

## CAPÍTULO I

## Modelado basado en agentes para la simulación de políticas de sostenibilidad\*

Amparo Alonso Betanzos  
Alejandro Rodríguez Arias  
Bertha Guijarro Berdiñas  
Noelia Sánchez Maroño

En este artículo exploramos el uso de modelos basados en agentes (MBA) combinados con técnicas de inteligencia artificial (IA) para simular y analizar sistemas complejos. Los MBA permiten representar sistemas compuestos por múltiples entidades autónomas, cada una con sus propias características y comportamientos, lo cual facilita el estudio de dinámicas emergentes a nivel micro y macro. Al integrar técnicas de aprendizaje automático se potencia la capacidad de los agentes para tomar decisiones adaptativas, analizar datos y mejorar la precisión de las simulaciones. Este enfoque ha demostrado ser particularmente efectivo para resolver problemas donde la interacción entre agentes y su entorno es clave, como en la propagación de enfermedades, la adopción de innovaciones, o la gestión de recursos en organizaciones. Estos modelos son aplicables en diversos dominios, como la sostenibilidad, la salud pública o la economía, y tienen un importante potencial para la simulación de políticas, permitiendo mejorar la toma de decisiones en entornos complejos y cambiantes.

*Palabras clave:* modelado basado en agentes, aprendizaje automático, simulación de políticas.

---

\* Los sistemas descritos en este capítulo han sido desarrollados en el marco de los proyectos financiados por la Unión Europea: LOW CARbon at Work y SMARTEES (Social Innovation for Modelling Approaches to Realizing Transition to Energy Efficiency and Sustainability), así como del proyecto CEDCOVID (Ciencia e Ingeniería de Datos para la Evaluación, Predicción Poblacional y Personalizada de la Evolución de la Enfermedad COVID-19), financiado por la Xunta de Galicia. Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a nuestros compañeros de los distintos proyectos por su valiosa colaboración y el esfuerzo dedicado a estas iniciativas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los modelos basados en agentes (MBA) son una herramienta clave para simular y estudiar sistemas complejos normalmente integrados en contextos sociales y económicos determinados (Railsback y Grimm, 2019). Estos modelos simulan el comportamiento de agentes y su interacción con el entorno, donde los agentes pueden representar individuos, organizaciones, o incluso ecosistemas, que poseen cierta autonomía, con características y comportamientos individuales, actuando bajo ciertas reglas que determinan sus acciones y decisiones. Esta técnica ha ganado relevancia en diversos campos, debido a que permite la simulación de interacciones a nivel micro y el estudio de sus efectos emergentes a nivel macro. Este enfoque es especialmente valioso en el modelado de políticas sociales o económicas relacionadas con la sostenibilidad, ya que los problemas suelen ser multifacéticos, afectando a los individuos, a la sociedad y al medioambiente. El uso de estos modelos permite a los investigadores y a los responsables de la elaboración de políticas evaluar el impacto potencial de distintas intervenciones en comunidades y sistemas complejos antes de implementarlas en la vida real.

Al incorporar la diversidad de actores, sus decisiones y las interacciones entre ellos, los modelos basados en agentes son unas herramientas para analizar cómo diversos actores (ciudadanos, instituciones, empresas, organizaciones, entre otros) se relacionan dentro de sistemas complejos en contextos socioeconómicos. Esto permite una visión más dinámica y realista del impacto potencial de las políticas implementadas, favoreciendo el diseño de estrategias más efectivas y equitativas para la sociedad.

Una ventaja importante de este método de modelado es su flexibilidad, con capacidad para representar a los individuos mediante sus características particulares, lo que permite abordar los aspectos de heterogeneidad entre individuos o tipos de actores. Además, facilita la inclusión de representaciones estructuralmente complejas, dinámicas y también heterogéneas de exposición o influencia social y ambiental, permitiendo incluir elementos espaciales que afectan a los agentes y a sus interacciones. Otra característica relevante es su capacidad para modelar la interacción entre los elementos del sistema y la adaptación, permitiendo la captura de interacciones entre actores y entornos, como las influencias bidireccionales entre las normas sociales y los comportamientos individuales, entre otros. El MBA permite analizar efectos emergentes a nivel macro que no son fácilmente previsibles a partir de las decisiones individuales. Por ejemplo, en la adopción de energías renovables, el modelo puede representar cómo las preferencias de los consumidores, la disponibilidad tecnológica y las políticas gubernamentales interactúan para influir en los niveles de aceptación de las distintas opciones de consumo. Además, las simulaciones permiten evaluar el impacto de diversas políticas alternativas en plazos medio-largos, y comparar también los resultados de diferentes escenarios en un entorno virtual. De esta manera, se puede observar cómo las variaciones en incentivos, regulaciones o cambios culturales impactan la sostenibilidad. Esto no solo mejora la toma de decisiones, sino que también facilita la identificación de políticas más resilientes, capaces de adaptarse a un entorno global dinámico. Como ejemplo en el ámbito bancario, un MBA podría ser útil al permitirnos capturar la diversidad de perfiles y comportamientos de los clientes, lo cual facilita el análisis de efectos emergentes a nivel macro que no pueden

preverse fácilmente a partir de las decisiones individuales. Así, en el contexto de la concesión de créditos, el modelo puede simular cómo influyen en la toma de decisiones los distintos perfiles de clientes, la situación económica, la competencia y las políticas de riesgo. Además, las simulaciones permiten evaluar el impacto de diferentes estrategias de crédito o cambios regulatorios en horizontes medio-largos y comparar los resultados en diversos escenarios simulados. De este modo, es posible observar cómo los cambios en las tasas de interés, los incentivos fiscales o la educación financiera impactan en la estabilidad y el crecimiento de la cartera de crédito. Esto no solo mejora la toma de decisiones, sino que también ayuda a identificar estrategias de crédito y políticas de riesgo más resilientes, adaptables a fluctuaciones económicas y a un entorno financiero dinámico.

Un importante desafío relacionado con el MBA es la validación de los modelos, cuyo objetivo es garantizar que su funcionamiento se parezca al del sistema real. Este proceso incluye no solo la comparación de los resultados globales del modelo, sino también la evaluación detallada del comportamiento individual de los agentes a nivel micro. Entre los diversos métodos de validación disponibles, uno de los más comunes debido a la falta de suficientes datos de calidad es la validación por expertos (Collins *et al.*, 2024; Balci, 1998). Este enfoque implica presentar el modelo y su comportamiento a especialistas en el campo, quienes analizan y evalúan si los resultados del modelo son consistentes con el conocimiento teórico o empírico del sistema que se está modelando, y confirman su precisión y coherencia con la realidad observada. Por ejemplo, en nuestro caso veremos cómo una vez implementados los modelos, hemos comprobado si éstos son capaces de reproducir de manera adecuada los resultados del proceso de implantación de políticas similares en el pasado. Para ello, hemos contado con la opinión experta de diversos *stakeholders* (Oficina de Medioambiente de la UDC, Concejalía de Medioambiente de Vitoria, etc.).

Por otra parte, la inteligencia artificial (IA) puede contribuir dotando a los agentes individuales de capacidades de aprendizaje, adaptación y toma de decisiones que van más allá de las reglas o ecuaciones del modelado basado en agentes clásico, además de contribuir también con un modelado más realista y complejo de los comportamientos de sociedades y grupos humanos debido a las interacciones más complejas que se pueden modelar usando IA (Campos *et al.*, 2025). Los modelos de aprendizaje automático que se pueden incorporar a los MBA permiten modelar el comportamiento cognitivo de los agentes individuales y sus interacciones con el entorno y con el grupo social considerado, así como su evolución en un cierto intervalo temporal. En resumen, es particularmente útil e interesante cuando el sistema a estudiar implica múltiples agentes que interactúan de forma compleja, a partir de procesos de toma de decisión individuales, y aparecen propiedades emergentes que es necesario estudiar y que no son fácilmente predecibles o explicables mediante las técnicas tradicionales de simulación. Esta simbiosis entre IA y MBA es relativamente novedosa, y nos permite realizar simulaciones más precisas en áreas como los sistemas económicos y sociales complejos donde se han mostrado inadecuados hasta ahora los métodos de modelado más tradicionales.

