2006).** Experiences Creating Three Implementations of the Repast Agent Modeling Toolkit. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation* **16**(1): 1-25.
- Nute, D., Potter, W. D., Maier, F. & other authors (2004).** NED-2: An agent-based decision support system for forest ecosystem management. *Environmental Modelling and Software* **19**(9): 831-843.
- Nwana, H. S. (1996).** Software Agents: An Overview. *Knowledge Engineering Review* **11**(3): 1-40.
- O'Sullivan, D. (2001).** Exploring spatial process dynamics using irregular cellular automaton models. *Geographical Analysis* **33**(1): 1-18.
- OECD (1987).** *Pricing of Water Services*. Paris: OECD.
- OECD (1999).** *Household Water Pricing in OECD Countries*. Paris: OECD.
- Okabe, A., Boots, B. N. & Sugihara, K. (1992).** *Spatial tessellations: concepts and applications of Voronoi diagrams*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Okuyama, F. Y., Bordini, R. H. & Rocha Costa, A. C. (2005).** ELMS: An environment description language for multi-agent simulations. En Weyns, D., Parunak, H. V. D. & Michel, F. (Eds), *Proceedings of the First International Workshop on Environments for Multiagent Systems (E4MAS). Lecture Notes In Artificial Intelligence 3374*. Berlin: Springer-Verlag.
- Opitz, E. M., Langowski, J. F., Dziegielewski, B., Hanna-Somers, N. A., Willet, J. S. & Hauer, R. J. (1998).** Forecasting Urban Water Use: Models and Application. En Baumann, D. D., Boland, J. J. & Hanemann, W. M. (Eds), *Urban water demand management and planning*: 95-135. New York: McGraw-Hill.
- Ormsby, T., Napoleon, E., Burke, R., Groess, C. & Feaster, L. (2001).** *Getting to know ArcGIS desktop. Basics of ArcView, ArcEditor, and ArcInfo*. Redlands, CA: ESRI.
- Ostrom, T. (1988).** Computer simulation: the third symbol system. *Journal of Experimental Social Psychology* **24**(5): 381-392.
- Pahl-Wostl, C. (2002b).** Agent Based Simulation in Integrated Assessment and Resources Management. *Proceedings iEMSs 2002 Integrated Assessment and Decision Support 2*: 239-245
- Pahl-Wostl, C. (2002a).** Towards sustainability in the water sector - The importance of human actors and processes of social learning. *Aquatic Sciences* **64**(4): 394-411.

- Pahl-Wostl, C. (2007).** The implications of complexity for integrated resources management. *Environmental Modelling and Software* **22**(5): 561-569.
- Pahl-Wostl, C. & Hare, M. (2004).** Processes of social learning in integrated resources management. *Journal of Community and Applied Social Psychology* **14**(3): 193-206.
- Pajares, J. (2001).** Modelos Evolucionistas en Dinámica Industrial: un Enfoque Cognitivo. *Tesis Doctoral*. Universidad del País Vasco.
- Pajares, J., Hernández, C. & López-Paredes, A. (2004).** Modelling Learning and R&D in Innovative Environments: a Cognitive Multi-Agent Approach. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **7**(2). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/2/7.html>.
- Pajares, J., López-Paredes, A. & Hernández, C. (2003a).** Industry as an organisation of agents: Innovation and R&D management. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **6**(2). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/2/7.html>.
- Pajares, J., Pascual, J. A., Hernández, C. & López-Paredes, A. (2003b).** A behavioral, evolutionary and generative framework for modelling financial markets. *Online proceedings of The First European Social Simulation Association Conference, ESSA'03*. Groningen <http://www.uni-koblenz.de/~kgt/ESSA/ESSA1/Pajaresetal.doc>.
- Pajares, J., Pascual, J. A., Hernández, C. & López-Paredes, A. (2005).** The role of risk aversion and technical trading in the behaviour of financial markets. En Troitzsch, K. G. (Eds), *Representing Social Reality. Pre-Proceedings of the Third Conference of the European Social Simulation Association*. Koblenz
- Parés, M., Domene, E. & Saurí, D. (2004).** Gestión del Agua en la Jardinería Pública y Privada de la Región Metropolitana de Barcelona. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* **37**: 223-237.
- Parker, D. C. (2005).** Integration of Geographic Information Systems and Agent-Based Models of Land Use. En Maguire, D. J., Batty, M. & Goodchild, M. F. (Eds), *GIS, Spatial Analysis, and Modeling*: 403-422. Redlands, CA: ESRI Press.
- Parker, D. C. & Meretsky, V. (2004).** Measuring pattern outcomes in an agent-based model of edge-effect externalities using spatial metrics. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **101**(2-3): 233-250.
- Parker, M. T. (2000).** Ascape: An Agent-Based Modeling Framework in Java. En Macal, C. M. & Sallach, D. (Eds), *Proceedings of the Workshop on Agent Simulation: Applications, Models, and Tools*: 149-174. Argonne, IL: Argonne National Laboratory.
- Parker, M. T. (2001).** What is Ascape and Why Should You Care? *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **4**(1). <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/4/1/5.html>.
- Parker, P., Letcher, R., Jakeman, A. & other authors (2002).** Progress in integrated assessment and modelling. *Environmental Modelling and Software* **17**(3): 209-217.
- Parsons, S. & Wooldridge, M. J. (2002).** Game Theory and Decision Theory in Multi-Agent Systems. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* **5**(3): 243-254.
- Parunak, H. V. D. (1998a).** *Practical and Industrial Applications of Agent-Based Systems*. Industrial Technology Institute.
- Parunak, H. V. D. (1998b).** What can Agents do in Industry, and Why? An Overview of Industrially-Oriented R&D at CEC. En Klusch, M. & Weiss, G. (Eds), *Proceedings of the Second International Workshop on Cooperative Information Agents II, Learning, Mobility and Electronic Commerce for Information Discovery on the Internet, Lecture Notes in Computer Science 1435*: 1-18. Berlin: Springer-Verlag.

- Parunak, H. V. D. (2000).** A Practitioners' Review of Industrial Agent Applications. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 3(4): 389-407.
- Parunak, H. V. D., Savit, R. & Riolo, R. L. (1998).** Agent-based modeling vs. equation-based modeling: A case study and users' guide. En Sichman, J. S., Conte, R. & Gilbert, N. (Eds), *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1534*: 10-25. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Pascual, J. A. (2006).** Modelado Multiagente de Mercados Financieros: Un Enfoque Basado en el Comportamiento Individual de los Inversores. *Tesis Doctoral*. Universidad del País Valladolid.
- Pascual, J. A., Pajares, J. & López-Paredes, A. (2003).** Mercados Financieros Artificiales: un Paso más hacia la Comprensión de los Mercados Financieros Reales. En Redondo, A. & De Benito, J. J. (Eds), *Actas del V Congreso de Ingeniería de Organización*. Valladolid-Burgos: ADINGOR.
- Pascual, J. A., Pajares, J. & López-Paredes, A. (2006).** Explaining the Statistical Features of the Spanish Stock Market from the bottom-up. En Bruun, C. (Eds), *Advances in Artificial Economics. The Economy as a Complex Dynamic System. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 584*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Pavón, J. & Gómez-Sanz, J. (2003).** Agent Oriented Software Engineering with INGENIAS. En Marik, V., Müller, J. & Pechoucek, M. (Eds), *Multi-Agent Systems and Applications III, 3rd International Central and Eastern European Conference on Multi-Agent Systems, CEEMAS 2003. Lecture Notes in Artificial Intelligence 2691*: 394-403. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Pazos, J. J., Suárez, A. & Díaz, R. P. (2003).** *Teoría de Colas y Simulación de Eventos Discretos*. Madrid, Spain: Pearson Educación.
- Pedregal, B. (2004).** Estimación de la Demanda de Agua Urbana en los Planes Marco: el Caso Español a la Luz de la Experiencia del Plan Hidrológico de California. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 37: 183-204.
- Peña, D. (1994).** *Estadística, Modelos y Métodos, Modelos Lineales y Series Temporales*. Madrid: Alianza.
- Pérez López, C. (2005).** *Técnicas Estadísticas con SPSS 12. Aplicaciones al análisis de datos*. Madrid: Pearson Educación.
- Pérez Ríos, J. M. (2004).** A self-organizing network for the systems community. *Kybernetes: The International Journal of Systems & Cybernetics* 33(3): 4-590.
- Pérez Ríos, J. M. (2005).** Information and Communication Technologies for Viable Organizations. En Mulej, M. & Buchinger, E. (Eds), *WOSC- World Organisation of Systems and Cybernetics. 13th International Congress of Cybernetics and Systems And ISA- International Sociological Association, Research Committee 51 on Sociocybernetics 6th International Conference of Sociocybernetics. Vol.10.*: 45-56. Maribor, Slovenia: University of Maribor, Faculty of Economics and Business.
- Pérez Ríos, J. M. (2006).** Communication and Information Technologies to Enable Viable Organizations. *Kybernetes: The International Journal of Systems & Cybernetics* 35(7-8): 1109-1125.
- Pérez, P., Ardlie, N., Kunepong, P., Dietrich, C. & Merritt, W. S. (2002).** CATCHCROP: Modeling crop yield and water demand for integrated catchment assessment in Northern Thailand. *Environmental Modelling and Software* 17(3): 251-259.

