

## **Modelización participativa para la evaluación integrada de la sostenibilidad de los recursos hídricos: el modelo del mundo celular y el proyecto matisse.**

J. David Tàbara\* , Bodil Elmqvist, Akgun Ilhan, Cristina Madrid, Lennart Olson, Michel Schilperoord, Pieter Valkering, Patrick Wallman and Paul Weaver

\*autor a quien debe dirigirse la correspondencia. Address: Institute of Environmental Science and Technology (IEST) Autonomous University of Barcelona, Campus UAB, 08193 Cerdanyola del Vallès (Barcelona, Catalonia). [Joandavid.tabara@uab.cat](mailto:Joandavid.tabara@uab.cat). Esta investigación es parte del proyecto europeo en curso Matisse- Tools and Methods for Integrated Sustainability Assessment, coordinado por el profesor Jan Rotmans del Instituto DRIFT de la Universidad Erasmus en Rotterdam, Holanda.

Traducido del inglés por Elena Domene

### **Resumen**

El presente trabajo describe el proceso participativo vinculado al desarrollo y la implementación del prototipo de un modelo que tiene como principal objetivo servir de soporte durante el procesos de Evaluación Integrada de la Sostenibilidad (EIS) de diferentes opciones políticas de gestión de los recursos hídricos a diferentes niveles de acción. El modelo – llamado el Modelo del Mundo Celular (MMC) – se centra en la representación del comportamiento de los agentes respecto a sus relaciones sistemáticas con el medio ambiente. Esto se consigue principalmente mediante el análisis tres aspectos. En primer lugar, se analizan los intereses, motivaciones, creencias culturales y otras condiciones estructurales que condicionan la conducta de los agentes en el usos de las reservas y flujos de agua. Segundo, mediante el estudio a diferentes escalas del impacto sobre los ecosistemas naturales y el medio ambiente en general del comportamiento de los usuarios. Por último, se realiza de forma co-evolutiva el análisis del impacto de esos cambios ambientales en el comportamiento de los agentes. El MCM utiliza una perspectiva integrada, multi-escalar y basada en agentes. Los agentes operan en un único sistema interrelacionado en el cual cada individuo o agente colectivo responde a su disponibilidad y uso de un conjunto de reservas y flujos de reglas sociales e instituciones (S), energía y recursos (E) información y

conocimiento (I), que a su vez provocan impactos y cambios (C) en el sistema socio-ecológico. Este modelo se está desarrollando conjuntamente con Grupos de Discusión como parte de un proceso de Evaluación Integrada participativa. En el proceso de participación intervienen actores reales involucrados en la gestión del agua que aportan su conocimiento sobre el comportamiento de los agentes y la posible arquitectura del modelo para incrementar su robustez social y su relevancia política. Nuestra investigación forma parte del proyecto MATISSE (Methods and Tools for Integrated Sustainability Assessment) financiado por la Unión Europea.

**Palabras clave:** Evaluación Integrada de la Sostenibilidad, modelos hídricos, participación.

## 1 Introducción

Este trabajo presenta un prototipo de modelo y proceso participativo que tiene como objetivo la mejora de la Evaluación Integrada de la Sostenibilidad (EIS) del uso de recursos naturales escasos, y en este caso, el del agua. La EIS tiene una clara voluntad de influir en la estrategia política a diferentes escalas e implica un cambio de paradigma. Su propósito es el de revelar la falta de integración de los actuales enfoques para afrontar los *problemas persistentes de insostenibilidad*. La insostenibilidad puede ser entendida como el resultado de la acumulación de efectos resultantes de soluciones previas tomadas en base a una perspectiva no sistémica, tanto en el campo político como en el científico. Las soluciones que se han dado hasta ahora a problemas persistentes crean problemas que serán mayores, y más difíciles de tratar por las instituciones sociales en próximos estadios de desarrollo. En la actualidad, las herramientas y métodos existentes para afrontar la sostenibilidad siguen habitualmente ligadas a perspectivas unidisciplinarias, siendo un ejemplo paradigmático el predominio de indicadores económicos usados para evaluar el desarrollo actual. La EIS aporta el enfoque necesario, desde un punto de vista más contextualizado que es capaz de integrar y representar diferentes criterios, ámbitos y formas de enmarcar problemas persistentes, así como de explorar posibles vías de acción individual y colectiva para la adaptación.

La investigación presentada aquí forma parte del proyecto en curso MATISSE que tiene el objetivo de desarrollar nuevos enfoques capaces de afrontar los problemas persistentes de insostenibilidad y de explorar intervenciones políticas integradas. En el MATISSE se considera que la evaluación de la sostenibilidad tiene dos vertientes: la de la aplicación de procesos y la de la exploración de procesos. Los objetivos del MATISSE abordan el desarrollo de enfoques para explorar y aplicar paradigmas alternativos que se centren en evaluar interdependencias sistémicas, consulta, participación y aprendizaje social, más que en pronosticar “impactos”. Por eso parece necesario diferenciar la EIS de la Evaluación de Impacto Estratégica o de la Evaluación de Impactos. Las principales diferencias se resumen en la Tabla 1 (Weaver & Jordan, 2006):

<b>Elementos para una comparación analítica</b>	<b>Evaluación Integrada de la Sostenibilidad</b>	<b>Evaluación de Impacto y Evaluación Ambiental Estratégica</b>
<b>Paradigma</b>	Orientado a apoyar la transición	Incremental, centrado principalmente a mantener el actual estado de las cosas.
<b>Alcance</b>	Amplio, multi-temático	Enfocado, limitado a un único tema.
<b>Orientación</b>	Hacia la búsqueda de objetivos	Sigue objetivos ya predeterminados
<b>Enfoque</b>	Holístico	Parcial (p. ej. Solo basado en evaluaciones económicas)
<b>Proceso</b>	Cíclico	Linear
<b>Escala</b>	A múltiples escalas	A una única escala
<b>Agentes implicados</b>	Tanto agentes emergentes ( <i>niche agents</i> ) como del régimen dominante	Principalmente agentes del régimen dominante
<b>Poder</b>	Tiene en cuenta los poderes emergentes	Sólo tiene en cuenta el poder institucionalizado.
<b>Trade-off</b>	Múltiples (A versus. B versus C versus....). Incluye múltiples valores.	Únicos (A vs. B), de uno en uno.
<b>Aprendizaje</b>	Aprendizaje social	Aprendizaje cognitivo (e.g., habilidades técnicas)
<b>Ante-Post</b>	Ex-ante; procesos que incluyen un proceso amplio para determinar el alcance la evaluación, generar visiones, generar una agenda, configurar experimentos y llevar a cabo la integración y el aprendizaje de experiencias.	Evaluación ex-post. No incluye ninguna de estas fases de la EIS
<b>Tratamiento de los impactos</b>	Como desconocidos (e.g., precaución)	Como si fueran conocidos o se pudieran conocer de antemano.

Tabla 1. Comparación de EIS con EI/ EAE (Adaptado de Weaver & Rotmans, 2005)

La EIS ha sido definida como un proceso de exploración y de aplicación en un contexto de acción particular:

La EIS es un proceso cíclico y participativo de exploración del alcance, visión, experimentación, y evaluación a través del cual se desarrolla y se aplica una interpretación compartida de la sostenibilidad en un contexto determinado y de una manera integrada, con la finalidad de explorar soluciones a problemas persistentes de desarrollo no sostenible (Weaver and Rotmans, 2005).

Desde este punto de vista, las nuevas herramientas y metodologías para la EIS se caracterizan por:

- Identificar las causas relacionales de la insostenibilidad. Este proceso implica un conocimiento profundo del comportamiento de los múltiples agentes implicados, así como del significado que para éstos tiene la sostenibilidad. Por tanto, es necesario el desarrollo de nuevas herramientas capaces de incorporar y representar diferentes perspectivas y formas de

razonamiento.

- Construir vías alternativas y escenarios capaces de explorar y evaluar las posibilidades de minimizar, modificar o erradicar los actuales condicionantes de la insostenibilidad de una forma sistémica e integradora. Estos condicionantes están relacionados con los agentes y explican sus comportamientos.
- Aumentar las posibilidades de aprendizaje social mediante el establecimiento de procesos de coproducción de conocimiento ya existentes y de su aplicación en el caso de los recursos naturales. Ésta es una función intrínseca y fundamental del desarrollo de la metodología, y la razón por la cual se han incluido los diferentes actores implicados a la hora de definir el problema en cuestión (en este caso, insostenibilidad). Las herramientas para la evaluación de la sostenibilidad deben ayudar al aprendizaje social y a la exploración de interdependencias sistémicas, bajo condiciones de incertidumbre y contingencia.
- Integrar ambos, los aspectos sociales y biofísicos que condicionan la adaptación de la sociedad a la necesidad de sostenibilidad y el conocimiento cuantitativo y cualitativo (tanto de los sistemas sociales como de los naturales) usando una perspectiva integrada y abierta. Así, nuestra herramienta se basa en el trabajo interdisciplinar, combina elementos de diferentes disciplinas (ciencias naturales y sociales) y trata de incorporar el conocimiento del comportamiento, la percepción y la manera de entender la sostenibilidad de los diferentes actores implicados. Todo esto desde los primeros estadios de la metodología y de una forma participativa.