En este capítulo veremos tres ejemplos diferentes de modelado de políticas sociales en el área de sostenibilidad, en los que se desarrollarán diferentes modelos MBA con combina-

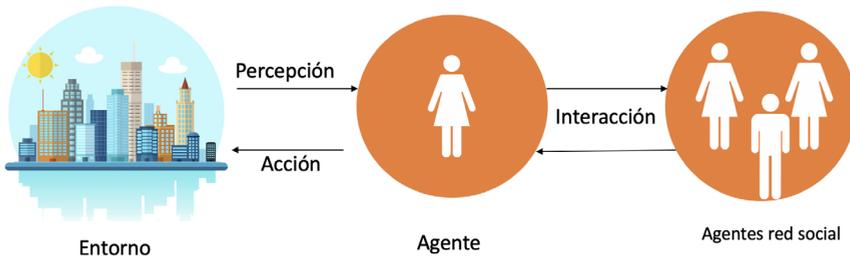
ción de técnicas de IA para modelar la toma de decisiones de los agentes individuales. Hasta ahora, las aproximaciones tradicionales no han sido capaces de tratar la complejidad social de la transición energética. La sostenibilidad es compleja, porque puede percibirse en diferentes contextos, como el medioambiental, el social, el psicológico o el económico, de modo que constituye un problema que involucra la toma de decisiones humanas en entornos multifacéticos que interactúan en formas múltiples. El modelado de procesos relacionados con la sostenibilidad es una tarea especialmente relevante y particularmente urgente en este momento de transición energética en la que nos encontramos. Este enfoque es especialmente valioso en el modelado de políticas sociales, ya que permite a los investigadores y formuladores de políticas evaluar el impacto potencial de distintas intervenciones en comunidades y sistemas complejos antes de implementarlas en la vida real.

## 2. MODELOS BASADOS EN AGENTES. ESTRUCTURA GENERAL

Los modelos basados en agentes tienen tres componentes principales, como se puede ver en la [figura 1](#):

Figura 1.

### Los tres componentes principales de un modelo basado en agentes



Fuente: Elaboración propia.

- *Agentes*, que representan una entidad autónoma con características y comportamientos individuales. Los agentes van a incorporar modelos de comportamiento que podrían estar basados en teorías psicosociales que formarán parte de su modelo de toma de decisiones, pero este modelo también debe reflejar el comportamiento real de los individuos de la organización que se va a modelar. Para ello, se recogerán datos en un cuestionario que será elaborado por psicólogos y sociólogos, y que se enviará a los individuos o entes cuya respuesta se pretende modelar. Se incorporarán también otros tipos de datos procedentes de fuentes disponibles, como pueden ser datos censales, por ejemplo. En los tres ejemplos que vamos a describir, el modelo de toma de decisiones de los agentes necesita ser explícito y transparente, para poder ser revisado por los expertos en el área social, para comprobar su adecuación a las teorías psicosociales empleadas.

- *Red social*, que está formada por individuos o entes con los que se relacionan los agentes. Esta red se ocupa de representar otro aspecto que es imprescindible modelar, la interacción entre agentes. Esta interacción no es necesariamente ni simétrica ni estática, y por tanto puede influir en la toma de decisiones de los agentes individuales. Usualmente, un agente establece una unión o *link* con otros agentes con los que se relaciona (otras organizaciones o individuos como, por ejemplo, amigos, familiares o compañeros de trabajo). La red social de diferentes agentes tiene distintos tamaños, grados de influencia y tipos de evolución. Existen actualmente cuatro tipos básicos de modelos de redes (Van Eck y Jager, 2010): 1) red regular: cada nodo está conectado a sus cuatro vecinos inmediatos; 2) mundo pequeño (*small world*): la mayoría de los nodos están conectados solo con sus vecinos inmediatos; 3) libre de escala: unos pocos nodos tienen muchas conexiones, y 4) aleatoria: la mayoría de los nodos tienen tres o cuatro conexiones.
- *Entorno*, que es el espacio en el que los agentes interactúan, toman decisiones y realizan acciones, cuyo alcance nos interesa medir.

En los siguientes apartados veremos tres ejemplos diferentes de modelado de políticas sociales. En el primero de los ejemplos modelaremos el efecto de diferentes políticas medioambientales sobre diferentes organizaciones, y cómo mejorar los resultados de estas, usando como medida de evaluación de su efectividad la disminución de las emisiones en CO<sub>2</sub>, y un horizonte temporal amplio. El tamaño de la organización no es elevado (alrededor de 2.000 personas), por lo que, en este caso, modelaremos una red social *ad-hoc*. En el segundo modelo, la idea es medir la aceptabilidad de políticas de innovación social en entornos locales, como puede ser el caso de la implantación de modelos urbanos en una ciudad determinada. En este segundo caso, el tamaño del modelo es mucho mayor, ya que pretendemos modelar el comportamiento de una ciudad de mediano tamaño, o de una comunidad concreta (como una isla, por ejemplo), y por lo tanto la red social será elegida como uno de los modelos disponibles en las herramientas de simulación de MBA comunes, como es el caso de NetLogo<sup>1</sup>. Finalmente, en el tercer y último caso modelaremos la aceptación, por parte de la población, de medidas de contención de un virus en una epidemia, y cómo esta cuestión afecta de manera notable a la propagación de esta, ilustrando el interés y la utilidad de este tipo de técnicas que son capaces de modelar sistemas complejos teniendo en cuenta teorías psico-sociales en la toma de decisiones.

### 3. MBA PARA LA SIMULACIÓN DE LA TOMA DE DECISIONES EN UNA ORGANIZACIÓN. EL PROYECTO LOCAW

Las grandes empresas y organizaciones necesitan modelos cada vez más precisos para monitorizar su estado o cualidades, o bien para simular qué ocurriría si se realizasen ciertos cambios en las mismas. Los MBA son útiles para este propósito, ya que nos permiten modelar

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

directamente a los agentes involucrados (trabajadores, secciones, departamentos...) en su día a día, en lugar de depender de sistemas de ecuaciones extensos y difíciles de interpretar, justificar o explicar. El potencial de los MBA radica en que hacen posible la representación directa de los actores de un sistema social y de sus comportamientos en sus entornos sociales y/o físicos.

Este estudio<sup>2</sup> describe el modelo de toma de decisiones sobre prácticas proambientales de los agentes en una organización, así como el modelo de sus interacciones sociales. En concreto, se detalla cómo se diseñó un MBA para una organización académica, específicamente la Universidade da Coruña (UDC) (Sánchez-Maróño, 2015). La idea es simular el comportamiento de cada trabajador en la organización, teniendo en cuenta sus diferentes grados de autonomía y sus diferencias en valores, asunción de normas, etc. Por comportamiento proambiental nos referimos a decisiones que el trabajador toma en el desempeño de su trabajo, por ejemplo, ¿qué medio de transporte usa para ir a su puesto de trabajo? ¿emplea papel reciclado? ¿apaga las luces al salir del despacho/aula? Por tanto, para desarrollar el modelo, necesitamos tanto un esquema del comportamiento de los agentes que representarán a los trabajadores como de las redes sociales en las que interactúan. Dado el tamaño de la institución, que en ese momento contaba con 2.277 trabajadores entre personal docente e investigador y personal de administración y servicios, el modelo de toma de decisiones de los agentes se construyó en función de las respuestas individuales a un cuestionario elaborado por un equipo de psicólogos y sociólogos. El modelo de toma de decisiones, para el que se utilizaron técnicas sencillas de IA, estaba sujeto a dos restricciones fundamentales: en primer lugar, la decisión concreta del agente debía ser explícita, para que los psicólogos y sociólogos pudiesen comprobar su consistencia teórica, además de que un algoritmo de toma de decisiones transparente es en principio más útil a la organización para facilitar la interpretación de los resultados. La segunda restricción se refiere a que debe simularse la respuesta real de los trabajadores, y de ahí la necesidad de un cuestionario individual. Por otra parte, la estructura de la red social se derivó de un análisis documental, complementado con datos del cuestionario sobre el número de relaciones entre los empleados, ajustando así la información a datos reales. Para representar la relación entre dos agentes, se creaba un *link* entre ellos, de modo que cada agente puede tener varios *links* que forman su red social representada como un grafo, en la que los *links* tienen valores que reflejan la fuerza de la relación, y que pueden cambiar con el tiempo, además de aparecer/desaparecer. Los agentes interactúan mediante esta red social, percibiendo el comportamiento de los demás, quizás modificando el suyo en base a ello e intentando influir en otros agentes con los que están conectados.