- Pignotti, E., Edwards, P., Preece, A., Polhill, J. G. & Gotts, N. M. (2005).** Semantic support for computational land-use modelling. *5th International Symposium on Cluster Computing and the Grid (CCGRID 2005)*: 840-847. Piscataway, NJ: IEEE Press.
- Polhill, J. G. & Gotts, N. M. (2006).** A new approach to modelling frameworks. *Proceedings of the First World Congress on Social Simulation*: 50-57. Kyoto
- Polhill, J. G., Gotts, N. M. & Law, A. N. R. (2001).** Imitative versus nonimitative strategies in a land-use simulation. *Cybernetics and Systems* **32**(1-2): 285-307.
- Polhill, J. G., Izquierdo, L. R. & Gotts, N. M. (2006).** What every agent based modeller should know about floating point arithmetic. *Environmental Modelling & Software* **21**(3): 283-309.
- Portugali, J. & Benenson, I. (1995).** Artificial planning experience by means of a heuristic cell-space model: simulating international migration in the urban process. *Environment & Planning A* **27**(10): 1647-1665.
- Portugali, J. & Benenson, I. (1997).** Human agents between local and global forces in a self-organizing city. En Schweitzer, F. (Eds), *Self-organization of complex structures: From individual to collective dynamics*: 537-546. London, UK: Gordon & Breach.
- Posada, M. (2006).** Strategic Software Agents in Continuous Double Auction under Dynamic Environment. En Corchado, E., Yin, H., Botti, V. J. & Fyfe, C. (Eds), *Intelligent Data Engineering and Automated Learning - IDEAL 2006. Lecture Notes in Computer Science 4224*: 1223-1233. Berlin Heidelberg: Springer.
- Posada, M. (2005).** Análisis y diseño de la subasta doble. Una aproximación basada en agentes. *Tesis Doctoral*. Universidad del País Valladolid.
- Posada, M., Hernández, C. & López-Paredes, A. (2004).** Aprendizaje Evolutivo en la Subasta Doble Continua. Un enfoque Multiagente. *VIII Congreso de Ingeniería de Organización*: 111-120. Leganes: ADINGOR.
- Posada, M., Hernández, C. & López-Paredes, A. (2005).** Electricity and Emission Permits Auctions in Spain: an ABM Analysis. En Troitzsch, K. G. (Eds), *Representing Social Reality. Pre-Proceedings of the Third Conference of the European Social Simulation Association*. Koblenz
- Posada, M., Hernández, C. & López-Paredes, A. (2006a).** Learning in a continuous double auction market. En Mathieu, P., Beaufils, B. & Brandouy, O. (Eds), *Artificial Economics. A Symposium in Agent-based Computational Methods in Finance, Game Theory and their applications. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 564*: 41-51. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Posada, M., Hernández, C. & López-Paredes, A. (2006b).** Strategic Behaviour in Continuous Double Auction. En Bruun, C. (Eds), *Advances in Artificial Economics. The Economy as a Complex Dynamic System. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems 584*. Heidelberg: Springer.
- Posada, M. & López-Paredes, A. (2003).** *Manual de programación y simulación de SDML*. Valladolid: INSISOC.
- Rao, A. S. (1996).** AgentSpeak(L): BDI agents speak out in a logical computable language. En Van de Velde, W. & Perram, J. (Eds), *Proceedings of the Seventh Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World (MAAMAW'96), Lecture Notes in Artificial Intelligence 1038*: 42-55. London, UK: Springer-Verlag.
- Reitsma, R., Zigurs, I., Lewis, C., Wilson, V. & Sloane, A. (1996).** Experiment with simulation models in water-resources negotiations. *Journal of water resources planning and management* **122**(1): 64-70.

- Renwick, M. E. & Archibald, S. O. (1998).** Demand side management policies for residential water use: Who bears the conservation burden? *Land Economics* **74**(3): 343-359.
- Repenning, A., Ioannidou, A. & Zola, J. (2000).** AgentSheets: End-User Programmable Simulations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **3**(3).  
<http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/3/3/forum/1.html>.
- Repenning, A. & Sumner, T. (1995).** Agentsheets: A Medium for Creating Domain-Oriented Visual Languages. *IEEE Computer* **28**: 17-25.
- Resnick, M. (1995).** *Turtles, Termites, and Traffic Jams: Explorations in Massively Parallel Microworlds (Complex Adaptive Systems)*. Cambridge, US: MIT Press.
- Rico, A. M. (2004).** Sequías y abastecimiento de agua potable en España. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* **37**: 137-181.
- Ríos, D., Ríos, S. & Martín, J. (1997).** *Simulación. Métodos y Aplicaciones*. Madrid: RA-MA Editorial.
- Rogers, E. M. (1962).** *Diffusion of Innovation*. New York, NY: Free Press.
- Rotmans, J. & Dowlatabadi, H. (1997).** Integrated Assessment Modeling. En Rayner, S. & Malone, E. L. (Eds), *Human Choice and Climate Change. Vol. 3, The Tools for Policy Analysis*: 291-377. Columbus Ohio: Battle Press.
- Rowe, G., Wright, G. & Bolger, F. (1991).** Delphi: a reevaluation of research and theory. *Technological Forecasting & Social Change* **39**(3): 235-251.
- Russell, S. J. & Norvig, P. (1996).** *Inteligencia artificial: un enfoque moderno*. México: Prentice Hall Hispanoamericana.
- Sakoda, J. M. (1971).** The Checkerboard Model of Social Interaction. *Journal of Mathematical Sociology* **1**(1): 119-132.
- Salvi, R. (2002).** *The Navier-Stokes equations. Theory and numerical methods. Lecture Notes in Pure and Applied Mathematics*. New York, NY: Marcel Dekker.
- Sansores, C. & Pavón, J. (2005a).** Agent-based simulation replication: A model driven architecture approach. En Gelbukh, A. F., de Albornoz, A. & Terashima-Marín, H. (Eds), *MICAI 2005: Advances in Artificial Intelligence, 4th Mexican International Conference on Artificial Intelligence, Monterrey, Mexico, November 14-18, 2005, Proceedings. Lecture Notes in Computer Science 3789*, 3789 LNAI edn: 244-253. Berlin Heidelberg: Springer.
- Sansores, C., Pavón, J. & Gómez-Sanz, J. (2006).** Visual modeling for complex agent-based simulation systems. En Sichman, J. S. & Antunes, L. (Eds), *Multi-Agent-Based Simulation VI, International Workshop, MABS 2005, Utrecht, The Netherlands, July 25, 2005, Revised and Invited Papers. Lecture Notes in Computer Science 3891*, 3891 LNAI edn: 174-189. Berlin Heidelberg: Springer.
- Sansores, C. & Pavón, J. (2005b).** Simulación Social Basada en Agentes. *Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial* **9**(25): 71-78.
- Santos, J. I., del Olmo, R. & Pajares, J. (2005).** Fenómenos de difusión de conocimiento y dimensión geográfica de la innovación, una aproximación multi-agente. *IX Congreso de Ingeniería de Organización*. Oviedo: ADINGOR.
- Santos, J. I., Galán, J. M. & del Olmo, R. (2006).** An Agent-Based Model of Personal Web Communities. En Corchado, E., Yin, H., Botti, V. J. & Fyfe, C. (Eds), *Intelligent Data Engineering and Automated Learning - IDEAL 2006. Lecture Notes in Computer Science 4224*: 1242-1249. Berlin Heidelberg: Springer.