Un supuesto clave de nuestra forma de entender la sostenibilidad y del desarrollo de nuestro modelo es que ésta se basa en la existencia de límites. Sin embargo, estos límites son relativos, no absolutos, ya que dependen de las relaciones entre el hombre y el medio. Es decir, dependen tanto de la evolución de la organización social, el conocimiento y la tecnología, como de los impedimentos puestos por los sistemas biofísicos. En relación con los últimos, nos referimos tanto al agotamiento de los recursos naturales como a la capacidad de los ecosistemas de absorber la contaminación (por debajo del umbral por el cual el ecosistema no sería capaz de ofrecer servicios ambientales a largo plazo). Una vez se han superado los límites de la disponibilidad de recursos y/o de la capacidad de regeneración de los ecosistemas se entra en una situación irreversible de falta de sostenibilidad.

El objetivo de este artículo es presentar algunos ejemplos de trabajos en curso en el desarrollo de un nuevo modelo y proceso participativo cuyo objetivo es ayudar a la Evaluación Integrada de la Sostenibilidad (EIS) de los recursos hídricos, englobada en el proyecto MATISSE. La aplicación mostrada en este artículo es solamente una parte relativamente pequeña de un proyecto de investigación todavía mayor que engloba los siguientes ámbitos: cambio de usos del suelo, agricultura, nuevas tecnologías (hidrógeno) y desmaterialización. Además, los resultados mostrados en este trabajo son susceptibles de evolucionar rápidamente a medida que se avance en el conocimiento del comportamiento individual y colectivo de los agentes, sus impactos sobre

el medio, y sucesivamente, en las consecuencias de dichos cambios en la capacidad de adaptación de los agentes.

## **2 Modelizar la sostenibilidad: evolución de los instrumentos**

Una breve revisión de la evolución de la modelización de las interacciones entre el hombre y el medio (ver Figuras, 1,2,3) revela como en las tres últimas décadas ha habido un proceso de simplificación de los elementos introducidos y representados en los modelos y un incremento de la representación del papel jugado por la sociedad (individuos, organizaciones, y otros agentes colectivos).

En lo que se refiere a la evolución de los modelos de Evaluación Integrada se puede observar un cambio de enfoque, como se plasma en Weaver and Rotmans (2005) cambiando de:

- |                              |   |                             |
|------------------------------|---|-----------------------------|
| • desde el lado de la oferta | a | desde el lado de la demanda |
| • uni-disciplinar            | a | inter-disciplinar           |
| • tecnocrático               | a | participativo               |
| • objetivo                   | a | subjetivo                   |
| • certero                    | a | incierto                    |
| • predictivo                 | a | explorativo                 |

Y al cual nosotros añadimos, como uno de los desarrollos recientes más importante, el cambio de énfasis de las herramientas de modelización de la EIS:

- h) Desde representación del cambio biofísico a la representación de la componente social.

Lo que implica un mayor reconocimiento del papel de las ciencias sociales en las ciencias ambientales y en el conocimiento de la sostenibilidad.

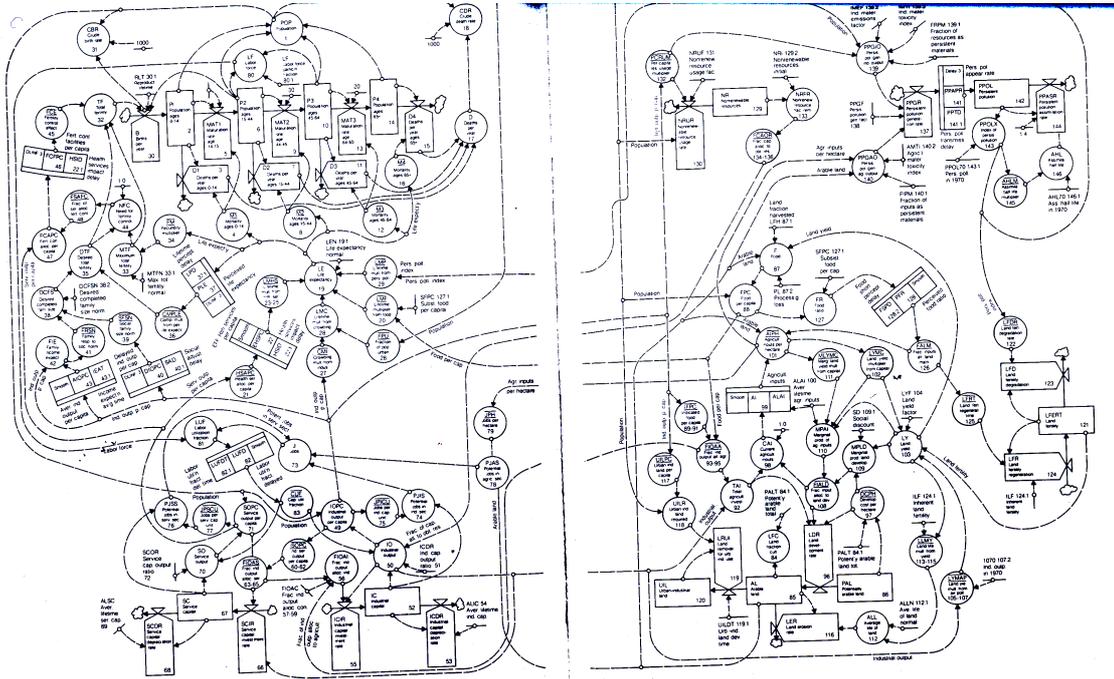


Figura 1. Conceptualizaciones tempranas de las interacciones entre los sistemas humanos y los sistemas naturales - I (procedente de D, Meadows et al. 1972)

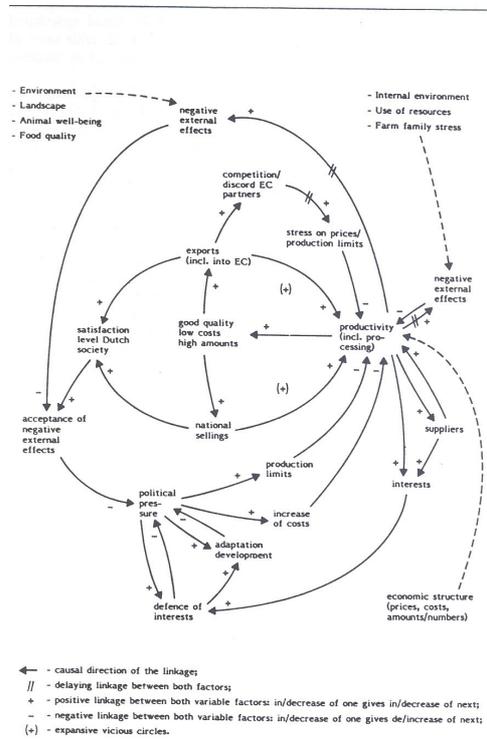
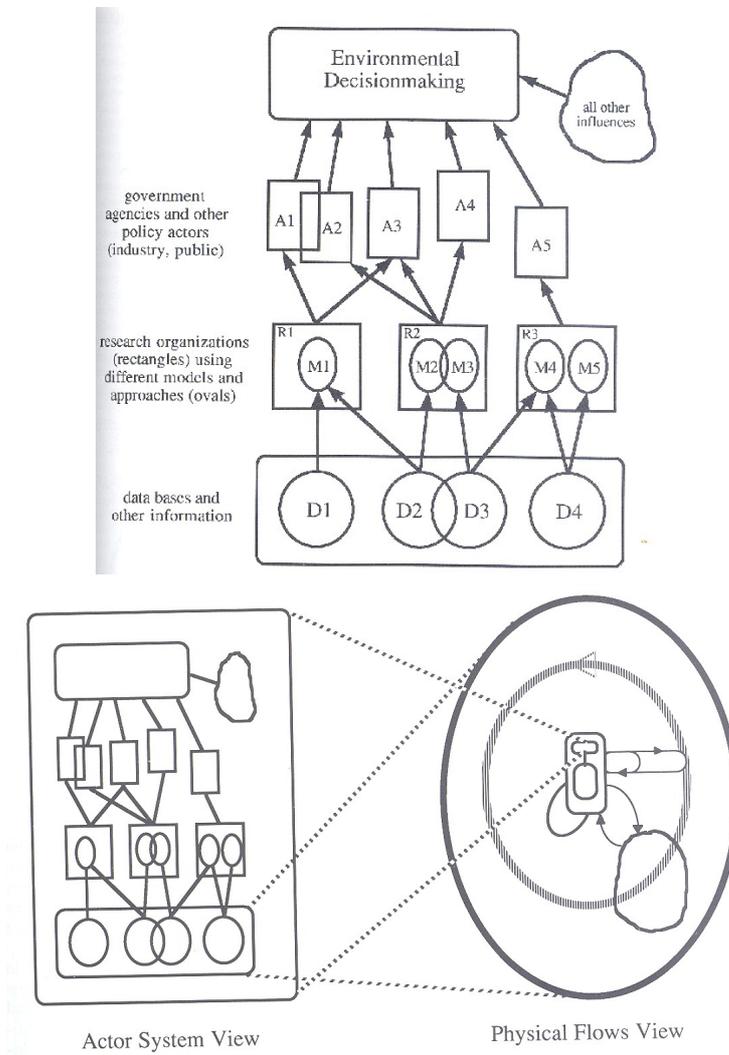


Figura 2. Conceptualizaciones tempranas de las interacciones entre los sistemas humanos y los sistemas naturales -II (procedente de Wieringa and van Soest, 1985).