### 3.1. El modelo de toma de decisiones

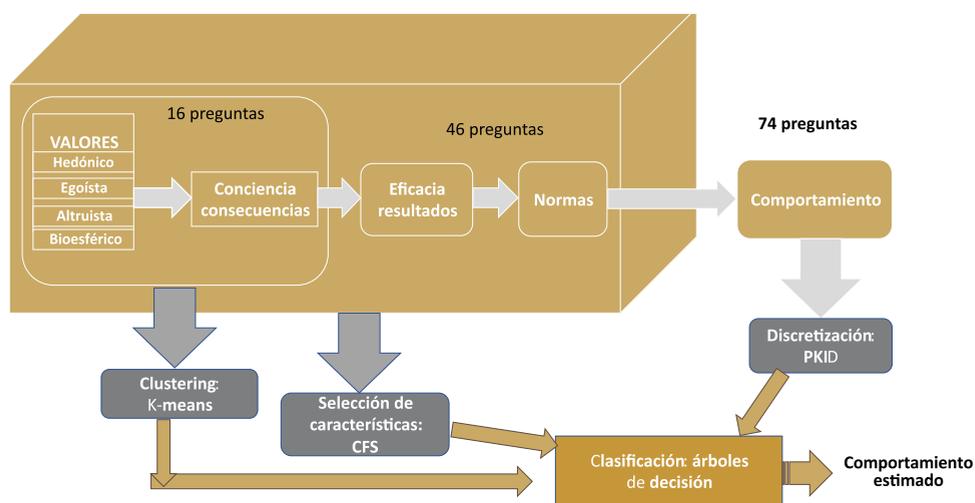
El modelo que se adoptó para modelar el comportamiento proambiental de los agentes es un modelo teórico, que mezcla la influencia de los valores individuales, la conciencia de las consecuencias, la eficacia de los resultados y las normas (Steg y De Groot, 2012). En la

<sup>2</sup> LOw CARbon at Work, 7º Programa marco, <http://www.locaw-fp7.com/>

figura 2 se muestran las diferentes partes en las que se dividió el cuestionario, así como el número de preguntas relacionado con cada uno de los aspectos involucrados (transmisión de normas, conciencia de las consecuencias, etc). También podemos ver las técnicas (*clustering*, con el clásico *modelo k-means* (Wu, 2012); selección de características, para lo que se empleó el modelo *CFS –Correlation Feature Selection–* (Hall, 1999); y discretización, en la que usamos el modelo *PKID–Proportional k-Interval Discretization–* (Yang et al., 2001)) que se utilizaron para poder obtener los modelos de IA (en este caso, árboles de decisión) que nos permiten estimar el comportamiento individual de cada agente, como se explicará más adelante.

Figura 2.

### El modelo de toma de decisiones y su relación con algunas de las preguntas del cuestionario



Fuente: Elaboración propia.

Los valores pueden entenderse como conceptos abstractos o creencias relacionadas con los objetivos de una persona, y sirven como estándares orientadores en su vida. Existen varios tipos, pero en este proyecto se han considerado cuatro orientaciones: egoísta, hedónica, altruista y bioesférica. Por ejemplo, una persona puede reducir el uso del automóvil debido a su coste (egoísta), o porque pone en peligro la salud de las personas (altruista).

En el proyecto LOCAW se emplearon herramientas cuantitativas y cualitativas, como grupos focales y entrevistas, además de un cuestionario basado en el modelo de valores-creencias-normas para adquirir los datos necesarios para desarrollar el modelo. Este cuestionario incluyó bloques de preguntas sobre valores (véase figura 3), motivaciones (eficacia, visiones del mundo y normas) y comportamientos, tanto en el trabajo como en el hogar, para analizar la relación entre ambos contextos. En este último aspecto, se incluyeron 74 preguntas

Figura 3.

**Extracto del cuestionario. Preguntas sobre valores\***

	Opuesto a mis valores -1	No importante 0	1	2	Importante 3	4	5	Muy importante 6	De máxima importancia 7
1. <i>Igualdad</i> : igualdad de oportunidades para todos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2. <i>Respeto por la tierra</i> : armonía con otras especies	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3. <i>Poder social</i> : control de los otros, dominio sobre otros	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
4. <i>Placer</i> : alegría, satisfacción de los deseos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5. <i>Unidad con la naturaleza</i> : encajando con la naturaleza	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
6. <i>Un mundo en paz</i> : libre de guerras y conflictos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
7. <i>Riqueza</i> : posesiones materiales, dinero	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
8. <i>Autoridad</i> : el derecho a liderar o dirigir	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
9. <i>Justicia social</i> : corrección de la injusticia, protección del más débil	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
10. <i>Disfrute de la vida</i> : disfrute de la comida, el sexo, el ocio, etc.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
11. <i>Protección del medio ambiente</i> : conservación de la naturaleza	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
12. <i>Influencia</i> : Tener impacto sobre personas y circunstancias	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
13. <i>Ser de ayuda</i> : trabajar para el bienestar de los demás	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
14. <i>Prevención de la contaminación</i> : protección de los recursos naturales	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
15. <i>Hedonismo</i> : hacer cosas agradables y placenteras	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
16. <i>Ambición</i> : trabajo duro, aspiraciones	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

\*: Sólo es elegible una de las opciones numéricas.

sobre el uso de energía, materiales, manejo de desechos y el uso de transporte y sus diferentes tipos. Los datos recopilados se usaron para generar los árboles de decisión que explicaban las decisiones ambientales de los agentes en tareas cotidianas. Para mejorar la generalización de estos árboles, se aplicaron técnicas básicas de IA que permiten obtener un conjunto representativo de estos:

- *Clustering*. Fue el método utilizado para poder agrupar las respuestas en los cuatro tipos de valores contemplados en base a las 16 preguntas incluidas en el cuestionario, que fue contestado por 237 personas. Tras aplicar la técnica *k-means*, y en colaboración con los sociólogos y psicólogos, se distinguieron en la UDC seis clústeres diferentes que nos permitían una separación adecuada de los individuos, cuatro de ellos correspondientes a los tipos anteriormente citados; los otros dos son clústeres híbridos, que se correspondían a perfiles bioesférico-altruista y egoísta-hedónico.
- *Selección de características y discretización*. En este modelo tenemos un número alto de comportamientos a modelar (por ejemplo, medio de transporte empleado, uso de papel, calefacción, encendido de luces, etc.), para los que además puede haber más de una pregunta relacionada en el cuestionario. Por este motivo, se decidió usar un método que nos permitiese seleccionar las variables o características más relevantes para cada uno de los comportamientos, y para ello se usó el algoritmo *CFS* (Hall, 1999). El resultado es una matriz que relaciona comportamientos con las entradas que los expertos han considerado teóricamente consistentes. Un ejemplo puede verse en la [tabla 1](#), donde vemos que además de ciertos datos personales, el valor de la variable “localización” afecta al comportamiento de elegir el coche para los desplazamientos, y que algunos valores relacionados con los perfiles altruista y bioesférico (respeto a la tierra, igualdad y un mundo en paz) influyen en la adopción de comportamientos proambientales. La muestra también se discretizó para obtener una representación adecuada de los intervalos que se usaron para graduar las respuestas de los individuos.

Tabla 1.