- Sanz, P., Benito, J. J., Arauzo, J. A. & del Olmo, R. (2004a).** CIM y Empresa Virtual: la integración como forma de supervivencia. *Actas del VIII Congreso de Ingeniería de Organización*: 183-192. Leganés: ADINGOR.
- Sanz, P., De Benito, J. J., Arauzo, J. A. & del Olmo, R. (2004b).** An agent-based framework for selection of partners modelling in a virtual enterprise. *Decision and Simulation in Engineering and Management Science - International Conference on Modelling and Simulation, ICMS'04*: 177-178
- Sargent, R. G. (2003).** Verification and Validation of Simulation Models. En Chick, S., Sánchez, P. J., Ferrin, D. & Morrice, D. J. (Eds), *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*: 37-48. Piscataway, NJ: IEEE.
- Saurí, D. (2003).** Lights and Shadows of Urban Water Demand Management. The case of the Metropolitan Region of Barcelona. *European Planning Studies* **11**(3): 233-247.
- Saurí, D., Lopez, A., Galán, J. M., Capellades, M. & Rivera, M. (2003).** Aproximación a la Demanda Doméstica de Agua Mediante Modelos Multiagente. El Caso de la Región Metropolitana de Barcelona. *Ingeniería Civil* **131**: 147-151.
- Schefter, J. E. & Davis, E. L. (1985).** Estimating residential water demand under multi-tariffs using aggregate data. *Land Economics* **61**(3): 272-280.
- Schelling, T. C. (1978).** *Micromotives and macrobehavior*. New York: Norton.
- Schelling, T. C. (1971).** Dynamic Models of Segregation. *Journal of Mathematical Sociology* **1**(1): 147-186.
- Shannon, R. E. (1998).** Introduction to The Art And Science of Simulation. En Medeirso, D. J., Watson, E. F., Carson, J. S. & Manivannan, M. S. (Eds), *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*: 7-14. Washington, DC
- SHELL (2003).** *Scenarios: An Explorer's Guide*. London, UK: Global Business Environment Shell International.
- Simon, H. A. (1982).** *Models of bounded rationality*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Speare, A. (1974).** Residential satisfaction as an intervening variable in residential mobility. *Demography* **11**: 173-188.
- Stanley, H. E., Andrade, J., Havlin, S., Makse, H. A. & Suki, B. (1999).** Percolation phenomena: a broad-brush introduction with some recent applications to porous media, liquid water, and city growth. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* **266**(1-4): 5-16.
- Star, J. & Estes, J. E. (1990).** *Geographic Information Systems: An Introduction*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Stefansson, B. (2000).** Simulating Economic Agents in Swarm. En Luna, F. & Stefansson, B. (Eds), *Economic Simulations in Swarm: Agent-Based Modelling and Object Oriented Programming*: 3-62. Dordrecht / Boston / London: Kluwer Academic Publisher.
- Sterman, J. (2000).** *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. Boston, MA: Irwin/McGraw-Hill.
- Strang, D. & Macy, M. W. (2001).** In search of excellence: Fads, success stories, and adaptive emulation. *American Journal of Sociology* **10**(1): 147-182.
- Suleiman, R., Troitzsch, K. G. & Gilbert, N. (2000).** *Tools and Techniques for Social Science Simulation*. Heidelberg, New York: Physica-Verlag.

- Taylor, A. J. (1983).** The Verification of Dynamic Simulation Models. *Journal of the Operational Research Society* **34**(3): 233-242.
- Taylor, L. D. (1975).** The Demand for Electricity: A Survey. *Bell Journal of Economics* **6**(1): 74-110.
- Terano, T., Deguchi, H. & Takadama, K. (2003).** *Meeting the Challenge of Social Problems via Agent-Based Simulation. Post-Proceedings of the Second International Workshop on Agent-Based Approaches in Economic and Social Complex Systems.* Tokio, Japan: Springer-Verlag.
- Terna, P. (1998).** Simulation Tools for Social Scientists: Building Agent Based Models with SWARM. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **1**(2).  
<http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/1/2/4.html>.
- Tesfatsion, L. (2003).** Agent-based computational economics: modeling economies as complex adaptive systems. *Information Sciences* **149**(4): 263-269.
- Tesfatsion, L. (2002).** Agent-based computational economics: Growing economies from the bottom up. *Artificial Life* **8**(1): 55-82.
- Tesfatsion, L. (2001).** Agent-based modeling of evolutionary economic systems. *Ieee Transactions on Evolutionary Computation* **5**(5): 437-441.
- Thornthwaite, C. W. & Mather, J. R. (1955).** *The water balance.* Centerton, NJ: Drexel Institute of Techonology-Laboratory of Climatology.
- Tobias, R. & Hofmann, C. (2004).** Evaluation of free Java-libraries for social-scientific agent based simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **7**(1).  
<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/1/6.html>.
- Torrens, P. M. & Benenson, I. (2005).** Geographic Automata Systems. *International Journal of Geographical Information Science* **19**(4): 385-412.
- Torsun, I. S. (1995).** *Foundations of Intelligent Knowledge-based Systems.* New York: Academic Press.
- Troitzsch, K. G. (1997).** Social simulation – origins, prospects, purposes. En Conte, R., Hegselmann, R. & Terna, P. (Eds), *Simulating Social Phenomena, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems* **456**: 41-54. Berlin: Springer-Verlag.
- Turner, A. and White, S. (2003).** ACT Water Strategy: Preliminary Demand Management and Least Cost Planning Assessment. Institute for Sustainable Futures for ACTEW Corporation.
- Turner, A., White, S. & Bickford, G. (2005).** The Canberra least cost planning case study. *Water Science and Technology: Water Supply* **5**(3-4): 257-263.
- Valente, T. W. (1995).** *Network Models of the Diffusion of Innovations.* Cresskill, NJ: Hampton Press Inc.
- Voronoi, G. F. (1908).** Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques, deuxième memoire, recherche sur les paralleloèdres primitifs. *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik* **134**: 198-287.
- Wagner, G. & Tulba, F. (2003).** Agent-Oriented Modeling and Agent-Based Simulation. En Giorgini, P. & Henderson-Sellers, B. (Eds), *Conceptual Modeling for Novel Application Domains, Lecture Notes in Computer Science* **2814**: 205-216. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Walker, D. C., Hill, G., Smallwood, R. H. & Southgate, J. (2004).** Agent-based computational modelling of wounded epithelial cell monolayers. *IEEE Transactions on Nanobioscience* **3**: 153-163.

- Wan, H. A., Hunter, A. & Dunne, P. (2002).** Autonomous Agent Models of Stock Markets. *Artificial Intelligence Review* 17(2): 87-128.
- Wang, Q. & Heller, M. (1996).** Hybrid Box-Jenkins and neural network forecasting of potable water demand. *Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks*: 801-807
- Wavish, P. & Graham, M. (1996).** A situated action approach to implementing characters in computer games. *International Journal of Applied Artificial Intelligence* 10(1): 53-74.
- Westervelt, J. D. (2002).** Geographic Information Systems and Agent-Based Modeling. En Gimblett, H. R. (Eds), *Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Modeling Techniques for Simulating Social and Ecological Processes*: 83-103. New York: Oxford University Press.
- White, H. (1989).** Learning in Artificial Neural Networks: A Statistical Perspective. *Neural Computation* 1: 425-464.
- White, S., Milne, G. & Riedy, C. (2004).** End use analysis: Issues and lessons. *Water Science and Technology: Water Supply* 4(3): 57-65.
- White, S., Robinson, J., Cordell, D., Jha, M. & Milne, G. (2003).** Urban Water Demand Forecasting and Demand Management: Research Needs Review and Recommendations. *Water Services Association of Australia Occasional Paper 9*.  
<http://www.isf.uts.edu.au/publications/OccasionalPaperNo9Final.pdf>
- Witten, T. A. & Sander, L. M. (1981).** Diffusion-limited aggregation, a kinetic critical phenomenon. *Phys Rev Lett* 47(19): 1400-1403.
- Wolfram, S. (2002).** *A new kind of science*. Champaign, IL: Wolfram Media.
- Wolpert, J. (1965).** Behavioral Aspects of the Decision to Migrate. *Papers and Proceedings of the Regional Science Association* 15: 159-169.
- Wooldridge, M. J. (2002).** *An Introduction to Multiagent Systems*. New York: John Wiley & Sons Ltd.
- Wooldridge, M. J. & Jennings, N. R. (1995).** Intelligent Agents: Theory and Practice. *Knowledge Engineering Review* 10(2): 115-152.
- Yeh, A. G. O. (2005).** The Integration of Case-Based Reasoning and GIS in a Planning Support System. En Maguire, D. J., Batty, M. & Goodchild, M. F. (Eds), *GIS, Spatial Analysis, and Modeling*: 289-314. Redlands, CA: ESRI Press.
- Young, H. P. (1999).** Diffusion in Social Networks. *CSED Working Paper N° 2*.  
<http://www.brook.edu/es/dynamics/papers/diffusion/default.htm>.
- Zeigler, B. P. (1976).** *Theory of modelling and simulation*. New York: Wiley.
- Zhang, J. (2004).** Residential segregation in an all-integrationist world. *Journal of Economic Behavior & Organization* 54(4): 533-550.