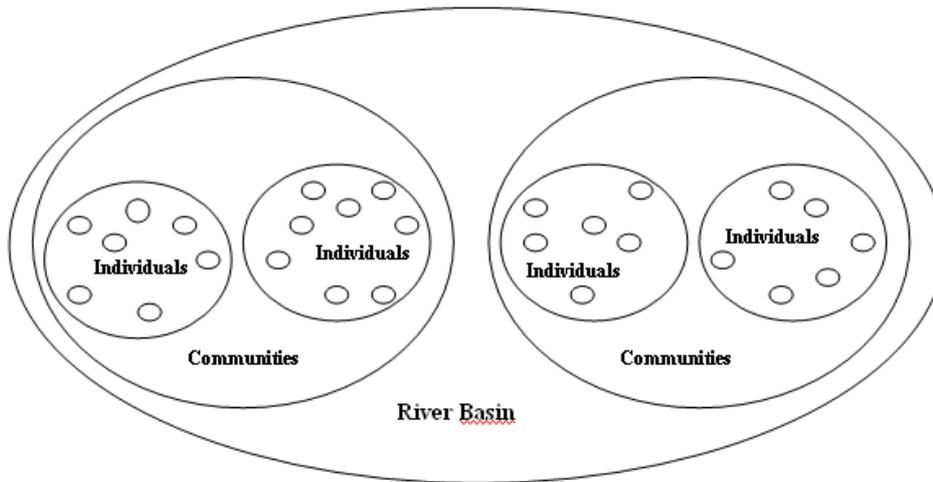


*Figura 3. Conceptualizaciones tempranas de las interacciones entre los sistemas humanos y los sistemas naturales -III (procedente de Robinson, 1991).*

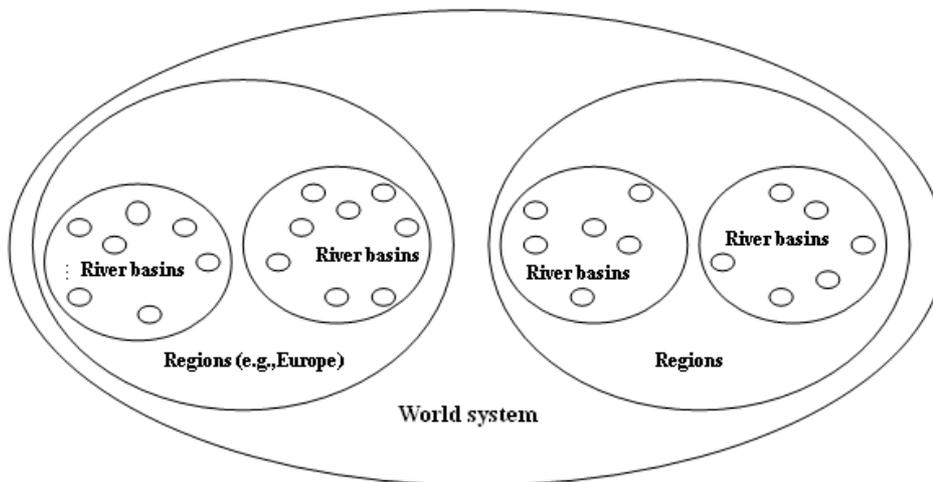
### 3. El modelo del mundo celular

Durante el desarrollo del proyecto Matisse, se ha desarrollado una nueva herramienta para la EIS de los recursos hídricos en diferentes fases, que corresponden sobretudo a la fase de *alcance* y de *visión* de la EIS. En primer lugar, hemos elaborado una serie de Grupos de Discusión de Evaluación Integrada (Kasemir et al. 2003) con una muestra de actores relevantes en la cuenca del río Ebro para conocer el comportamiento de los agentes y sus visiones, ideas de la (in)sostenibilidad en el uso de los recursos hídricos<sup>1</sup>. Hasta el momento se han realizado dos talleres, ambos en la Cuenca del río Ebro (Tàbara, 2006a, 2006b). En segundo lugar se ha construido un modelo conceptual, llamado el *Modelo del Mundo Celular (MMC)* que pretende proporcionar una perspectiva sistémica total (Boulding, 1985, Tàbara, 2005) del uso de las reservas y flujos de agua. La función del MMC es el de explorar y comunicar, desde una perspectiva teórica, desarrollos actuales y futuros plausibles del uso de los recursos hídricos empleando para ello una sencilla herramienta informática que sólo puede ser utilizada en un contexto de referencia particular – como en nuestro caso de la cuenca del río Ebro. Sin embargo, sólo algunas aplicaciones e interfaces del MMC son operativas en este momento. En tercer lugar, se ha empezado la implementación real del modelo conceptual de forma virtual junto con una interfaz susceptible de ser utilizada en marcos participativos con actores relevantes, como en los grupos de discusión. El Cuadro 1 y las Figuras 4 y 5 ofrecen un resumen del contenido conceptual del MMC:

Agents operating at river basin scale:



At a global scale:



*Figura 4. Representación basada en agentes del Modelo Mundo Celular*

### Cuadro 1: Modelo del Mundo Celular, v.1.2

- 1) El Modelo del Mundo Celular (MMC) considera el amplio sistema hídrico mundial como si solamente hubiera una única gran cuenca fluvial interconectada por flujos continuos y reservas de agua real y *virtual* (p. ej., el agua contenida en productos alimentarios).
- 2) En el MMC la estructura del sistema socio-ecológico se compone de un grupo de agentes, referidos como “células” u “órganos”, cada uno de los cuales representa individuos, comunidades, organizaciones o regiones dentro de la cuenca. El funcionamiento de cada agente depende de la disponibilidad de una reserva mínima de agua y de un flujo real o *virtual*, referido como “agua cinética”. Cada agente crea y cambia el medio ambiente y, en este sentido y desde una perspectiva co-evolutiva, se entiende que los agentes son también medioambiente. En otras palabras, desde el punto de vista de la sostenibilidad, si no hubiera agente no habría ningún sistema que sostener, por lo que los agentes conforman el principal mecanismo que une una estructura cambiante y el contenido del sistema socio-ecológico.
- 3) El comportamiento de cada agente en relación al recurso hídrico depende y se ve afectado por la disponibilidad y su uso de energía (E, por ejemplo para el transporte de agua), la normas proporcionadas por su contexto institucional y la estructura social (S), y por su conocimiento base y su grado de información (I). Sucesivamente, el uso de las reservas y flujos de agua crean, evolucionando conjuntamente, nuevos impactos sobre el resto de los agentes del sistema, en forma de nuevas condiciones de uso del agua y cambio socioambiental (C).
- 4) Tanto las reservas como los flujos de agua real y virtual usados por cada individuo o agente colectivo (célula) se pueden cuantificar y representar en términos de “tamaño” y “velocidad”, y por tanto se pueden evaluar los cambios de uso de una forma relacional e integrada.
- 5) El MCM debería permitir la evaluación de las relaciones entre las dinámicas de los flujos y las dinámicas de las reservas de agua. Por ejemplo, desde una perspectiva global, un aumento de los flujos en forma de agua real o virtual conducen a la reducción de reservas y pueden afectar también sobre la calidad del agua disponible.
- 6) Las reservas y los flujos de agua pueden dividirse a su vez en reservas y flujos sociales, económicos o ecológicos, dependiendo de sus principales funciones. La capacidad de resiliencia de los ecosistemas hídricos depende del mantenimiento de un mínimo de agua dedicado a reservas y caudales ecológicos. De forma similar, el mantenimiento de las dinámicas sociales y económicas dependen del mantenimiento de una reserva mínima y de las dinámicas de la buena calidad del agua. La calidad del agua puede ser evaluada en relación a los servicios de los agentes derivados del uso del agua.
- 7) Los Sistemas de Información Geográfica permiten representar los impactos y los cambios ambientales (C) sobre los usos del suelo de una creciente (demanda/oferta) extracción o disponibilidad de agua real o virtual en una parte del sistema (“célula”, “órganos”, o “región”) comparado con la extracción y la disponibilidad del agua virtual o real de otras partes del sistema.
- 8) Las primeras versiones del MCM se centran solamente en las reservas y los flujos de agua dulce a la escala de cuenca y de agente. Por tanto el modelo de momento no tiene en cuenta el agua marina o las aguas no usadas o que no toman parte en el funcionamiento del sistema social o no tienen relación con el sistema hídrico global.
- 9) En la versión actual del MCM (v.1.2) los agentes no se limitan a los agentes humanos sino que también se pueden modelizar fuentes no-humanas de cambio como agentes.