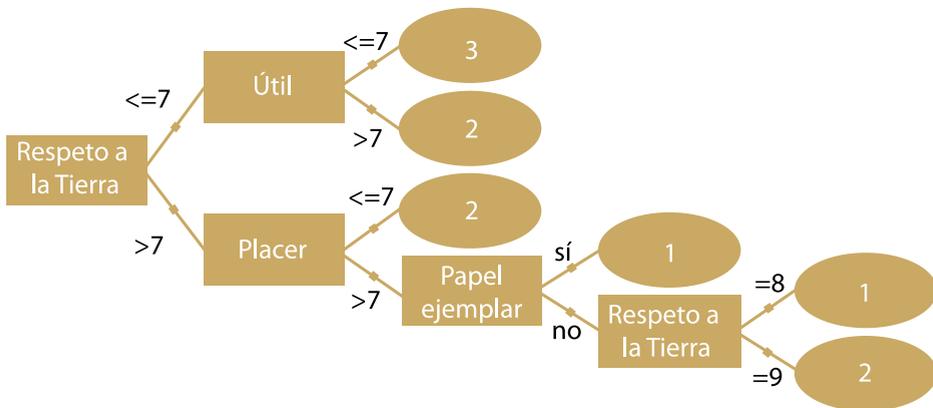
### Un extracto de los resultados del proceso de selección de características

<i>Comportamiento</i>	<i># Vuelos</i>	<i>Uso coche</i>	<i>Apagar luces</i>	<i>Recicl. papel</i>
Género	X	X	X	X
Nivel estudio	X		X	X
Nivel organización	X		X	X
Rol ejemplar	X		X	X
Localización		X		
Igualdad			X	
Resp. Tierra			X	X
Paz	X			

- Clasificación.** Para cada comportamiento, las variables relevantes seleccionadas por el algoritmo *CFS*, junto con el resultado discretizado del paso previo, conforman el conjunto de datos que se utiliza para el entrenamiento del algoritmo *C4.5*, un algoritmo clásico usado para generar un árbol de decisión para problemas de clasificación (Quinlan, 1993). El conjunto de datos se divide en un 66 % de los datos para entrenar y el 34 % para prueba. El clúster egoísta tiene solo dos muestras en la organización a modelar (UDC), por lo que estas se agregaron al grupo híbrido egoísta-hedónico, según el criterio de los expertos psicólogos. Con estos cinco clústeres y 65 comportamientos a modelar, se generaron 325 árboles de decisión usando *C4.5*. Para mejorar su rendimiento, algunos árboles se podaron basándose en teorías del campo aportadas por un psicólogo del proyecto. Un ejemplo de uno de estos árboles se muestra en la [figura 4](#). Dado que el número de árboles es muy elevado, las precisiones alcanzadas en el conjunto de prueba varían notablemente, con precisiones que alcanzan el 80,5 % (Sánchez-Marño *et al.*, 2017). Es resaltable que el problema que tratamos es multiclase, ya que en los cuestionarios las contestaciones de los usuarios tienen asociada una escala de Likert con siete valores diferentes. De ahí la necesidad de usar un algoritmo de discretización, como el *PKID*, que agrupe las respuestas en intervalos concretos que nos permitan mantener una buena precisión teniendo en cuenta que el número de datos (contestaciones al cuestionario) no es demasiado amplio.

Figura 4.

**Árbol de decisión para el comportamiento:** *¿Con qué frecuencia tienes las luces encendidas en una habitación de casa cuando no hay nadie dentro?*



*Nota:* Las variables de entrada son las respuestas al cuestionario variando al rango a [1.9]. La salida es la frecuencia en la que se adopta el comportamiento. Como podemos ver, las variables que influyen son el respeto a la tierra del agente, su percepción de la utilidad de la norma de apagar las luces, el placer de disfrutar de las luces encendidas, y si el agente está interesado en mantener un rol ejemplar en la organización.

*Fuente:* Elaboración propia.

### 3.2. La red social

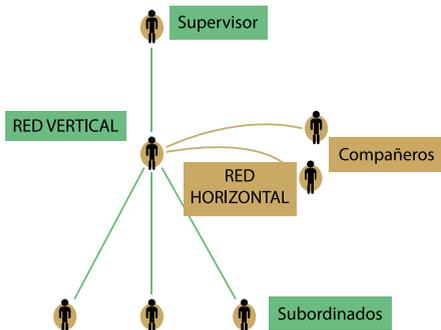
Los agentes interactúan con un subconjunto de otros agentes, formando un grafo en el cual los nodos representan a los agentes y los arcos modelan las relaciones entre ellos. La disposición de estas conexiones se denomina topología de la red social, y describe quién transmite información a quién, además de poder modelar la probabilidad de contacto entre agentes. Aunque existen modelos predefinidos para redes sociales, debido al tamaño manejable del sistema a modelar, se desarrolló un modelo *ad hoc* que incluye dos redes sociales en paralelo, con el objetivo de capturar la complejidad de la organización. Una de las redes refleja la estructura jerárquica de la organización (red vertical), mientras que la otra modela las relaciones entre compañeros (red horizontal). Ambas redes se desarrollaron utilizando el conocimiento de las organizaciones y los trabajadores. La red vertical puede considerarse un modelo libre de escala, ya que pocos agentes (como el rector de la universidad y los directores de departamento) tienen muchos enlaces, mientras que sus subordinados no. En cambio, la red horizontal no se ajusta a estos esquemas, ya que el número de enlaces varía significativamente de un agente a otro y un agente puede estar vinculado a otro que no es necesariamente su vecino. La red jerárquica sirve de base para construir la red horizontal, ya que muchos de los enlaces horizontales se generan a partir de estructuras de departamentos, pero también incluye enlaces “externos” a otros departamentos o incluso empresas, reflejando conexiones espontáneas que pueden surgir en diferentes circunstancias (véase figura 5).

Estas redes facilitan cambios de comportamiento de distintas maneras. Por ejemplo, si el director de un departamento universitario prohíbe imprimir correos electrónicos, esta regla se transmite verticalmente a sus subordinados, lo que implica que no tienen la opción de imprimir. Sin embargo, si el mismo director comienza a reciclar papel colocando un contenedor en un área común (sin que sea obligatorio), algunos investigadores cambiarán su comportamiento por influencia del director a través de la red horizontal, independientemente de si están en el mismo departamento, sólo porque comparten el mismo espacio.

Figura 5.

#### Las redes sociales en el modelado de la UDC

(a) Esquema conceptual red vertical y horizontal UDC



(b) Esquema red vertical

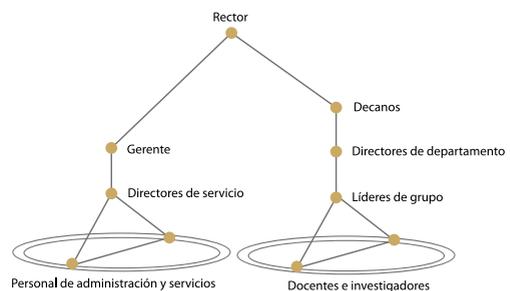
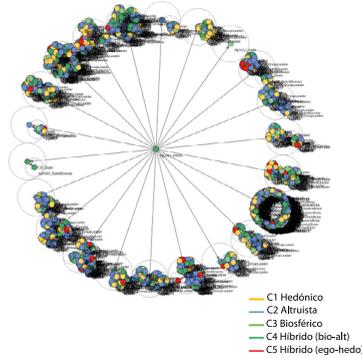


Figura 5. (continuación)

**Las redes sociales en el modelado de la UDC**

(c) Modelo completo red UDC



*Nota:* En la subfigura (a) se muestra el concepto general de ambas, en la subfigura (b) vemos el esquema general de la red vertical, y en la subfigura (c) vemos ambas redes con sus agentes, usando diferentes colores para los tipos de perfiles de valores de los individuos, como se indica en la etiqueta. En esta subfigura (c) el elemento central es el rector, que tiene conexiones con cada uno de los centros de la Universidad. Estos centros, sus departamentos, grupos, y finalmente los individuos que los forman aparecen como cada uno de los elementos de la rueda. En el caso de los individuos un código identifica su perfil.

Las redes son la estructura que se usa para transmisión de reglas y normas de la organización, tanto a través de la red vertical o jerárquica como de la red horizontal, en la que se puede dar la adopción de comportamientos entre agentes compañeros en la organización. De manera general, los agentes tienen un comportamiento determinado por el árbol de decisión obtenido para el grupo de valores (perfil biosférico, altruista, etc.) al que pertenecen y también por las respuestas del agente a las demás preguntas del cuestionario relacionadas con otros aspectos, como la transmisión de normas. No obstante, cada agente se relaciona con sus compañeros y, como resultado, puede cambiar su comportamiento a lo largo del tiempo. La influencia de los compañeros de un agente variará según las afinidades entre cada par de agentes, de modo que un agente se verá más afectado por aquellos agentes que sean similares a él. El modelo matemático propuesto para la evolución de la red social de los agentes se puede consultar en más detalle en Sánchez-Maróño *et al.*, 2015.