## ÍNDICE DE TÉRMINOS

### A

ABM. *Agent Based Modelling*  
 ABS. *Agent Based Systems*  
 ABSS. *Agent Based Social Simulation*  
*Agent Based Systems. Véase* Sistemas basados en agentes  
*Agent-based modelling. Véase* Modelado basado en agentes  
*Agent-based simulation modelling. Véase* Simulación y modelado basado en agentes  
*Agent-based social simulation. Véase* Simulación social basada en agentes  
 Agente, 78, 79, 112  
 Agente cognitivo, 112  
 Agente inteligente, 78  
 Agente reactivo, 112  
 AgentSheets, 298, 310  
 AgentSpeak, 314  
 Algoritmo de asignación de las acometidas a la manzana, 335  
 Algoritmo de asimilación desde subparcelas a parcelas, 324  
 Algoritmo de doble interpolación lineal, 188  
 Algoritmo modificado de Thornthwaite, 143  
 Alisado exponencial de Holt-Winters, 59  
 Alisado exponencial doble de Holt, 59  
 Análisis de escenarios, 71  
 Análisis discriminante, 327  
 Análisis matemático, 90  
 Antecedente, 305  
 ArcGIS, 141  
 ARIMA, 37, 62, 63, *AutoRegresive Integrated Moving Average*  
 Artefacto, 116, 117, 118  
 Artificial Stock Market, 99, 114  
 Ascape, 298, 308  
 Autómata celular, 121, 138  
 Autonomía, 78

### B

*Bottom-up*, 121

### C

Celda de Delaunay, 182  
 Celda de Voronoi, 181  
 Coarse-grained, 80  
 Coeficiente de imitación, 202  
 Coeficiente de innovación, 202  
 Computer scientist, 101, 102, 124  
 Consecuente, 305  
 Consumo, 39  
 Consumo actual de agua, 42  
 Cormas, 141, 152, 160, 299, 313, 314

### D

DAWN, 208  
 DCPs. *Residential Development Control Plans*  
 Declarativo, 107, 304  
 Deducción, 90  
 Demanda, 39  
 Demanda de consumo neto. *Véase* Demanda de suministro  
 Demanda de recursos del medio natural, 39  
 Demanda de suministro, 39  
 Demanda doméstica de agua, 40, 44, 54  
 Demanda en distribución, 39  
 Demanda en producción, 39  
 Demanda específica de agua, 42  
 Demanda urbana de agua, 40, 44, 45  
 Dependencia histórica, 99, 108  
 Desire, 299  
 Diagrama de Voronoi, 180, 181, 183, 345  
 Dinámica del modelo, 110  
 DLA. Diffusion-Limited Aggregation

### E

*Emergencia*, 93  
*Emergencia de segundo orden*, 93  
 Endorsement, 143, 194, 195  
 Entorno, 110, 111, 112  
 Entorno centralizado, 111  
 Entorno distribuido, 111  
 Entorno híbrido, 111  
 Envolverte convexa, 180, 182  
 Equivalencia distribucional, 115  
 Equivalencia relacional, 116  
 Error, 116, 117  
 Estacionalidad, 344  
 Estado de un sistema, 283  
 Estado evolutivamente estable, 100  
 Etiquetado energético, 48, 49  
 Evapotranspiración, 39  
 Extendibilidad, 107

### F

*Fine-grained*, 80  
 FIRMA. *Freshwater Integrated Resource Management with Agents*  
 FIRMABAR, 144, 145, 207, 299  
 Formalización matemática, 88

### G

*Garantía anual*, 42  
 GAS, 141, *Geographic Automata System*  
 GeoGraph, 301  
 Geographic Information System. *Véase* Sistema de Información Geográfico

GeoGraphs, 141  
 Gestión de la demanda, 37, 38, 44, 50, 58, 70  
 GIS. *Geographic Information System*  
 Grafo de Delaunay. Véase Triangulación de  
 Delaunay  
 Granularidad, 80

## H

Habilidad social, 78  
 Herramientas de soporte a la discusión, 129  
 Heterogeneidad, 120

## I

Identidad numérica, 115  
*Individual-based modelling*. Véase Modelado  
 basado en el individuo  
 Inducción, 89  
 Ingenias, 104, 318  
 Inicialización, 110  
 INSISOC. *INGeniería de los Sistemas SOCiales*  
*Instrumento*, 44  
 Integración, 122, 139, 140  
 Inteligencia, 77  
 Inteligencia Artificial Distribuida, 77  
 Inteligencia Artificial Paralela, 77  
 Interacción, 112  
 Intervalo, 287  
 Intramarginal, 66

## J

Java, 298

## L

Laboratorio virtual, 125  
 Lado de Voronoi, 181  
 Lenguaje natural, 87  
 LispStat, 318  
 LSD, 317

## M

Macrodiseno, 81  
 MAML, 316  
 Máquina de Turing, 106  
 MAS. *Multi-Agent Systems*  
*Mason*, 107, 298, 309, 320  
 MAS-SOC, 314  
 MDA. *ModelDriven Approach*  
*Medida*, 44  
 Método Delphi, 70  
 Microdiseno, 81  
 MIMOSE, 317  
 Modelado basado en agentes, 91, 92, 95, 96, 105  
 Modelado basado en el individuo, 96  
 Modelado computacional, 89  
 Modelado con abstracción intermedia, 101  
 Modelar, 86, 91, 284  
 Modelización, 285  
 Modeller, 101, 102, 124

*Modelo*, 284  
 Modelo CATCHMENT, 163  
 Modelo computacional, 90  
 Modelo DAWN, 149  
 Modelo de Bass, 201, 203, 204, 207  
 Modelo de Benenson, 174, 179, 183  
 Modelo de Edwards *et al.*, 192  
 Modelo de Kotz y Hiessl, 154  
 Modelo de percolación, 171  
 Modelo de Schelling-Sakoda, 100, 173  
*Modelo de simulación continua*, 287  
 Modelo de Young, 192  
 Modelo del Támesis, 142  
*Modelo discreto*, 287  
 Modelo SINUSE, 160  
 Modelos basados en agentes, 73, 130  
 Modelos causales, 64  
 Modelos de extrapolación, 59  
 Modelos de simulación, 131  
 Modelos de uso final, 37, 57, 58  
*Modelos físicos*, 284  
*Modelos mentales*, 285  
*Modelos simbólicos*, 285  
*Multi-agent based simulation*. Véase Simulación  
 basada en multi-agente  
*Multi-agent simulation*. Véase Simulación multi-  
 agente  
*Multi-Agent Systems*. Véase Sistemas Multiagente  
 Multidisciplinar, 80, 122, 123

## N

NetLogo, 312, 313

## O

*Object Oriented Programming*. Véase  
 Programación orientada a objetos  
 OOP. *Object Oriented Programming*  
*Opciones*, 44  
 OpenMap, 141  
 Organización, 112