En el MMC los agentes están representados como un *grupo de células*, que cuentan como individuos, comunidades, cuencas hidrográficas y regiones. Las células existen en un ambiente que se caracteriza principalmente por unas reservas y unos flujos de agua real o virtual. La interacción de las células con las reservas y flujos de agua (movimiento y consumo de agua, cuantificados en términos de *tamaño* de la célula) dependen de la disponibilidad de energía, así como del tipo de instituciones e información disponible. El uso de agua y de energía de cada célula provoca nuevas presiones en el sistema global (por ejemplo, incrementando las emisiones de CO<sub>2</sub>, y por tanto cambiando el sistema global de precipitaciones). Este enfoque “celular” sugiere entender el sistema como un ser vivo. Por ejemplo, James Grier Miller (Miller and Miller 1978) defiende que los seres vivos existen en siete niveles diferentes (cada uno con una estructura y procesos determinados): células, órganos, organismos, grupos, organizaciones, sociedades y sistemas supranacionales. Otra característica de los seres vivos es la forma en que mantienen y reparan sus *estructuras*: principalmente por el uso y acumulación de materia y energía en una región y en un espacio y tiempo determinado. Las estructuras de los seres vivos están en desequilibrio y se mantienen por el uso de materiales y energía exo-somática por medio de procesos metabólicos y se organizan en relación a otros seres vivos y al ambiente en el que viven en ciclos de materia relativamente cerrados. Las estructuras cambian como parte del sistema en relación con otros seres vivos. En los niveles más altos de organización hay comportamientos diferenciados, *emergentes*, que no pueden ser descritos en los mismos términos que en sistemas de organización más simples. Los enfoques “celulares” se deben relacionar también con estudios de *Vida Artificial* y con otros campos basados en el uso de una herramienta llamada “*autómata celular*”. Éste es un modelo que consiste en un conjunto regular e infinito de células, cada una en grupo finito de estados. Cada célula tiene reglas para actualizarse que se basan en los valores del *vecindario*. Cada vez que las reglas se aplican al conjunto completo se produce una nueva *generación*.

Por tanto, el MCM reconoce la existencia de *agentes colectivos*, una noción que está relacionada de alguna manera con la de *enjambres (swarms)* en la creación de modelos. La componente fundamental para organizar los agentes en este tipo de modelos “enjambre” es precisamente un objeto llamado “enjambre” (Minar et al. 1996). Un enjambre es una colección de agentes con un mismo programa de acciones. Por ejemplo, un enjambre podría ser una colección de 10,000 individuos, 10 comunidades, 3 cuencas fluviales y una región, y un programa simple: los individuos consumiendo y transportando agua y energía y las instituciones intercambiando información. El enjambre representa un modelo entero que contiene tanto los agentes como las representaciones temporales. Además los enjambres, para y por contener a los agentes, pueden ser ellos mismos agentes. Un agente típico se ejemplifica por una serie de reglas como respuestas a determinados estímulos. Pero un agente puede también ser un enjambre, es decir, un grupo de objetos con un programa de acciones. En este caso, el comportamiento de los agentes se define por un fenómeno emergente de los agentes que forman en enjambre. Se pueden construir modelos jerárquicos enlazando múltiples enjambres. En nuestro caso, los individuos siguen y

comparten un conjunto de reglas, recursos e información comunes para todos, y no pueden tomar decisiones de la misma forma que los agentes individuales.

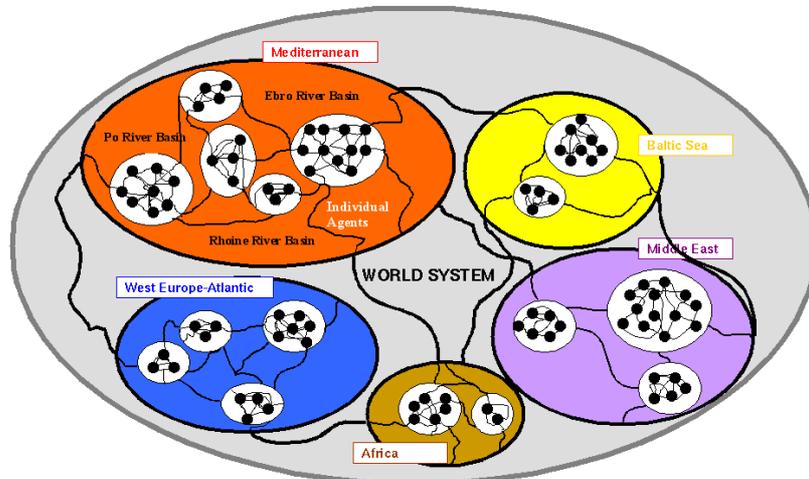


Figura 5. Representación simplificada del Modelo Mundo Celular. Una situación de insostenibilidad puede ser representada como aquel estado en que el conjunto del tamaño de los agentes que 'pueblan en mundo celular' supera la capacidad del sistema de satisfacer la demanda de crecimiento de cada uno de ellos.

donde:

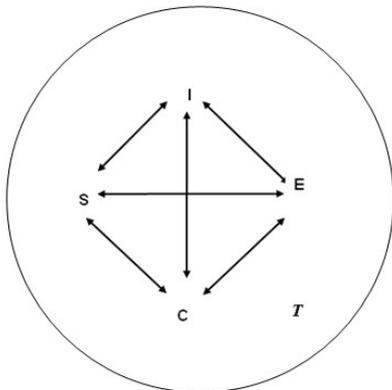


Figura 6. El submodelo SEIC

- a) **S**: Instituciones y estructura social (Sistema normativo)
- b) **E**: Energía y recursos (Sistema biofísico)
- c) **I**: Información y conocimiento (Sistema simbólico y de representación)
- d) **C**: Cambio socio-ambiental (Sistema de condiciones cambiantes en el entorno)
- e) **T**: Tamaño socioambiental del agente.

En la simulación actual del Medio Ambiente basada en agentes el concepto de enjambre se continúa utilizando, aunque a menudo no se les llama enjambres, sino simplemente se les conoce como un conjunto de modelos que se programan e interaccionan conjuntamente. De esta manera, para materializar la visión del avance de una nueva herramienta para la EIS de los recursos hídricos, hemos optado por el desarrollo de un modelo que sea capaz de representar:

- Relaciones entre cambios de comportamiento individual de los agentes y los cambios ocurridos a diferentes escalas, incluyendo el Mundo, entendido como un sistema único total.
- Dinámicas a largo plazo (por ejemplo, ofreciendo escenarios para el 2030).
- Cambios de usos del suelo, con Sistemas de Información Geográfica.

- Cambios en el “tamaño” de los agentes, y de las regiones y contextos socioambientales de acción (en nuestro primero prototipo, solamente agua y energía).
- Efectos en los cambios de velocidad del sistema en su conjunto, y la relación de la velocidad con la disponibilidad de energía (cinética) y recursos, considerando que diferentes velocidades tienen lugar en diferentes partes del sistema y a diferentes niveles.
- Relaciones entre la escala y la irreversibilidad.
- Efectos de los flujos de energía y de materia en la evolución de diferentes unidades de análisis como individuos, comunidades, cuencas fluviales, regiones y el Sistema Mundial, incluyéndose aquí también la relación entre consumo de agua y disponibilidad de energía.
- Los costes energéticos de la calidad del agua y de la cuenca fluvial (por ejemplo, los costes energéticos de la resistencia al cambio).
- Las compensaciones y efectos entre las respuestas a problemas persistentes y las causas de nuevos problemas persistentes a escalas diferentes. Para el caso del agua, hay compensaciones evidentes entre los efectos locales positivos a corto plazo sobre la calidad del agua y los efectos globales negativos a largo plazo sobre el cambio climático (por ejemplo, mediante la emisión de gases de efecto invernadero como resultado del funcionamiento de las plantas de tratamiento de agua).

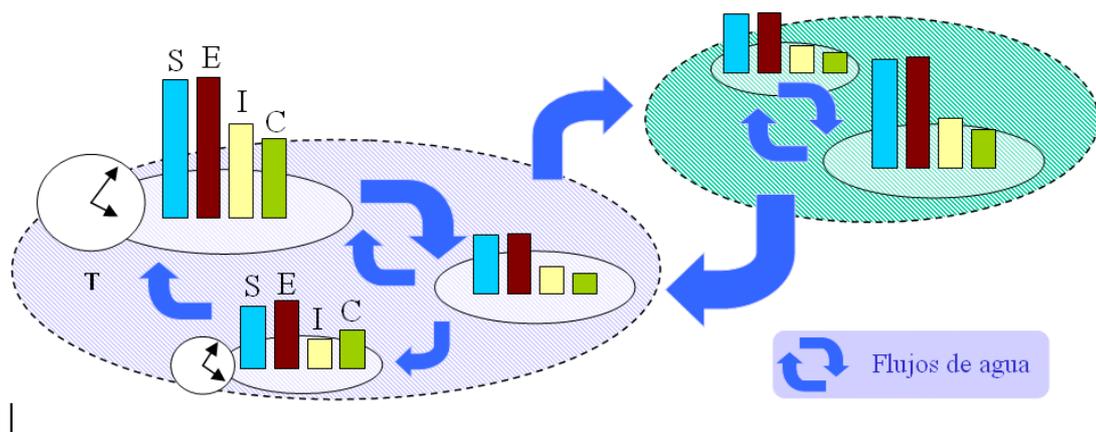
#### **4 El comportamiento de los agentes y la sostenibilidad: una perspectiva sistémica**

Como ya se ha dicho, El MMC toma una perspectiva sistémica multi-escalar basada en agentes, en la que cada individuo o agente colectivo responde a la disponibilidad y uso de un conjunto de reservas y flujos de normas e instituciones (S), recursos y energía (E), información y conocimientos (I), que a su vez provoca cambios socio-ambientales (C) o impactos en el sistema socio-ecológico. A esto le hemos llamado el modelo SEIC (Tàbara, 2003) que proviene de la sociología ambiental, y pretende entender el comportamiento de los agentes en relación a otros agentes así como con el medio ambiente como un todo<sup>2</sup>.