**3.3. Simulaciones de diferentes políticas de sostenibilidad**

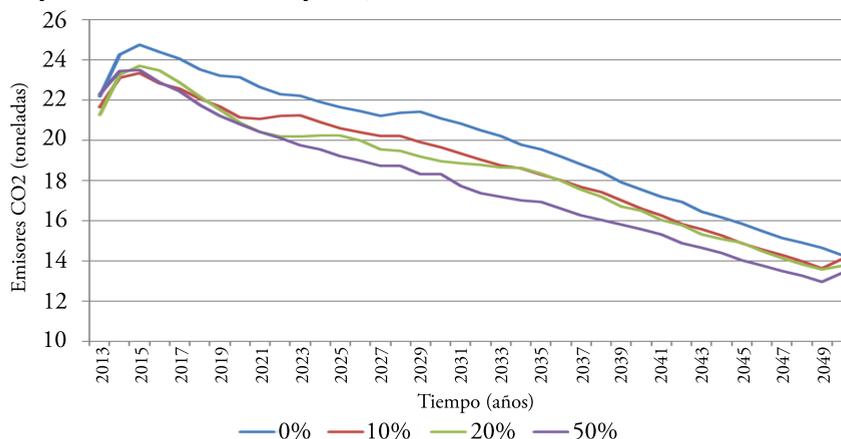
La política de la Unión Europea (UE) tiene entre sus objetivos principales la protección del medio ambiente, además de minimizar los riesgos para el clima, la salud humana y la biodiversidad. El Pacto Verde Europeo aspira a hacer de Europa el primer continente climáticamente neutro del mundo. Con las nuevas regulaciones de la UE, los gobiernos nacionales han aprobado leyes y políticas para reducir o compensar las emisiones de ciertas organizaciones, con el fin de alcanzar los objetivos nacionales y europeos. Estas regulaciones han impulsado a las organizaciones a implementar mecanismos para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero que, sin embargo, hasta el momento, no han logrado las necesarias reducciones.

Para mejorar los esfuerzos hacia la sostenibilidad, es necesario identificar las barreras y los impulsores de cambios sostenibles en las prácticas laborales diarias. El lugar de trabajo, donde se encuentran y negocian las demandas de rentabilidad económica y sostenibilidad ambiental, influye en los hábitos de consumo energético y en las emisiones. Dado que las personas pasan gran parte de su vida en el trabajo, este es un espacio donde se negocian identidades y se promueven o desincentivan comportamientos sostenibles. Utilizando distintas técnicas (grupos focales, entrevistas en profundidad con miembros clave de las organizaciones y encuestas por cuestionario y escenarios de retroproyección) se definieron distintas políticas a implantar en la organización para reducir la huella de carbono cuya efectividad debería ser evaluada mediante el MBA. Las intervenciones diseñadas afectan a las tres partes principales del modelo basado en agentes: los agentes individuales, la red social y el entorno (es decir, la organización). Las políticas abarcaron los tres temas principales (movilidad, energía y residuos) estudiados en el proyecto LOCAW, y fueron evaluadas por separado, en combinación, aisladas en el tiempo y mantenidas en el tiempo para poder obtener conclusiones adecuadas y explorar cómo hacerlas más efectivas. Mostraremos los resultados de algunas de ellas:

- *Incrementar el personal bioesférico.* Dentro de los diferentes perfiles, una posibilidad sería incrementar el más proclive a la sostenibilidad, que sería el personal bioesférico. Asumiendo distintos porcentajes de incremento de ese personal, obtendríamos el resultado que podemos ver en la [figura 6](#). Como se puede apreciar, el descenso en emisiones de CO<sub>2</sub> es prácticamente el mismo para el caso de aumentos del 20 y 10 %. Un incremento importante del 50 % logra resultados algo mejores, pero su efectividad disminuye en el tiempo, debido a la influencia de la red social.

Figura 6.

**Simulación de resultados para el caso de que se intente aumentar la proporción de empleados con un cierto perfil, en este caso el bioesférico**

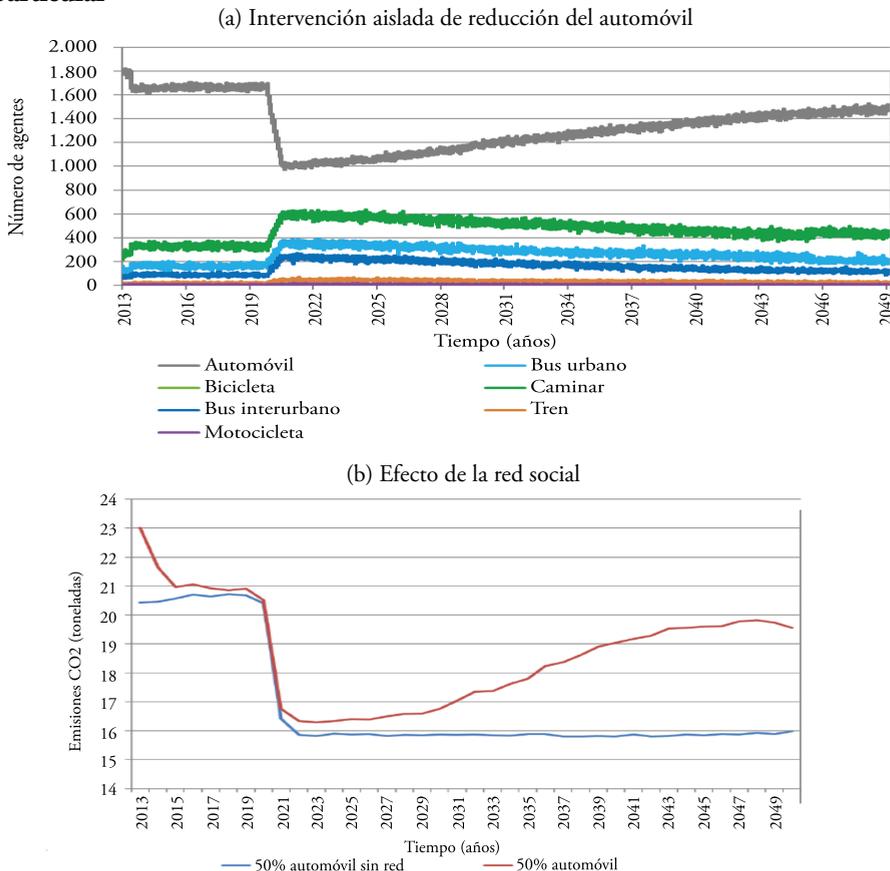


*Nota:* La situación que corresponde a la etiqueta 0 % es la situación de partida en la organización, y las demás líneas corresponden a aumentos del porcentaje de empleados en el perfil.

- Reducir el uso del automóvil particular.** En la UDC, el transporte es el aspecto que más perjudica a la sostenibilidad, ya que el 80 % del personal utiliza el automóvil particular para sus desplazamientos. En este caso, se han simulado varias alternativas, que consisten en la reducción del uso del coche, que podría llevarse a cabo de varias formas, por ejemplo, reduciendo la disponibilidad de plazas de aparcamiento o instaurando una política de cobro de espacios de aparcamiento. Las simulaciones se testearon en forma de una acción única aislada en el tiempo, de varias reducciones mantenidas en un tiempo de actuación más largo y, finalmente, mediante la combinación de varias políticas de movilidad, como podría ser incrementar el uso de medios de transporte alternativos, como por ejemplo, favorecer el uso de la bicicleta. En la [figura 7](#) podemos

Figura 7.