## P

PAI. *Parallel Artificial Intelligence*  
*Parallel Artificial Intelligence*. Véase Inteligencia  
 Artificial Paralela  
*Path dependence*, 121, Véase Dependencia  
 histórica  
*Planes de Control de Desarrollo Residencial*, 51  
 Políticas del lado de la demanda, 36  
*Políticas del lado de la oferta*, 35, 36  
 PPI. *Public Irrigated Perimeters*  
 Proactividad, 79  
 Procedural, 107, 108, 307  
 Procesos de participación, 98, 123  
*Programa*, 44  
 Programa de conservación, 44  
*Programación orientada a objetos*, 80, 107, 120,  
 297  
*Programmer*, 103, 104, 124  
 Proyecto GLOWA-Danube, 165  
 PS-I (*Political Science-Identity*), 314  
 PSM. *Platform Specific Model*

**Q**

Quicksilver, 315

**R**

*Raster*, 137, 138, 141  
 Reactividad, 78  
 Redes neuronales artificiales, 38, 67  
*Regla*, 306  
*RePast*, 107, 141, 298, 301, 309, 320, *REcursive Porous Agent Simulation Toolkit*  
 Replicación, 118, 119  
 Residential development control plans. *Véase* Planes de Control de Desarrollo Residencial  
 Resolución Distribuida de Problemas, 77  
 RPG. *Role Play Game*

**S**

*SDML*, 107, 142, 304, 307, *Strictly Declarative Modelling Language*  
 SeSAM, 315  
 SIG. *Véase* Sistema de Información Geográfico  
 SIG vectorial, 137  
 Sim2Web, 316  
 SimBioSys, 317  
*Simulación*, 286  
*Simulación asíncrona*, 287  
 Simulación basada en agentes, 92, 93, 95  
 Simulación basada en multi-agente, 96  
 Simulación computacional, 89  
*Simulación de Monte Carlo*, 287  
 Simulación multi-agente, 96  
*Simulación orientada a intervalos. Véase* Simulación síncrona  
*Simulación orientada a sucesos. Véase* Simulación asíncrona  
*Simulación síncrona*, 287  
 Simulación social basada en agentes, 96, 103, 108  
 Simulación y modelado basado en agentes, 96  
*Sistema*, 283  
 Sistema de Información Geográfico, 133, 135, 301  
*Sistema Multiagente*, 80  
 Sistemas ambientales, 129  
 Sistemas basados en agentes, 77, 93  
*Sistemas continuos*, 283

Sistemas de información geográfica, 121  
*Sistemas discretos*, 283  
 Sistemas Multiagente, 77, 79, 81  
*Sistemas simbólicos*, 87  
*SmallTalk*, 298  
*Sociedad artificial*, 93  
*StarLogo*, 298, 311  
*Swarm*, 107, 298, 299, 309, 316

**T**

Tecnologías de agentes, 84  
 Tercera vía, 89  
*Thematically*, 101, 102, 124  
*Tipos de modelos*, 284  
*Top-down*, 121  
 Triangulación de Delaunay, 180, 182, 183, 184, 346

**U**

UML. *Unified Modelling Language*  
 Usabilidad, 107  
 Uso, 38  
 Uso *per cápita*, 35, 36, 55, 56  
 Utilidad, 113  
 Utilización, 38

**V**

Validación, 116, 117, 291  
 Validación conceptual del modelo, 117  
 Validación estructural, 117  
*Validación interna. Véase* Verificación  
 Validez, 107  
*Variable de estado*, 283  
 Vecindad de Moore, 180  
 Vecindad de Von Neumann, 180  
 Verificación, 116, 291  
 Vértice de Voronoi, 181  
 VSEit, 315

**X**

Xerijardinería, 51



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Algunas líneas de investigación en INSISOC (financiación mediante proyectos y contratos de investigación). En el gráfico representamos las tres líneas de aplicación de modelado basado en agentes en las que se trabaja en INSISOC junto con la línea de investigación en Dinámica de Sistemas y Cibernética Organizacional que dirige el Prof. Pérez Ríos. Pese a que no analizamos pormenorizadamente el trabajo en esta línea por no estar tan metodológicamente tan conectada con el trabajo de esta tesis doctoral, tengo una deuda con el <i>pensamiento sistémico</i> que ha servido en esta tesis para adaptar el modelo de Bass como veremos a lo largo los capítulos. ....	18
Figura 2. Estructura del documento .....	28
Figura 3. Fuente: MIMAM (2000).....	40
Figura 4. Diagrama de los principales factores de influencia en otros componentes de la demanda urbana de agua. A partir de ADB (1999).....	45
Figura 5. Diagrama de las principales relaciones de influencia en el consumo doméstico de agua. La figura no pretende ser exhaustiva, de hecho muchos de los pares causa/efecto a su vez están interrelacionados entre ellos, aunque se ha evitado explicitar esas relaciones por claridad del diagrama. Elaborado a partir de Opitz <i>et al.</i> (1998), ADB (1999), White <i>et al.</i> (2003), y Turner y White (2003).....	46
Figura 6. Etiquetado energético y de consumo de agua. La calificación A y el color verde muestran mayor ahorro del recurso respecto a otros productos equivalentes. En determinados electrodomésticos existen niveles de mayor eficiencia de ahorro A+ y A++.49	
Figura 7. Proyección <i>per cápita</i> con tendencia simple.....	56
Figura 8. Proyección <i>per cápita</i> por grupos desagregados de consumidores .....	57
Figura 9. Esquema de un modelo residencial de uso final. Fuente: White <i>et al.</i> (2004).....	58
Figura 10. Proceso iterativo de la metodología Box-Jenkins. A partir de Pérez-López (2005)....	64
Figura 11. Arquitectura clásica de una red neuronal artificial con una capa oculta.....	68
Figura 12. Desde un punto de vista de dirección de proyectos, el proceso de elaboración de escenarios consta de cuatro etapas. La etapa de investigación, la etapa de construcción de escenarios, de aplicación y de diseminación de resultados. A partir de SHELL (2003).....	72
Figura 13. Clasificación taxonómica de los agentes autónomos (Franklin & Graesser, 1997).....	79
Figura 14. Principales áreas con aportación directa en los sistemas multiagente. Fuente: elaboración propia.....	82
Figura 15. Clasificación de la investigación en MAS. A partir de Luck, McBurney y Priest (2003).....	83
Figura 16. Posibles relaciones de equilibrio entre criterios de un modelo particular (Edmonds, 2005). .....	87
Figura 17. Desarrollo histórico de las metodologías utilizadas en la simulación social (Troitzsch, 1997). .....	89
Figura 18. En el modelado basado en agentes las entidades del sistema objetivo se representan explícita e individualmente en el modelo. Los límites de las entidades en el sistema objetivo corresponden a los límites de los agentes en el modelo, y las interacciones entre las entidades corresponden a las interacciones de los agentes en el modelo. ....	92
Figura 19. Diferentes términos de la metodología de acuerdo a la diferente sofisticación de la interacción modelada por Hare y Deadman (2004).....	97
Figura 20. Diferentes fases en el proceso de diseño, implementación y uso del modelado basado en agentes. Fuente: Galán <i>et al.</i> (2006). .....	105
Figura 21. Esquema lógico del proceso de inferencia a través del marco de modelado propuesto. ....	106
Figura 22. Perspectiva general de la estructura de descripción de un modelo para su replicación. Elaborado a partir de Galán <i>et al.</i> (2003b).....	110
Figura 23. Perspectiva general de algunos de los problemas típicos de un proceso de replicación. Ver un análisis más exhaustivo en Galán <i>et al.</i> (2003a).....	119
Figura 24. Procesos de participación con stakeholders en las fases de modelado y validación. Adaptado de Pahl-Wostl (2002b). .....	123
Figura 25. Criterios de clasificación de modelos de recursos naturales en cuanto a sus objetivos y estructura. Fuente: Elaboración propia. ....	135