Por ejemplo, para evaluar la sostenibilidad de un determinado desarrollo, se puede utilizar la siguiente ecuación, simplemente como una herramienta interpretativa: Sust  $S \Rightarrow f(S, E, I, C)$ . Por ejemplo, se podría responder la siguiente pregunta: ¿hasta qué punto un desarrollo tecnológico, social o institucional determinado (S) contribuye a la reducción del consumo de materiales y de energía (E), a la optimización del conocimiento base (I) y a la reducción de las consecuencias negativas del cambio socio-ambiental (C)? En el caso del agua la pregunta podría ser la de qué tipo de normas sociales, leyes o nuevos regímenes institucionales (S) se necesitan para que el actual uso de sistemas de información (I), como los precios de mercado, pueden ser optimizados para que el uso de agua y energía (E), y la contaminación (C) derivados de ese consumo, puedan ser reducidos. Evidentemente, y debido a la naturaleza compleja, cualitativa y contextual de la sostenibilidad; no hay preguntas que se puedan responder con una sola cifra numérica sino que necesitan de una interpretación cualitativa en profundidad de las dinámicas de

cada sistema. Esas preguntas y el significado concreto de los diferentes componentes de las dimensiones del SEIC han de ser específicas para cada contexto de aplicación y se han de responder mediante la participación.

Para explorar la evolución del comportamiento de los agentes que operan en diferentes escalas respecto al uso de reservas y flujos de agua, el MMC y el SEIC se pueden relacionar como se presenta en la Figura 7:



- S: Instituciones y estructura social (Sistema normativo)
- E: Energía y recursos (Sistema biofísico)
- I: Información y conocimiento (Sistema simbólico y de representación)
- C: Cambio socio-ambiental (Sistema de condiciones cambiantes en el entorno)

T: Tamaño socioambiental del agente

*Figura 7. Conectando el comportamiento de los agentes (mediante el submodelo SEIC) con el sistema socioambiental (según el modelo Mundo Celular). En esta configuración, se entiende que el comportamiento de los agentes (o 'células') se explica por su tenencia de reglas e instituciones (S), está afectado por su disponibilidad de energía y recursos (E), de información y conocimiento (I) y provoca, de manera recursiva cambios en los comportamientos de los agentes y sobre el conjunto del sistema de modo persistente, co-evolutiva y generalmente irreversible*

El tamaño de las células indica el impacto sobre la cantidad total de agua por el agente, mientras que la medida de las flechas indica el tamaño de los flujos entre los diferentes agentes como resultado de: 1) reglas individuales e institucionales (S), 2) la disponibilidad y uso regular de energía y materiales (E), y por el 3) conocimiento y la información (I). Además, C representa cómo los impactos de los agentes evolucionan conjuntamente con el resto de los agentes. Este impacto se puede hacer operativo fácilmente tratándolo como el efecto de la disponibilidad de agua de otros agentes en el próximo periodo de interacción. Una situación de falta de sostenibilidad tiene lugar cuando el tamaño del conjunto de los agentes supera un umbral a partir

del cual el sistema, en nuestro caso el sistema hídrico global, no puede ofrecer sus funciones a los agentes.

## 5 Software e implementación

Como primera fase, el MMC se ha implementado con un software que describe un sistema fluvial que contiene dos sub-sistemas: el sistema físico, que describe las características hidrológicas del sistema; y el sistema de agentes, que describe el comportamiento de los agentes. El software ha sido desarrollado por el “Centre for Connected Learning and Computer-Based Modeling at the Northwestern University” (<http://ccl.northwestern.edu>) y recibe el nombre de NetLogo. NetLogo es un software genérico que tiene el potencial de combinar modelos basados en agentes, sistemas de información geográfica y modelos dinámicos de sistemas. Esto permite explorar la influencia de las interrelaciones entre el sistema físico y el sistema de agentes. El caso de la cuenca del río Ebro se describe para ilustrar el diseño del modelo (ver Guerin). También están siendo experimentados otros softwares en el MMC.

### 5.1 Modelo físico

El modelo físico representa las reservas y los flujos de agua en dos sub-cuencas: en el delta, por un lado, y aguas arriba por el otro (Figura 6). Las aportaciones de cada sub-cuenca corresponden a las procedentes del tramo de cuenca anterior y de la precipitación. Las salidas de cada sub-cuenca corresponden a agua que va a parar al tramo de cuenca superior inferior y el agua consumida por diferentes usos. Una parte importante del MMC son las aportaciones de otros sistemas y las salidas a otros sistemas, como se muestra en la Figura 8.

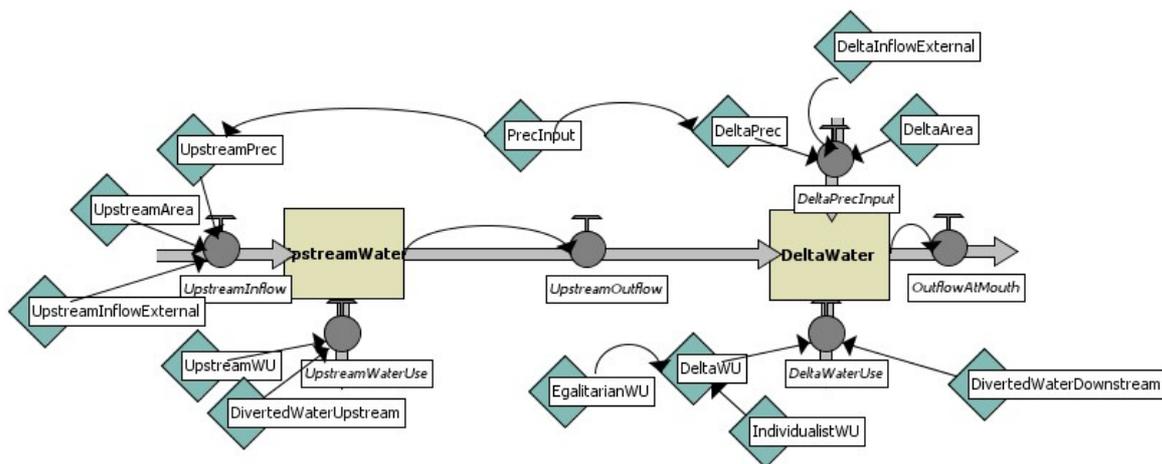


Figura 8. Una representación simplificada de la dinámica del modelo, para su parametrización cuantitativa, que representa el sistema hidrológico de la cuenca.

## 5.2 Modelo de agentes

El modelo es capaz de representar los agentes respecto a diferentes criterios, por ejemplo, en relación a factores económicos, culturales, el uso del agua y las relaciones de poder. En el ejemplo siguiente, se representan tres agentes en el modelo: compañías hidroeléctricas, ciudadanos (igualitarios e individualistas) y fuerzas políticas (Tabla 2). Las compañías hidroeléctricas se localizan aguas arriba y su comportamiento tiene efectos sobre la cantidad de agua en los embalses. Los embalses retienen agua y sedimentos, lo que tiene un efecto negativo sobre el sistema deltaico aguas abajo, que en el caso del Ebro es un parque natural.

Agente	Comportamiento	Localización geográfica
Compañías hidroeléctricas	Consumidor de agua	Tramos superiores
Ciudadanos: igualitarios	Consumidor de agua: Influencia directa	Delta
Ciudadanos: individualistas	Consumidor	Delta
Gestores políticos	Política de precios: Influencia directa	Ninguna

*Tabla 2. Agentes, comportamientos y su distribución geográfica, según un ejemplo simplificado de utilización del MMC*

Los ciudadanos, que en nuestro ejemplo residen en el delta, reflejan la concentración de la población en zonas costeras. De acuerdo con su orientación cultural, se incluyen dos tipos de agentes, los igualitarios y los individualistas. Estos perfiles tienen su origen en la teoría cultural y han sido más elaborados por Van Asselt and Rotmans y Hoekstra et al. Los individualistas consideran el recurso hídrico como un bien económico, mientras que los igualitarios entienden que la escasez del agua es un problema de demanda y fomentan la adaptación del comportamiento humano<sup>3</sup>. En este ejemplo, a los individualistas pueden influir directamente sobre el uso de agua de los igualitarios. El tercer agente es el político. Los políticos no tienen una posición geográfica y en NetLogo se les trata como observadores. Su papel es el de incrementar o aumentar la carga impositiva sobre el agua e influir directamente sobre las compañías hidroeléctricas. La influencia directa se define como un término común para impacto, presión, etc. Algunos de los supuestos son, por ejemplo, que la política de impuestos no tiene influencia sobre los igualitarios y que el agua del delta no tiene influencia sobre los individualistas (Figure 9).