### Simulación de resultados para el caso de que se reduzca el uso del automóvil particular

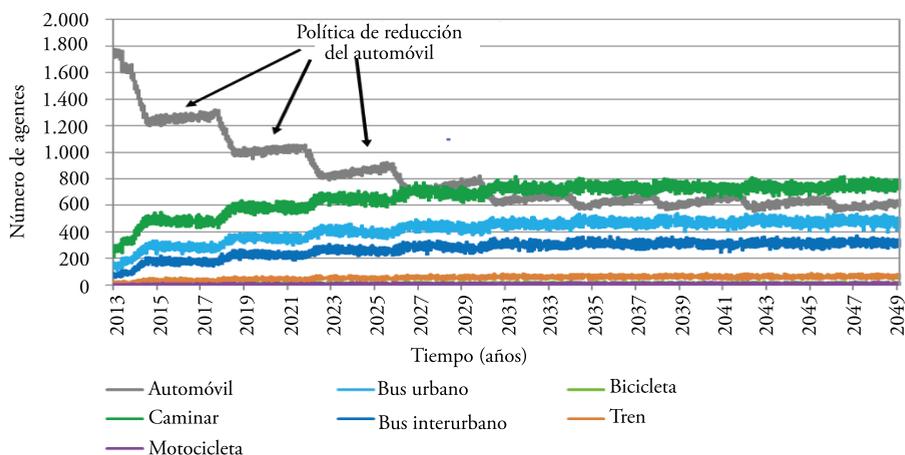


*Nota:* La subfigura a) muestra el efecto de una intervención aislada para reducir el uso del automóvil particular en el año 2020. La subfigura b) el efecto de la red social.

ver un efecto interesante, que se relaciona con la política de reducción del uso del coche. Como podemos ver, la política en su implantación consigue una reducción de uso del coche (figura 7 superior), pero este se va recuperando con el tiempo por la influencia de la red social (el conocido efecto del boca a boca); prescindiendo de este efecto, la política tendría un efecto perdurable en el tiempo (figura 7 inferior). En cambio, si las políticas de reducción se mantienen en el tiempo y se efectúan de forma periódica, la simulación nos llevaría a que, tras cuatro reducciones en períodos de cuatro años, se conseguiría que el coche dejase de ser la primera opción de transporte, como se puede ver en la figura 8.

Figura 8.

### Simulación de resultados para el caso de que se reduzca el uso del automóvil particular (Intervención repetida en el tiempo)



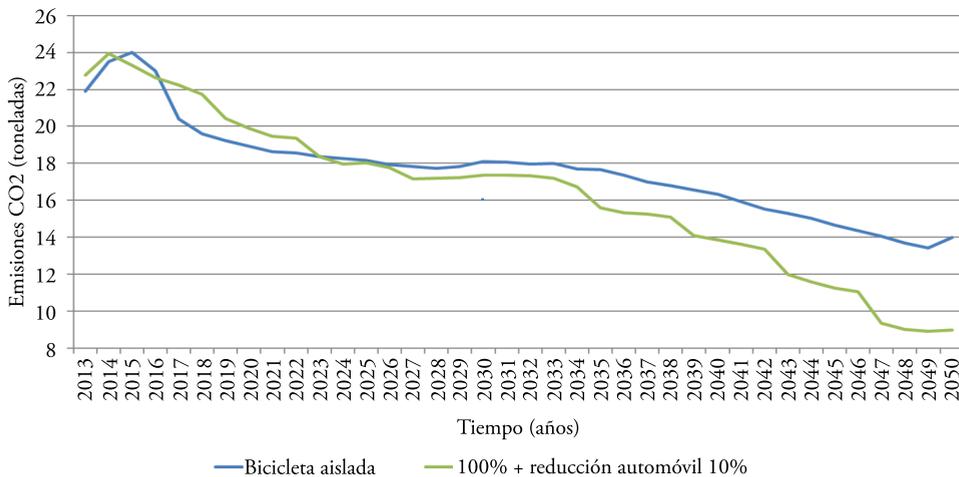
Fuente: Elaboración propia.

Otras opciones se han centrado en estudiar el porcentaje de reducción del uso del coche, o de promoción de otros vehículos, como la bicicleta, obteniendo como resultado que se consiguen reducciones de CO<sub>2</sub> similares con políticas más agresivas que con políticas menos agresivas (por ejemplo, con una reducción de uso del 30 % o del 50 %), y que los mejores resultados se obtienen combinando políticas de distintos tipos, como por ejemplo reducir el uso del coche y promover el uso de la bicicleta (véase la figura 9).

En conclusión, se obtuvo que las políticas mantenidas en el tiempo obtienen mejores resultados que las intervenciones aisladas, y que además es recomendable la combinación de varias políticas, ya que se obtienen mejores resultados que aplicando cada una de ellas separadamente. Para los responsables del diseño de políticas, es también resaltable la importancia de medir adecuadamente la intensidad de estas, ya que las políticas de intensidad media pueden funcionar mejor que las políticas más agresivas para conseguir una transición a la sostenibilidad.

Figura 9.

### Simulación de resultados para incentivar la bicicleta con y sin incentivar la reducción del automóvil particular



Fuente: Elaboración propia.

nibilidad con más éxito. Finalmente, hay que tener en cuenta la influencia de las redes sociales a largo plazo, en especial en organizaciones como las universidades, en las que las redes horizontales tienen más influencia que las verticales. Esta situación no se dio en el modelado de otras organizaciones de corte más jerárquico (Sánchez-Marroño *et al.*, 2014).

#### 4. MBA PARA LA SIMULACIÓN DE LA ACEPTABILIDAD DE POLÍTICAS DE INNOVACIÓN LOCAL. EL PROYECTO SMARTEES

En este nuevo ejemplo<sup>3</sup>, el objetivo es estudiar la evolución de la aceptabilidad ciudadana de ciertas innovaciones sociales, con el objetivo de mejorarla y estudiar su escalamiento y replicabilidad. En este caso modelaremos la aceptación de la implantación de supermanzanas en las ciudades. Las supermanzanas pueden definirse como una zona urbana cerrada al tráfico, donde las vías interiores son exclusivas para residentes, transporte público, bicicletas y vehículos de emergencia. La adopción con éxito de este tipo de innovaciones depende en gran medida de la aceptación y la participación de la población en su desarrollo e implementación. En este caso concreto, la población sobre la que se trabaja es mucho mayor que en el ejemplo anterior, ya que necesitamos modelar el comportamiento de una ciudad o comuni-

<sup>3</sup> Proyecto SMARTEES, Social Innovation Modelling Approaches to Realizing Transition to Energy Efficiency and Sustainability. <https://local-social-innovation.eu/>

dad, por lo que tendremos dos tipos de red social, una red basada en el concepto de círculo social, que utilizaremos como red de vecinos, y una red de amigos formada utilizando una red aleatoria. En cuanto a los agentes, tendremos como principal agente a los ciudadanos, pero en el entorno también consideramos las interacciones que éstos tienen con otro tipo de agentes que llamaremos nodos críticos, y que representan entidades como el ayuntamiento, la prensa, o diversas asociaciones y organismos que toman parte en el proceso, como pueden ser asociaciones de vecinos. Al igual que en el caso anterior, los datos para el MBA se obtendrán a partir de datos disponibles en los ayuntamientos y comunidades, como por ejemplo los datos censales, y también de cuestionarios que se realizan a los ciudadanos. Usaremos como caso base el modelado de la aceptación del modelo de supermanzanas en Vitoria-Gasteiz, que implementó de manera pionera el modelo, para estudiar su posible ampliación a diferentes zonas de esta misma ciudad, y para estudiar su replicabilidad a otros entornos, como es el caso de Poblenou en Barcelona.

Vitoria-Gasteiz desarrolló un Plan de Movilidad y Espacio Público, que incluyó la implementación de la supermanzana central en varias fases, comenzando en 2006 y terminando en 2013. Durante esta fase, se registraron las acciones del Ayuntamiento, las noticias publicadas en los medios y las reacciones de la ciudadanía. Esta información es clave para calibrar y validar un modelo basado en agentes.

El modelo simula cómo interactúan diferentes actores del proceso, como vecinos, asociaciones de comerciantes, ciclistas, y el propio Ayuntamiento, utilizando los datos recopilados durante la implementación real. También cómo varían de opinión los vecinos como consecuencia de estas interacciones. Una vez ajustado, el modelo permite predecir los efectos de distintas políticas, ayudando a identificar las estrategias que podrían provocar una mayor aceptación ciudadana del proyecto de implantación de supermanzanas.

Este enfoque ayuda a la administración a planificar mejor la creación de nuevas supermanzanas en otras zonas de la ciudad. Además, con los datos adecuados (como cuestionarios o estadísticas demográficas), el modelo puede adaptarse para simular la implantación de supermanzanas en otras ciudades, optimizando el proceso en diferentes contextos.