Figura 26. Estructura de capas y estructuras de información de un sistema de información geográfico.....	136
Figura 27. Integración de modelos con SIG. a) Integración débil, b) integración moderada, c) integración fuerte. Basado en Yeh (2005) y Brown <i>et al.</i> (2005). ....	139
Figura 28. Estructura del modelo del Támesis. Fuente: Edmonds <i>et al.</i> (2002).....	144
Figura 29. Factores con influencia en la demanda y uso del suelo acordados por la plataforma de entidades sociales .....	146
Figura 30. Estructura y dinámica general del simulador. Fuente: López-Paredes <i>et al.</i> (2005).147	
Figura 31. Diagrama del algoritmo de decisión de consumo de agua para una familia unidad de ejecución. La decisión de consumo de agua de cada familia depende esencialmente del precio del agua y del nivel de ingresos, del agua máxima demanda y de la evolución de los embalses en la región. Además, se ve afectado por el tipo de vivienda y sus tecnologías disponibles, la actitud social cuando la región está en épocas de escasez, la clase social y el tamaño de la familia. Finalmente, el consumo de agua se adapta a los hábitos locales mediante un mecanismo de imitación respecto a la vecindad más próxima (López-Paredes <i>et al.</i> , 2005).....	149
Figura 32. Arquitectura de la plataforma DAWN. Fuente: Athanasiadis y Mitkas (2005). .....	150
Figura 33. Dinámica de simulación de DAWN. Fuente: Athanasiadis <i>et al.</i> (2005).....	151
Figura 34. Representación esquemática de los agentes e interacciones del modelo de Kotz y Hiessl. Fuente: Kotz y Hiessl (2005). .....	155
Figura 35. Esquema de razonamiento de los agentes consumidores. Fuente: Kotz y Hiessl (2005). .....	156
Figura 36. Modelo UML de la relación entre la población y su entorno, el recurso agua. Fuente: Edwards <i>et al.</i> (2005).....	158
Figura 37. Entidades en interacción en el modelo SINUSE. Fuente: Feuillette <i>et al.</i> (2003).....	161
Figura 38. Diagrama de secuencia UML simplificado del modelo SINUSE. El diagrama representa los principales métodos utilizados durante el transcurso de un paso de ejecución de simulación. Fuente: Feuillette <i>et al.</i> (2003).....	162
Figura 39. Conexiones y dependencias entre los principales componentes del modelo. Cada componente puede incluir varios modelos individuales. Fuente: Barthel <i>et al.</i> (2005). ....	166
Figura 40. Fractal generado mediante el modelo DLA .....	172
Figura 41. Diferencias entre la estructura de la ciudad de Berlín en los años 1875, 1920, 1945 (imágenes de arriba) y la estructura generada por los modelos de percolación altamente correlada de Maksy (imágenes de abajo).....	173
Figura 42. Decisiones y consecuencias de los diferentes tipos de agentes en los submodelos de decisión económica y cultural de Benenson (1998). ....	177
Figura 43. La vecindad se refiere al conjunto de celdas con las que otra celda interactúa. Existen dos tipos de vecindades rectangulares clásicas, la vecindad de Von Neumann y la vecindad de Moore. En la vecindad de Von Neumann a), cada celda interactúa con sus cuatro vecinos más cercanos al norte, sur, este y oeste. En la vecindad de Moore b) también se incluyen las celdas diagonales más cercanas. La figura c) muestra una vecindad de Moore extendida. La principal diferencia topológica entre estos tipos de vecindades es la transitividad. ....	180
Figura 44. Diagrama de Voronoi y puntos generadores .....	181
Figura 45. Grafo de Delaunay del mismo conjunto de puntos generadores que la figura anterior. ....	182
Figura 46. Imagen en la que se superponen el grafo de Delaunay y el diagrama de Voronoi. La triangulación de Delaunay es el dual del diagrama del Voronoi.....	183
Figura 47. La figura muestra en verde la superficie que representa un conjunto dado de bloques de viviendas importadas de un SIG. Las líneas negras representa la triangulación asociada de Delaunay, donde los nodos son los centroides de las manzanas y los puntos generadores de la partición de Voronoi. Las celdas de Voronoi resultantes se representan con la malla roja. A pesar de que los Bloques A y B serían considerados vecinos puesto que sus celdas asociadas comparten un lado de Voronoi, si la distancia $d$ que se para sus centros es superior a un cierto umbral no se consideran vecinos. ....	184
Figura 48. Diagrama de flujo del algoritmo de selección de vivienda.....	191
Figura 49. Curva S idealizando el proceso de difusión de la innovación típico (a la derecha) y curvas reales de diferentes tasas de adopción de tecnologías a lo largo del siglo (a la izquierda). Fuente: Federal Reserve of Dallas.....	197
Figura 50. Categorías de adoptantes respecto al tiempo de adopción. ....	199

Figura 51. Niveles flujos y relaciones causales en el modelo de difusión de Bass expresado como modelo de dinámica de sistemas y su modelo matemático asociado. A partir de Borshchev y Filippov (2004).	203
Figura 52. Diagrama de estados para la adaptación del modelo de Bass como modelo basado en agentes propuesto por Borshchev y Filippov (2004).	205
Figura 53. Correspondencia entre un proceso de dinámica de sistemas y modelo de estados para modelar con agentes en el caso de una tasa proporcional al nivel. En la parte de la derecha arriba, se muestra la aproximación asíncrona del modelo, en la parte de la derecha se muestra la función de distribución con nuestra aproximación síncrona para un <i>tick</i> dado.	206
Figura 54. Ejemplo de las curvas de difusión de la innovación en la aproximación discreta para 100 agentes (a la izquierda) y 10000 agentes (a la derecha), efectividad de la transmisión externa de 0.01, una tasa de contacto de 10.0 y una fracción de adopción de 0.015. Nótese como a mayor número de agentes la aproximación continua del modelo de Bass representa más fielmente el proceso discreto implementado.	207
Figura 55. Esquema sintetizado del modelo integrado.	210
Figura 56. Evolución de la disonancia media (izquierda) y de la difusión de la tecnología (derecha) en el escenario 1 básico.	217
Figura 57. Evolución temporal del consumo de agua doméstico en el Escenario 1 básico.	218
Figura 58. Evolución temporal de la población en el Escenario 1 básico.	219
Figura 59. Mapa de los incrementos de población medidos en número de familias desde la situación inicial de la simulación a los resultados obtenidos bajo las hipótesis del Escenario 1 básico.	219
Figura 60. Mapa de consumo total por manzana (derecha) y de densidad por familia (izquierda) obtenidos en el Escenario 1 básico.	220
Figura 61. Mapa de variación de actitud social respecto a la situación inicial en el Escenario 1 básico.	221
Figura 62. Proporción de familias con comportamiento S en el Escenario 1 dependiendo del valor del parámetro $e_s$ , y bajo la hipótesis de modelo de difusión de comportamiento de Young-Edwards.	222
Figura 63. Efecto del parámetro $e_s$ sobre el consumo a lo largo de los 40 trimestres en el Escenario 1 con el modelo de difusión de comportamiento de Young-Edwards.	223
Figura 64. Proporción de familias con comportamiento S en el Escenario 1 dependiendo del valor del parámetro $e_s$ , y bajo la hipótesis de modelo de difusión de comportamiento basado en <i>endorsements</i> .	225
Figura 65. Ahorro porcentual respecto a la situación $e_s = 0.0$ en función del modelo de difusión del comportamiento y de $e_s$ .	225
Figura 66. Efecto del parámetro $e_s$ sobre el consumo a lo largo de los 40 trimestres en el Escenario 1 con el modelo de difusión de comportamiento basado en <i>endorsements</i> .	226
Figura 67. Curvas de adopción de la innovación tecnológica bajo los diferentes perfiles en el Escenario 1.	228
Figura 68. Porcentaje de ahorro en el consumo total respecto al Escenario 1 básico generado por la innovación tecnológica en el Escenario 1 bajo diferentes perfiles de velocidad de adopción.	229
Figura 69. Curvas de adopción de la innovación tecnológica en el modelo de Bass acoplado, con perfil de adopción lento, para los diferentes modelos de difusión de comportamiento y de $e_s$ en el Escenario 1.	231
Figura 70. Curvas de adopción de la innovación tecnológica en el modelo de Bass acoplado, con perfil de adopción intermedio, para los diferentes modelos de difusión de comportamiento y de $e_s$ en el Escenario 1.	232
Figura 71. Curvas de adopción de la innovación tecnológica en el modelo de Bass acoplado, con perfil de adopción rápido, para los diferentes modelos de difusión de comportamiento y de $e_s$ en el Escenario 1.	233
Figura 72. Porcentaje de ahorro en el consumo total respecto al Escenario 1 básico, generado por la innovación tecnológica en el modelo de Bass acoplado con perfil de adopción lento, en el Escenario 1 y bajo diferentes modelos de difusión de comportamiento y valores de $e_s$ .	234
Figura 73. Porcentaje de ahorro en el consumo total respecto al Escenario 1 básico, generado por la innovación tecnológica en el modelo de Bass acoplado con perfil de adopción	