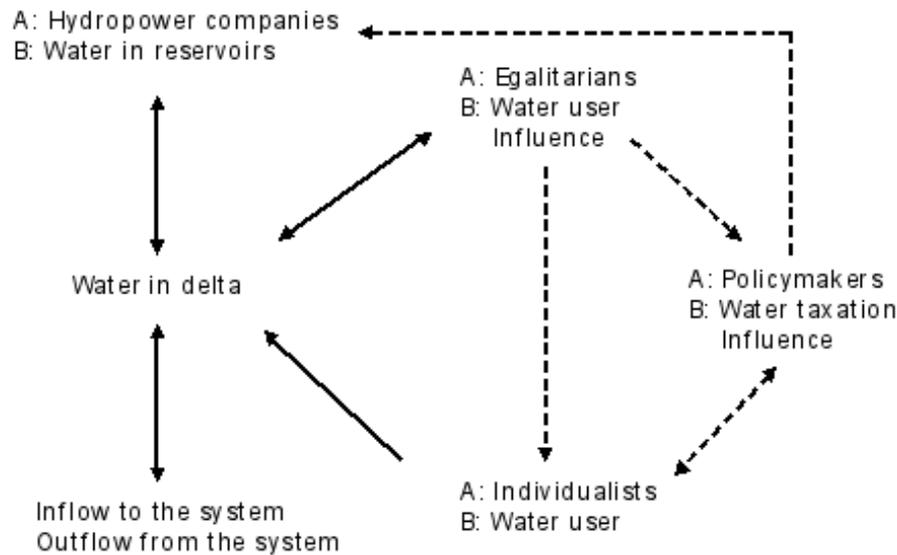


Figura 9. Representación conjunta y simplificada del sistema de agentes con el sistema biofísico. A representa los agentes, y B su comportamiento o cultura estereotipo, según la Teoría Cultural. La flechas a trazos indican influencia directa, mientras las continuas indican el flujo de agua.

### 5.3 Diseño del Modelo

La Figura 10 muestra la estructura del NetLogo. Los rectángulos representan las reservas de agua de las sub-cuencas. Los agentes están representados por símbolos con forma de persona (compañías hidroeléctricas y ciudadanos) y su tamaño representa el uso de agua que hacen. El comportamiento de los políticos se describe en el campo del observador en la parte inferior de la figura. En el NetLogo el observador supervisa el sistema en su conjunto y puede guiar a los otros agentes. Los diagramas de la izquierda muestran el uso y las reservas de agua mediante la integración del modelo de agentes y el modelo físico.

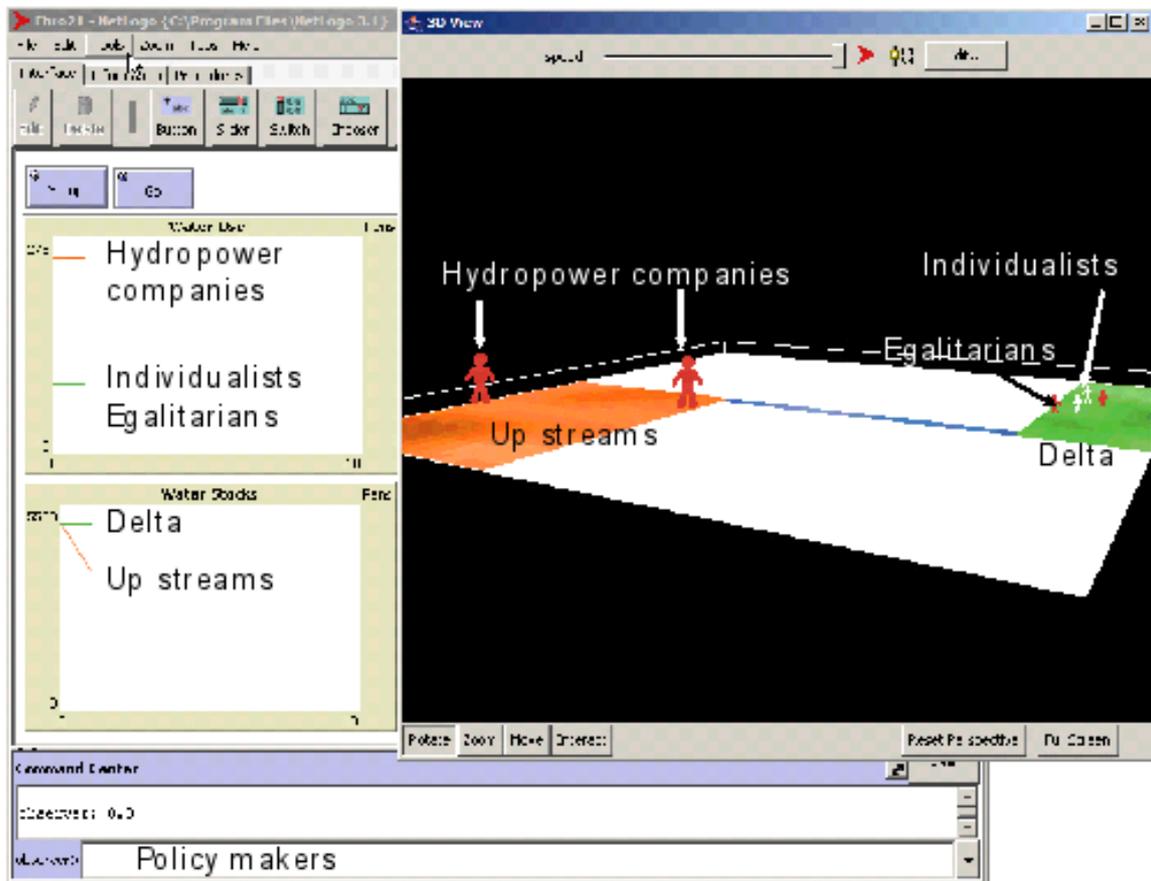


Figura 10. Representación tridimensional del Modelo del Mundo Celular con NetLogo. Los agentes cambian de tamaño según su consumo de agua. Los diagramas de la izquierda muestran los stocks de agua y su uso. Las cifras es tan tomadas de la parte de la dinámica de sistemas del modelo.

## 5.4 Escenarios

Para implementar el MMC se han usado varios escenarios. Éstos se han dividido en cuatro fases como se muestra en el Figura 11. Un aspecto importante de la EIS es el hecho de que en el futuro el uso de reservas y flujos de agua requerirán y dependerán de diferentes tipos de agentes y de otros tipos de interacciones entre ellos. El MMC se puede utilizar durante las cuatro fases de la EIS en el proceso de alcance, visión, experimentación y evaluación sobre que tipos de comportamientos o interacciones se han de dar para responder a las crecientes presiones de la insostenibilidad.

### Fase I

Tanto el agua del delta como la del curso alto del río disminuyen. Al final de la fase los agentes igualitarios del delta responden reduciendo su consumo de agua.

### Fase II

Como resultado del menor uso de agua por parte de los igualitarios en la fase I, la tasa de agotamiento del agua en el delta decrece de alguna manera, pero las reservas de agua todavía continúan disminuyendo y por tanto los políticos responden incrementando los impuestos sobre el agua. Como resultado, los individualistas reducen su consumo de agua al final de la fase II.

### Fase III

Aunque el nivel del agua en el delta deja de disminuir, éste no consigue recuperar su estado original. Por tanto, los habitantes del delta alertan a los políticos para que influyan sobre las compañías hidroeléctricas, para que disminuyan su consumo de agua.

### Fase IV

Como resultado de lo anterior, el nivel de agua empieza a aumentar.

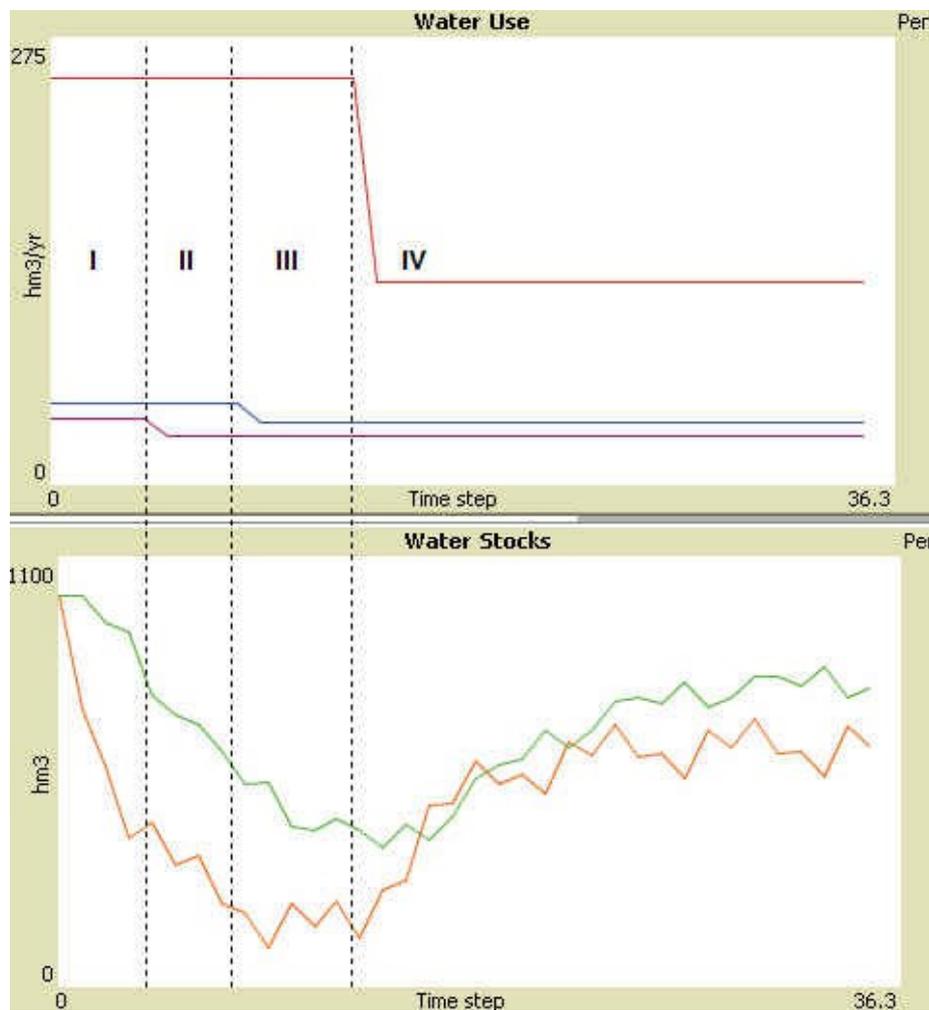


Figura 11. Representación de la dinámica en uso de los stocks de agua durante 4 fases hipotéticas I-IV. El cuadro de arriba se refiere al consumo de agua de los 4 agentes representados, mientras que el de debajo representa los stocks de agua en los distintos lugares del río (cabecera o Delta)