#### 4.1. El modelo de toma de decisiones

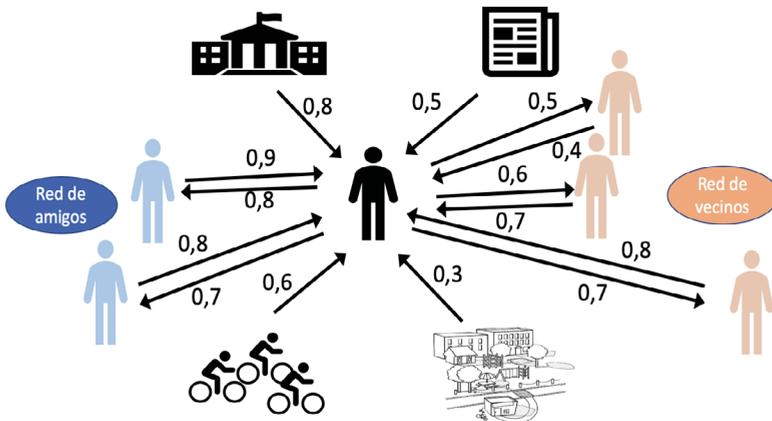
Los agentes ciudadanos son el elemento central en el modelo, y están caracterizados en función de sus variables sociodemográficas y de otras variables necesarias para su modelado. En concreto, el modelo psicosocial que se ha utilizado en este caso es el modelo de toma de decisiones HUMAT (Antosz, 2019). HUMAT considera tres tipos básicos de necesidades, a las que cada agente dará su importancia: las necesidades experienciales (que se refieren al confort y a aspectos económicos), las necesidades de pertenencia (es decir, de sentirse parte de un grupo), y los valores (que se refieren a metas sociales o bioesféricas). Cada agente toma una decisión sobre si aceptar o no la innovación social concreta en función de cómo satisface

sus necesidades esa aceptación y de la influencia que sobre él ejercen los demás agentes de la red social, que son agentes que pertenecen a su red de vecinos o amigos.

Entre los agentes ciudadanos las interacciones que tienen lugar son comunicaciones bidireccionales y en las que el modelo sopesa la confianza que un agente tiene en el otro, que no es necesariamente un valor simétrico. Sin embargo, las interacciones con los nodos críticos son únicamente unidireccionales, van desde el nodo crítico a los ciudadanos, y reproducen un plan de comunicaciones que el nodo crítico ha llevado a cabo en un tiempo determinado, con cierta cobertura e intensidad, y con una intención a favor o en contra de la innovación social. Ante estas comunicaciones, el agente ciudadano evalúa sus alternativas de comportamiento con el modelo HUMAT. Pero es posible que la alternativa de comportamiento (aceptar o rechazar la innovación social) elegida por el ciudadano no esté alineada con todas sus necesidades, de modo que puede generar ciertas disonancias cognitivas asociadas con sus necesidades individuales, que intentará solucionar a través de interacciones con su entorno. La **figura 10** ilustra esquemáticamente esta red de interacciones, mostrando los distintos agentes del modelo y sus enlaces, para los que los pesos entre 0 y 1 representan los niveles de confianza entre ellos. El funcionamiento detallado de esta red se encuentra descrito en Rodríguez-Arias (2024).

**Figura 10.**

**El esquema representa las comunicaciones entre cada agente ciudadano del sistema y los agentes de su red de vecinos y amigos, así como con los nodos críticos**



*Nota:* Los agentes ciudadanos se representan mediante siluetas humanas, mientras que los nodos críticos se representan con imágenes identificativas. Los enlaces indican las redes sociales que conectan a los ciudadanos, cada uno acompañado de un valor numérico entre 0 y 1 que refleja el nivel de confianza del agente origen hacia el agente destino señalado por la flecha.

El modelo representa una población mucho más grande y heterogénea que en el ejemplo anterior. Para la recogida de datos de ciudadanos se utilizó un cuestionario que fue elaborado por un grupo de psicólogos y sociólogos, en el que se recogían variables sociodemográficas (como por



Una vez que se dispone del modelo, se reconstruyen todas las comunicaciones públicas que, por parte de los nodos críticos y con el fin de informar de los cambios y avances del proyecto de supermanzanas, tuvieron lugar en Vitoria-Gasteiz durante la implementación del primer proyecto, y se trasladan al modelo de acuerdo con los parámetros afectados por dichas comunicaciones (a favor, en contra, amplitud, duración, dirigida a confort, dirigidas a salud, etc.). La idea es poder reproducir el proceso pasado lo más fielmente posible, para calibrar el modelo de forma adecuada antes de realizar simulaciones de escenarios alternativos. En primer lugar, se lleva a cabo una calibración local que elimina combinaciones de parámetros del modelo que generan simulaciones significativamente alejadas del proceso real. La validación del modelo se realiza mediante talleres con representantes de las entidades clave, identificadas como nodos críticos. Durante estos talleres, se presentan diversas simulaciones a los expertos, quienes las evalúan y filtran hasta seleccionar aquella que mejor representa la realidad. Una vez que se logró un modelo estable que, en opinión de los expertos, parecía reproducir fielmente lo ocurrido en el proceso original, se pasó a introducir en el mismo nuevas políticas que podrían mejorar la aceptabilidad.

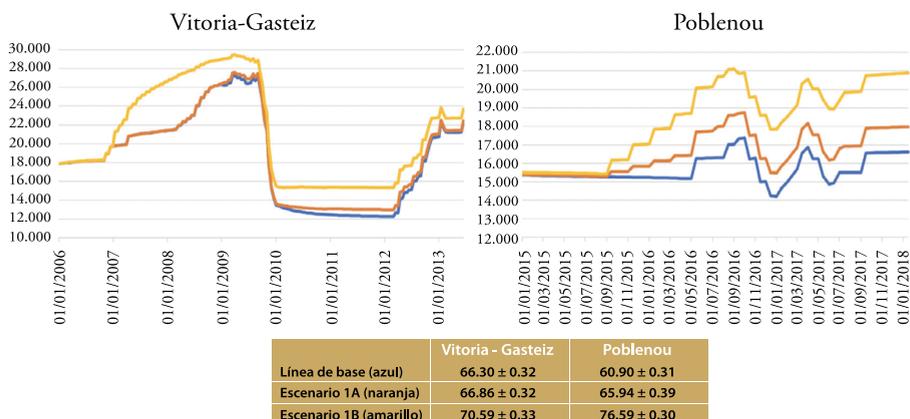
#### 4.2. Simulaciones de nuevas políticas de comunicación a la ciudadanía

En este caso, las personas responsables de diseñar las políticas de comunicación con los ciudadanos querían utilizar el MBA para evaluar el impacto de diversas políticas alternativas que pudieran mejorar la aceptación ciudadana de sus proyectos. La idea era explorar diferentes enfoques e intensidades en las comunicaciones con los ciudadanos para identificar las estrategias más efectivas. En el primer ejemplo, se analiza un escenario alternativo para un evento que ocurrió en noviembre de 2009, en el que la aceptabilidad del proyecto de supermanzanas en Vitoria-Gasteiz descendió considerablemente debido al impacto negativo de una nueva política de aparcamiento comunicada por el ayuntamiento con una estrategia que resultó inefectiva y se centraba en los beneficios de la movilidad sostenible y en el aumento de conciencia medioambiental. Como estrategia alternativa consideramos una estrategia de comunicación en la que el foco es abordar las necesidades específicas de los residentes, en dos escenarios alternativos. El escenario A refleja una campaña de comunicación que se enfoca al confort de los residentes, y el escenario B es un escenario con una campaña más agresiva que se anticipa al rechazo de los residentes, aumentando el alcance de población de la campaña original realizada por el ayuntamiento, pasando de un alcance bajo a uno alto, y donde se extiende además el período de comunicación, y la frecuencia de los mensajes duplicando su número y manteniendo al ayuntamiento activo durante todo el período. Como podemos ver en la [figura 12](#), el escenario 1A apenas mejora los resultados de aceptabilidad de la situación original en Vitoria-Gasteiz, mientras que, en el caso de Poblenu, en el que se ha desarrollado un MBA análogo, la mejora es mayor. El escenario 1B mejora la aceptabilidad aún más en el caso de Poblenu, y en el caso de Vitoria se produce una mejora algo mayor que con el escenario 1A.

Si en cambio optamos por una estrategia orientada a una sensibilización medioambiental y a un entorno ciudadano más participativo, obtenemos los resultados que se muestran en la [figura 13](#). Como vemos, esta estrategia no es útil en absoluto en Poblenu, en donde incluso con

Figura 12.