intermedio, en el Escenario 1 y bajo diferentes modelos de difusión de comportamiento y valores de $e_s$ .....	234
Figura 74. Porcentaje de ahorro en el consumo total respecto al Escenario 1 básico, generado por la innovación tecnológica en el modelo de Bass acoplado con perfil de adopción rápido, en el Escenario 1 y bajo diferentes modelos de difusión de comportamiento y valores de $e_s$ .....	235
Figura 75. Curvas de adopción tecnológica en el Escenario 1. ....	236
Figura 76. Ahorro sobre el Escenario básico 1. ....	236
Figura 77. Evolución temporal del consumo de agua doméstico en el Escenario 2 básico.....	238
Figura 78. Evolución temporal de la población en el Escenario 2 básico. ....	239
Figura 79. Mapa de una zona de Valladolid con los niveles de concentración de inmigración. ....	240
Figura 80. Mapa de los incrementos de población medidos en número de familias desde la situación inicial de la simulación a los resultados obtenidos bajo las hipótesis del Escenario 2 básico (izquierda), y de los niveles de concentración de inmigración (derecha).....	241
Figura 81. Mapa de consumo total por manzana (derecha) y de densidad por familia (izquierda) obtenidos en el Escenario 2 básico.....	241
Figura 82. Disonancia media en ambos escenarios.....	242
Figura 83. Diferencias en el crecimiento del alfoz con mayor y menor nivel de disonancia por nacionalidad. ....	243
Figura 84. Proporción de familias con comportamiento S en el Escenario 2 dependiendo del valor del parámetro $e_s$ , y bajo la hipótesis de modelo de difusión de comportamiento de Young-Edwards. ....	244
Figura 85. Efecto del parámetro $e_s$ sobre el consumo a lo largo de los 40 trimestres en el Escenario 2 con el modelo de difusión de comportamiento de Young-Edwards. ....	244
Figura 86. Proporción de familias con comportamiento S en el Escenario 2 dependiendo del valor del parámetro $e_s$ , y bajo la hipótesis de modelo de difusión de comportamiento basado en <i>endorsements</i> .....	245
Figura 87. Ahorro porcentual respecto a la situación $e_s = 0.0$ en función del modelo de difusión del comportamiento y de $e_s$ .....	246
Figura 88. Efecto del parámetro $e_s$ sobre el consumo a lo largo de los 40 trimestres en el Escenario 2 con el modelo de difusión de comportamiento basado en <i>endorsements</i> . ....	247
Figura 89. Curvas de adopción de la innovación tecnológica bajo los diferentes perfiles en el Escenario 2.....	248
Figura 90. Porcentaje de ahorro en el consumo total respecto al Escenario 2 básico generado por la innovación tecnológica en el Escenario 2 bajo diferentes perfiles de velocidad de adopción.....	248
Figura 91. Porcentaje de ahorro en el consumo total respecto al Escenario 1 básico generado por la innovación tecnológica en el Escenario 2 bajo diferentes perfiles de velocidad de adopción.....	249
Figura 92. Curvas de adopción tecnológica en el Escenario 2. ....	250
Figura 93. Consumo frente el Escenario básico 2. ....	251
Figura 94. Consumo frente el Escenario básico 1. ....	251
Figura 95. Variación del número de adoptantes en función de la probabilidad adicional por comportamiento S. ....	252
Figura 96. Evolución temporal del consumo de agua doméstico en el Escenario 2 con aumento de viviendas de tipo 3 en el alfoz.....	253
Figura 97. Consumo frente el Escenario básico 2. ....	253
Figura 98. Mapa representando el incremento poblacional del Escenario 3 básico respecto al Escenario 1.....	256
Figura 99. Variación porcentual en consumo y población de los Escenarios 3a y 3b respecto al Escenario 1 a lo largo de la dinámica de la simulación.....	257
Figura 100. Variación porcentual promedio en consumo y población de los Escenarios 3a y 3b respecto al Escenario 1. ....	257
Figura 101. Proporción de familias con comportamiento S en el Escenario 3 dependiendo del valor del parámetro $e_s$ , y bajo la hipótesis de modelo de difusión de comportamiento de Young-Edwards. ....	258
Figura 102. Efecto del parámetro $e_s$ sobre el consumo en el Escenario 3 con el modelo de difusión de comportamiento de Young-Edwards.....	259

Figura 103. Proporción de familias con comportamiento S en el Escenario 3 dependiendo del valor del parámetro $e_s$ , y bajo la hipótesis de modelo de difusión de comportamiento basado en <i>endorsements</i> . .....	259
Figura 104. Efecto del parámetro $e_s$ sobre el consumo a lo largo de los 40 trimestres en el Escenario 3 con el modelo de difusión de comportamiento basado en <i>endorsements</i> . .....	260
Figura 105. Porcentaje de ahorro en el consumo total respecto al Escenario 3 básico, generado por la innovación tecnológica en el Escenario 3 bajo diferentes perfiles de velocidad de adopción. ....	261
Figura 106. Porcentaje de ahorro en el consumo total respecto al Escenario 1 básico generado por la innovación tecnológica en el Escenario 3 bajo diferentes perfiles de velocidad de adopción. ....	261
Figura 107. Curvas de adopción tecnológica en el Escenario 3. ....	262
Figura 108. Consumo frente el Escenario básico 1. ....	263
Figura 109. Consumo frente el Escenario básico 3a. ....	263
Figura 110. Clasificación de los modelos de simulación. ....	288
Figura 111. Proceso de recogida de datos. ....	291
Figura 112. Pasos en el desarrollo del modelado por simulación. Adaptado de Banks <i>et al.</i> (1995). ....	293
Figura 113. Estructura básica de una simulación en <i>Swarm</i> , formada por un <i>swarm</i> en el que se encapsula el modelo, el <i>modelswarm</i> , y por un <i>swarm</i> , el <i>observerswarm</i> , en un nivel mayor que lo monitoriza .....	300
Figura 114. El primer paso de en la construcción de un modelo en RePast es la definición de los estados y comportamientos de los agentes (representados como círculos) y del entorno (representado como un rectángulo) mediante la definición del método <code>buildModel()</code> . ....	302
Figura 115. El segundo paso se corresponde con la creación de las herramientas de visualización y control del modelo mediante la definición del método <code>buildDisplay()</code> . ....	303
Figura 116. La tercera etapa se corresponde con la creación del programa de invocación de eventos en el modelo mediante la definición del método <code>buildSchedule()</code> . ....	304
Figura 117. Todos los agentes y el entorno en SDML están definidos por una base de datos que define los hechos ciertos para cada uno y por una base de reglas que determina su comportamiento. ....	306
Figura 118. El motor de inferencia evalúa los antecedentes de cada regla y en caso de ser ciertos ejecuta los consecuentes modificando las bases de hechos ciertos relacionadas de los diferentes agentes de la simulación. ....	307
Figura 119. Elementos básicos de las capas de modelado y visualización en Mason (Luke <i>et al.</i> , 2005). ....	310
Figura 120. Estructura de un <i>agentsheet</i> . ....	311
Figura 121. Biblioteca de modelos de NetLogo .....	313
Figura 122. Elementos del entorno ABSS propuesto en (Sansores & Pavón, 2005b). Las herramientas de modelado y generación de código propuestas están basadas en la metodología INGENIAS (Pavón & Gómez-Sanz, 2003) y el INGENIAS Development Kit .....	319
Figura 123. Ingenias implementa el paradigma MDA para permitir la replicación en diferentes plataformas de simulación mediante un proceso de transformación a partir del diseño en un lenguaje de modelado visual de alto nivel. A la derecha se representan los principales elementos de MDA y a la izquierda los elementos correspondientes para implementar la arquitectura. Fuente: Sansores y Pavón (2005a). ....	320
Figura 124. Representación de diferentes subparcelas y atributos por subparcela. ....	325
Figura 125. Altura media ponderada de las manzanas de Valladolid. Fuente: Elaboración propia. ....	326
Figura 126. El mapa muestra la tipología de viviendas tras el proceso de clasificación. Las viviendas de tipo 0 representan pisos, las viviendas de tipo 1 a 4 representan las viviendas bajas en Valladolid, ordenadas en grupos de menor a mayor consumo. ....	335
Figura 127. Captura de parte de la zona de Valladolid con las capas de acometidas, altura de manzanas y ortofotografía 1:10000. ....	336
Figura 128. El dibujo muestra un ejemplo de asignación de dos acometidas (puntos verdes) a las unidades del modelo, las manzanas. ....	337
Figura 129. Estas fotografías muestran dos de las zonas de Valladolid de más alto consumo por persona. La fotografía de la izquierda hace referencia a la parcela 86492, el cementerio en	