## 5.5 Desarrollo futuro

En un futuro se pretende desarrollar más el software:

- aumentando la complejidad en términos de comportamiento del consumidor, tamaño y velocidad de los agentes y cambio del sistema, y el papel de la información, la comunicación y el conflicto en la elaboración de reglas y cambios de régimen;
- mejorando la interfaz para conseguir una mayor correspondencia con el marco teórico del MCM;
- incluyendo una representación dinámica diferenciada del uso del agua mediante la división del uso en diferentes sectores, ej. industria, agricultura y agua urbana, que están unidos dinámicamente (incluyendo *feedbacks*) al tamaño de la industria, el uso del suelo y la población;
- Incluyendo los usos del suelo en el modelo físico. Analizando un mapa de usos del suelo utilizanso SIG se puede crear un mapa de cuadrícula. A cada cuadrícula le corresponde una fracción de usos del suelo específico (la localización geográfica de la cuadrícula no se especifica). A cada tipo de usos del suelo se le asigna su tasa de uso del suelo. Esto crea un modelo “semi-distribuido” en el cual la precisión depende de la resolución de la cuadrícula escogida.

La modelización basada en agentes (ABM) sirve para representar procesos subyacentes a fenómenos particulares, pero tiene poco potencial en la representación espacial, al contrario que los Sistemas de Información Geográfica. Éstos últimos, sin embargo, se han utilizado principalmente para la creación de modelos de interacciones bio-físicas y no han sido utilizados para incorporar el comportamiento humano o técnicas de programación orientadas al objeto (Gimblett, 2002). Por tanto, se considera que la integración de la modelización basada en agentes y de los sistemas de información geográfica tiene un gran potencial.

Por ejemplo, la dinámica de los agentes se puede representar en tres dimensiones, en tres áreas diferentes de la cuenca fluvial, para ilustrar y comunicar fácilmente los tamaños relativos de los diferentes agentes y las dinámicas con un recurso común y el medio ambiente, como se muestra en la figura 12 y 13.

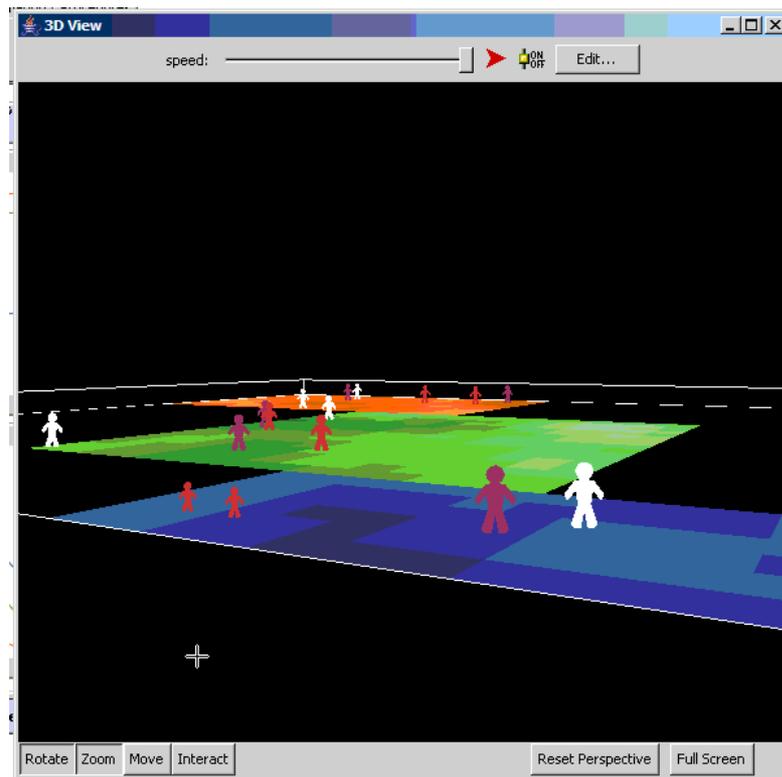


Figura 12. Representación en 3 dimensiones de los agentes del MMC según sus distintos tamaños en tres zonas de la cuenca.

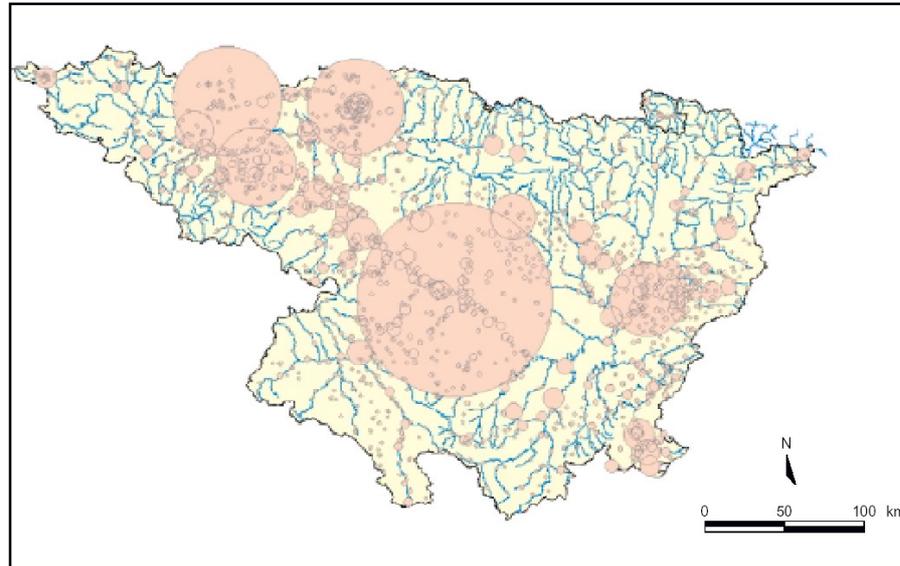


Figura 13. Las ciudades pueden entenderse como agentes situados espacialmente, cuyo tamaño también depende de su consumo de agua (imagen tomada de la CHE, 2005, donde sólo se representa el tamaño de la población).

## 6 Consideraciones finales

Los problemas persistentes de insostenibilidad son problemas relacionales, es decir, las medidas o políticas a implementar – aunque no las “soluciones”, ya que no existen soluciones en el sentido tradicional- para esos problemas también deben ser de naturaleza relacional. Los problemas de sostenibilidad no son problemas que ocurren “ahí fuera”, independientemente de nuestros comportamientos individuales, colectivos a diferentes escalas. La Evaluación Integrada de la Sostenibilidad para los programas políticos necesita proporcionar conocimiento sobre cómo cambiar de forma estructural y persistente la manera en que se relacionan los elementos más significativos de los sistemas naturales y sociales, desde la escala individual a la global. El comportamiento de la sociedad y sus efectos sobre las reservas y los flujos de recursos naturales y el medioambiente están condicionados por un conjunto de reglas que provienen de las instituciones y los regímenes sociales existentes. Por tanto, las nuevas herramientas y metodologías que intentan explorar, integrar y aplicar criterios alternativos de sostenibilidad en el diseño de programas políticos deben, en primer lugar, afrontar el tema de la componente social y estructura social derivada del comportamiento colectivo. Sin embargo, el primer paso es el de identificar y representar esas relaciones socio-ecológicas de una forma operativa e inteligible.

Para conseguirlo, se necesita una nueva manera de abordar el sistema de referencia, las intervenciones políticas presentes y futuras, así como la creación de nuevas herramientas y metodologías para hacerlo. Nuestro enfoque, basado en el modelo conceptual SEIC (Instituciones y estructura social; Energía y recursos naturales; Sistemas de Conocimiento e Información; y Cambio socio-ambiental), se ha utilizado para entender el comportamiento de los agentes respecto al uso de los recursos naturales. Este marco conceptual debería ayudar a crear visiones válidas y a construir herramientas de EIS relevantes como el MMC, capaces de ayudar al conocimiento de los cambios sociales e institucionales del dominio hídrico. Además, defendemos que nuevas herramientas para la EIS no se deberían centrar solamente en el análisis de impactos aislados de determinadas opciones políticas, sino que tendría que centrarse en explicar y aplicar paradigmas sistémicos y alternativos respecto a las relaciones humanas y ambientales. Estos paradigmas incluyen no solamente los impactos sino también las interdependencias e influencias de cambios acumulativos (por ejemplo, pérdida de sostenibilidad) tanto en los sistemas naturales como en los sociales (los agentes están entendidos como Medio Ambiente). Desde una perspectiva sistémica, los impactos de las opciones políticas son a la vez efectos y causas de cambio ambiental, que pone presiones o realiza las opciones de sostenibilidad actuales y futura, las cuales solo se pueden explorar en relación con los agentes.