---

la que hay censadas seis residentes, por lo que los consumos son altísimos; se trata claramente de un outlier. La fotografía de la derecha son las parcelas de referencia 29917 y 31901, en la zona de Santa Ana-El Peral, con unos consumos por persona incluso mayores que en la fotografía de la izquierda.....	338
<b>Figura 130.</b> La figura de la derecha muestra el mapa de manzanas de la ciudad de Valladolid, la figura de la izquierda muestra el diagrama de Delaunay de la misma región. Los nodos del gráfico de Delaunay muestran los centroides de las manzanas, los segmentos de unión la relación de vecindad de los nodos. Los segmentos de tamaño mayor a 300 metros se excluyen en términos de cómputo de vecindades (no en el dibujo).....	346
<b>Figura 131.</b> Esta figura muestra un mapa de densidades de una zona de Valladolid en cuanto al comportamiento inicial. Mayor intensidad de verde implica un porcentaje mayor de comportamiento S, mayor intensidad de azul implica un porcentaje mayor de comportamiento NS. ....	348

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla que ejemplifica los diferentes usos urbanos del agua. Fuente: Urban Water Use Characteristics in the Metropolitan Water District of Southern California, Metropolitan Water District, Planning División, 1993. ....	40
Tabla 2. Diferentes usos finales de consumos domésticos del agua para familias individuales. Fuente: Urban Water Use Characteristics in the Metropolitan Water District of Southern California, Metropolitan Water District, Planning División, 1993. ....	41
Tabla 3. Series de datos analizables para estimar su influencia en la demanda de consumo urbano de agua. A partir de (Gistau & García-Poveda, 1993; DWR, 1998). ....	43
Tabla 4. Comparación de aproximaciones de integración entre SIG y sistemas de modelado. Fuente: Westervelt (2002) y Maguire (2005). ....	140
Tabla 5. Plataforma de entidades sociales (Galán <i>et al.</i> , 2007). ....	146
Tabla 6. ....	185
Tabla 7. Parámetros utilizados para las simulaciones básicas del escenario 1. ....	216
Tabla 8. Parámetros de configuración del modelo de difusión del comportamiento basado en el mecanismo de <i>endorsement</i> . ....	223
Tabla 9. Parámetros de definición de los diferentes perfiles de adopción de una innovación tecnológica en el modelo de Bass. ....	227
Tabla 10. Parámetros de definición del perfil de velocidad de adopción del modelo de difusión de la innovación en el modelo de Bass acoplado. En cada perfil se estudia el efecto del modelo de difusión del comportamiento y de $e_s$ . ....	230
Tabla 11. Parámetros de configuración de la población inmigrante en el Escenario 2. ....	237
Tabla 12. Parámetros utilizados para las simulaciones básicas del escenario 2. ....	237
Tabla 13. Parámetros de configuración del modelo de difusión del comportamiento basado en el mecanismo de <i>endorsement</i> . ....	245
Tabla 14. Parámetros de definición de los diferentes perfiles de adopción de una innovación tecnológica en el modelo de Bass. ....	247
Tabla 15. Parámetros de definición del perfil de velocidad de adopción del modelo de difusión de la innovación en el modelo de Bass acoplado. En cada perfil se estudia el efecto del modelo de difusión del comportamiento y de $e_s$ . ....	249
Tabla 16. Barrios con determinación de precios de la vivienda exógenos al modelo de actualización del valor de la vivienda de Benenson. ....	254
Tabla 17. Parámetros utilizados para las simulaciones básicas del escenario 3. ....	255
Tabla 18. Principales diferencias entre RePast y SDML como paradigmas de programación procedimental (o procedural) y declarativa. Fuente: Galán <i>et al.</i> (2003b). ....	307
Tabla 19. Resultado de la prueba de Box en el primer análisis. ....	328
Tabla 20. Resultados de la primera clasificación. ....	328
Tabla 21. Resumen del procesamiento para el análisis de casos. ....	329
Tabla 22. Estadísticos de grupo. ....	330
Tabla 23. Pruebas de igualdad de las medias de los grupos. ....	331
Tabla 24. Variables introducidas/eliminadas. ....	331
Tabla 25. Variables en el análisis. ....	331
Tabla 26. Variables no incluidas en el análisis. ....	332
Tabla 27. Lambda de Wilks. ....	332
Tabla 28. Autovalores. ....	332
Tabla 29. Lambda de Wilks. ....	333
Tabla 30. Coeficientes estandarizados de las funciones discriminantes canónicas. ....	333
Tabla 31. Matriz de estructura. ....	333
Tabla 32. Coeficientes de las funciones canónicas discriminante. ....	334
Tabla 33. Funciones en los centroides de los grupos. ....	334
Tabla 34. Coeficientes de la función de clasificación. ....	334
Tabla 35. Resultados de la clasificación. ....	334
Tabla 36. Tabla resumen del modelo. ....	338
Tabla 37. Tabla ANOVA. ....	339
Tabla 38. Tabla de coeficientes. ....	339
Tabla 39. Variable introducidas/eliminadas. ....	340

<b>Tabla 40. Resumen de los modelos. Los modelos 1, 2 y 3 hacen referencia a los tres modelos que se forman mediante el método de selección por pasos antes de llegar a un punto de estabilidad. El modelo 1 tiene las variables independientes de la nota a), el modelo 2 las de la nota b) y el modelo 3, el modelo finalmente seleccionado, las de la nota c). .....</b>	<b>341</b>
<b>Tabla 41. Tablas ANOVA de los tres diferentes modelos. ....</b>	<b>341</b>
<b>Tabla 42. Tabla de los coeficientes de los diferentes modelos. ....</b>	<b>342</b>
<b>Tabla 43. Descriptivos principales de los datos analizados sin el modelo de regresión. ....</b>	<b>342</b>
<b>Tabla 44. Tabla resumen con los datos de consumos medios y desviaciones típicas por tipología de vivienda y total en diferentes unidades. ....</b>	<b>342</b>
<b>Tabla 45. Variables excluidas en el método de selección por pasos. ....</b>	<b>343</b>
<b>Tabla 46. Diagnósticos de colinealidad. ....</b>	<b>344</b>
<b>Tabla 47. Tabla con el componente estacional de las casas bajas de perfil de consumo bajo. Datos tanto para el modelo aditivo como el multiplicativo. ....</b>	<b>344</b>
<b>Tabla 48. Tabla con el componente estacional de pisos y viviendas bajas de consumo medio. Datos tanto para el modelo aditivo como el multiplicativo. ....</b>	<b>345</b>
<b>Tabla 49. Tabla con el componente estacional de viviendas bajas de consumo alto. Datos tanto para el modelo aditivo como el multiplicativo. ....</b>	<b>345</b>
<b>Tabla 50. Tabla con el componente estacional de viviendas bajas de consumo muy alto. Datos tanto para el modelo aditivo como el multiplicativo. ....</b>	<b>345</b>
<b>Tabla 51. Municipios del alfoz y empresa encargas de la gestión. ....</b>	<b>348</b>
<b>Tabla 52. Número de familias según el número de miembros que las componen. ....</b>	<b>349</b>
<b>Tabla 53. Probabilidad de existencia de familias según su número de miembros .....</b>	<b>349</b>