En MATISSE ya se han empezado a desarrollar nuevas herramientas para apoyar a la EIS en diversos ámbitos políticos. En el caso del agua, se ha visualizado que la tarea de explorar y transformar los actuales paradigmas de la evaluación política y construcción de regímenes en el uso de recursos naturales y la de afrontar los problemas persistentes de falta de sostenibilidad necesitan integrar diferentes ámbitos y escalas de acción en la elaboración de nuevas

herramientas y métodos para el análisis de la sostenibilidad.

Nuestro objetivo es el de desarrollar herramientas sencillas que sean capaces de integrar, representar y comunicar sencillamente las interrelaciones complejas entre las instituciones sociales, las reservas y los flujos de energía y recursos, y el papel del cambio socio-ecológico co-evolutivo en las interacciones de los agentes y en su forma de adaptarse a la sostenibilidad. Para ello, y para crear conocimiento socio-ecológico robusto sobre las posibles vías y compensaciones, se deben incluir perspectivas expertas y no-expertas. Sólomente aplicando y redefiniendo dichas visiones, herramientas y métodos de una forma participativa en contextos específicos se puede conseguir avanzar en el conocimiento y en la aplicación de la EIS. Herramientas como el MMC pueden contribuir a proporcionar un marco general, un procedimiento y una visión alternativa al sistema socio-ecológico global y a sus implicaciones para las acciones y las responsabilidades de los agentes. La EIS no sólo pretende explicar cuales son las causas del cambio ambiental global y de la insostenibilidad sino de revelar quién es el responsable de ello y que implican estas responsabilidades para la transformación de los recursos actuales.

## Referencias bibliográficas

- Alcamo, J. (1998) *Global change scenarios of the 21st Century: results from the IMAGE 2.1 model*, Oxford, Pergamon.
- Boulding, K. 1985. *The world as a total system*. Beverly Hills, CA: Sage.
- Cash, D. W., C. W. Clark, F. Alcock, N. M. Dickson, N. Eckley, D. H. Guston, & J. Jäger. 2003. 'Knowledge systems for sustainable development'. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100:8086-8091.
- Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). 2005 Informe, 2005. Caracterización de la Demarcación y Registro de Zonas Protegidas (Borrador provisional de 31 de marzo. Directiva Marco del Agua, Demarcación Hidrográfica del Ebro, 2005. Ministerio de Medioambiente, Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). <http://oph.chebro.es/DOCUMENTACION/DirectivaMarco/DemarcacionDirectivaM.htm>
- Day, J. W., Maltby, E. & Ibanez, C. (2006) River basin management and delta sustainability: A commentary on the Ebro Delta and the Spanish National Hydrological Plan. *Ecological Engineering*, 26, 85-99.
- Guerin (a) Redfish group. Peeking into the Black Box: Some Art and Science to Visualizing Agent-Based Models <http://www.redfish.com/research/PeekingIntoTheBlackBox.pdf>
- Guerin (a) Redfish group. Reality Mining: Group Behavior. <http://reality.media.mit.edu/groupviz.php>
- Hare, M. 2005. *The use of Models to Support the Participatory Elements of the EU Water Framework Directive: Creating a Dialogue between Policy Makers and Model Makers*. HarmoniCA document: Seecon Deutschland GmbH & Osnabrück University. <http://www.harmoni-ca.info>
- Hare, M. 2004. *Modellers recommended Research Directions for Models to Support the Participatory Elements of the Water Framework Directive*. <http://www.harmoni-ca.info>
- Hare, M. 2003. *Policy Makers' Requirements for Models to Support the Participatory Elements of the Water Framework Directive*. HarmoniCA document. Seecon Deutschland GmbH & Osnabrück University. <http://www.harmoni-ca.info>

- Hoekstra, A. Y., Beusen, A. H. W., Hilderink, H. B. M. & Van Asselt, M. B. A. (1997) Water in crisis? IN Rotmans, J. & De Vries, B. (Eds.) *Perspectives on global change: the TARGET approach*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Kasemir, B.; Jäger, J. Jaeger, C. Gardner, M.T. (Eds). *Public Participation in Sustainability Science. A Handbook*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lambin, E. F., Geist, H. J. & Lepers, E. (2003) Dynamics of Land-Use and Land-Cover Change in Tropical Regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28, 205-41
- Lambin, E. F., Rounsevell, M. D. A. & Geist, H. J. (2000) Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 82, 321.
- Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., Coomes, O. T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P.S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E. F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P. S., Richards, J. F., Skanes, H., Steffen, W., Stone, G. D., Svedin, U., Veldkamp, T. A., Vogel, C. & Xu, J. (2001) The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11, 261-269.
- Meadows, D. H. , Meadows, D. L. , Randers, and W. W. Behrens. 1972. *The Limits to Growth*. New York. Universe.
- Miller, J. G. and Jessie L. Miller. 1978. *The Earth as a System*. University of California at Santa Barbara. <http://www.iss.org/primer/earthsys.htm>
- Minar, Nelson et al. 1996. The Swarm Simulation System: A Toolkit for Building Multi-agent Simulations. <http://www.swarm.org/images/b/bb/MinarEtA196.pdf>
- Robinson, J. B. 1991. 'Modelling the interactions between human and natural systems'. *International Social Science Journal*, 130:629-648.
- Tàbara, D. et al. 2006a. 'Stakeholder and Socioenvironmental Analysis for the Integrated Sustainability Assessment (ISA) Of The Ebro River Basin' Deliverable D2.6. MATISSE Project.
- Tàbara, D.. 2006b. 'A Comprehensive analysis of tools and methods for integrated sustainability assessment of water using common generic principles. Applying ISA methodology and creating new sustainability narratives with the World Cellular and the SEIC models in the Ebro River basin'. MATISSE project Deliverable D2.6.
- Tàbara, 2005. Nothing is outside the system. But what is the system? A systems learning reflection on the type of knowledge expected from ISA and MATISSE case studies. In: P. Weaver, J. Tàbara, J. Rotmans, A. Haxeltine, J. Jaeger. *Sustainability: a systemic synthesis from the perspective of Integrated Sustainability Assessment*. Deliverable D1.1. MATISSE project.
- Tàbara, D. 2003. 'Teoría Socioambiental y sociología ecológica'. (Socioenvironmental Theory and Ecological Sociology). Published in S. Giner, *Teoría Sociológica Moderna*. Madrid: Ariel. p.431-458.
- Thompson, M., Ellis, R. & Wildavsky, A. (1990) *Cultural theory*, Boulder, Westview press
- Van Asselt, M. B. A. & Rotmans, J. (1997) Uncertainties in perspective. IN Rotmans, J. & De Vries, B. (Eds.) *Perspectives on global change: the TARGETS approach*.
- Veblen, T. 1994 (1899). *The Theory of the Leisure Class*. New York: Dover Publications.
- Watts, A. 1970. 'The world is your body'. In R. Disch 1970. *The Ecological Conscience. Values for Survival*. New Jersey, Prentice-Hall.

- Weaver, P. and Rotmans. 2006. Integrated Sustainability Assessment: What? Why? How?. MATISSE working paper 1.
- Weaver, P. & Jordan, A. 2006. Further reflections of differences and complementarities between (S)IA and ISA: scaling, power and their treatment within sustainability assessment. MATISSE Working paper 5
- Wieringa, H. & J. P. van Soest 1985. 'De Nederlandse landbouw op een keerpunt?', *Landbouwkundig Tijdschrift*, 97 (11): 5-9. Extract translated and cited in Jan van Mansvelt 'The role of lower-input technologies in the future' in M. Whitby & J. Ollerenshaw (1987) *Land Use and the European Environment*. London: Belhaven Press, pp. 42 -53

## Notas

---

- 1 En este trabajo diferenciamos entre actores y agentes. Los primeros son aquellos individuos o grupos que tienen *intereses* en el resultado del proceso de decisión, pero que no pueden o no tienen capacidad de influir sobre él. Por su parte, los agentes tienen el poder de influir en dichos procesos de decisión. En nuestra perspectiva sistémica, los agentes son aquellas personas o grupos de personas que realmente afectan el contenido y la forma de las instituciones y de las estructuras sociales y que transforman las reservas y los flujos de recursos y del cambio ambiental de una forma co-evolutiva.
- 2 Las Ciencias Sociales y la Sociología en particular usan también conceptos y modelos de las Ciencias Naturales desde su origen. Herbert Spencer, por ejemplo, ya en libro *First Principles* (1862) buscaba las condiciones de estabilidad, cambio y diferenciación social de formas sociales "orgánicas" con la ayuda de conceptos y teorías biológicas y darwinistas. n El año 1920, la Escuela de Ecología Humana de Chicago también utilizó una selección de esos conceptos para entender los procesos propios de los entornos urbanos. Esta línea de pensamiento continuó y generó importantes resultados representados por Amos Hawley y Ottis Duncan. Este último produjo un famoso modelo a finales de los cincuenta, llamado P-O-E-T, que trataba de entender las interdependencias entre las dinámicas de Población, Organización, Medioambiente y Tecnología. Éste fue el primer intento de proporcionar un enfoque integrador de las relaciones sociales y ambientales ignorando, sin embargo, aspectos cruciales como la dinámicas de la contaminación y los sistemas de información. En relación al papel del conocimiento en la sostenibilidad ver Cash, et al. 2003.
- 3 Thompson también considera otros perfiles culturales como los jerárquicos o los fatalistas. En este caso se han extraído del sistema para mayor simplificación