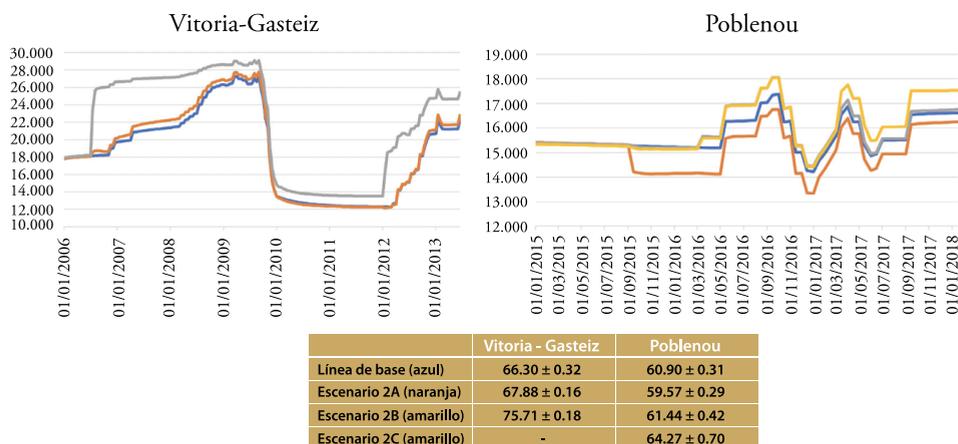
### Simulación del nivel de aceptación del proyecto con la implantación de políticas de comunicación diferentes a la situación original (en azul) para Vitoria-Gasteiz y Poblenu



*Nota:* En el eje x se representa el tiempo, y en el eje y el número de agentes que aceptan la política. El escenario 1A (naranja) enfoca la comunicación hacia favorecer las necesidades de confort, y en el 1B (amarillo) se mantiene el enfoque, pero se intensifica notablemente la estrategia de comunicación.

Figura 13.

### Simulación del nivel de aceptación del proyecto con la implantación de políticas de comunicación diferentes a la situación original (en azul) para Vitoria-Gasteiz y Poblenu



*Nota:* En el eje x se representa el tiempo, y en el eje y el número de agentes que aceptan la política. El escenario alternativo se enfoca a una estrategia de sensibilización ambiental, y a una aproximación participativa de los ciudadanos, intensificando las campañas en los escenarios B y C en cuanto a la estrategia de comunicación.

una intensificación aún mayor que en el caso anterior, la mejora es marginal. Sin embargo, en este caso la estrategia obtiene mejores resultados que la anterior para Vitoria-Gasteiz.

Como conclusión, a pesar de que el MBA desarrollado es exportable a otros entornos ciudadanos, nos permite captar las diferencias entre las diferentes poblaciones y buscar las políticas más adecuadas a cada caso.

## 5. MBA PARA LA SIMULACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE UN VIRUS EN FUNCIÓN DE LA ACEPTACIÓN DE LAS NORMAS DE CONTENCIÓN. EL PROYECTO CEDCOVID

En este último ejemplo<sup>4</sup>, veremos cómo modelar la aceptación de las normas por parte de una población en una epidemia puede ayudar en gran parte a la contención de esta. De hecho, varios estudios científicos (Horton, 2020), subrayan la importancia de la confianza de los ciudadanos en sus gobiernos, así como la solidaridad ciudadana, para explicar las diferencias entre los contagios y la mortalidad en los diferentes países durante la reciente pandemia de COVID-19.

Por lo tanto, en este tipo de estudios de propagación de un virus, además de la evolución que se extrae del modelo epidemiológico básico, es de vital importancia prever el comportamiento de los individuos frente a posibles medidas adoptadas para mitigar esta expansión viral. El principal problema de los modelos epidemiológicos clásicos es que la única información que define a un individuo es la relacionada con su estado epidemiológico, por lo que todos aquellos que se encuentran en el mismo estado se consideran idénticos (Korolev, 2020; Menda *et al.*, 2021). Para abordar el problema, nuestra propuesta es integrar un modelo epidemiológico clásico, en este caso el *SEIRD* –*Susceptible, Exposed, Infectious, Recovered and Dead en inglés*– (Anderson y May, 1992), con un MBA, de forma que cada agente en el modelo represente a un individuo con sus propias características, tanto en términos de variables sociodemográficas como de su estado epidemiológico. Las necesidades psicológicas de cada individuo y la importancia que les otorga determinan, en gran medida, si cumplirá o no con las medidas impuestas. De esta manera, ambos modelos se complementan por una parte tendríamos la propagación del virus en el modelo *SEIRD*, y por la otra el MBA nos permite incluir propiedades individuales que pueden afectar la expansión viral, desde acciones individuales hasta rasgos genéticos específicos.

Dado que los psicólogos y sociólogos consideran que la aceptación de las normas y políticas a aplicar en una pandemia dependen también de que se cumplan las necesidades de los individuos, se ha decidido adaptar el modelo HUMAT, que hemos descrito en el apartado anterior, para la toma de decisiones de los agentes, con ciertos cambios menores. En primer lugar, los agentes son individualizados utilizando las características sociodemográficas (como género, edad, tipo de familia, si es un trabajador esencial, si reside en el campo, salario, etc.), algunas de las cuales están relacionadas con aspectos de las políticas que se implementaron (los trabajadores esenciales debían seguir en su centro de trabajo, por ejemplo). Además,

<sup>4</sup> Ciencia e ingeniería de datos para la evaluación, predicción poblacional y personalizada de la evolución de la enfermedad COVID-19, <https://citic.udc.es/proyectos-id/?proyectoId=1062>

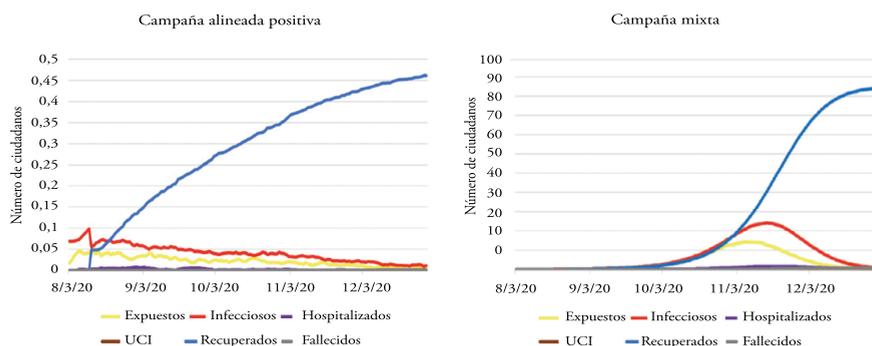
los psicólogos juzgaron como aspectos relevantes para la caracterización individual de los agentes la representación de sus necesidades, como su necesidad de bienestar y confort, así como la necesidad de pertenencia al grupo, que define la necesidad del agente de ser similar a otros miembros de su círculo y que tendrá un peso especial en las acciones que realice el agente. Finalmente, también se tendrán en cuenta las necesidades de interacción social de los agentes. El modelo concreto se describe en mayor detalle en (Rodríguez-Arias *et al.*, 2023). Como nodos críticos se han incluido el gobierno, la prensa, las asociaciones de empresarios y los partidos políticos.

Como ejemplo para las simulaciones hemos elegido la evolución de la pandemia de la COVID-19 en la ciudad de A Coruña. De nuevo, el equipo de psicólogos y sociólogos elaboró un cuestionario que contestaron casi 1.300 personas, cada una de las cuales se modeló como un agente en el MBA. Además, análogamente al caso del modelo en SMARTEES se crearon agentes que representan ciudadanos "sintéticos" creados a partir de los perfiles que se derivan de los árboles de decisión que se construyen sobre las respuestas de ciudadanos reales. Es importante recordar que los árboles actúan como punto de partida para el comportamiento de los agentes "sintéticos", simulando inicialmente el comportamiento de un ciudadano real correspondiente a su mismo nodo hoja, como se explicó en el modelo anterior. Sin embargo, este comportamiento evoluciona a lo largo de la simulación utilizando el modelo HUMAT, de manera similar a como ocurre con los agentes reales".

Como conclusiones generales, cabría destacar que los resultados de las simulaciones indican que la mortalidad hubiese sido mucho mayor sin medidas de contención del virus, y también que el resultado de la evolución es similar en los escenarios de confinamiento completo y en los de medidas menos agresivas, como el uso de mascarillas, distancia social, etc.

Figura 14.

**Simulación que compara la evolución del número de ciudadanos en cada estado considerado en el modelo SEIRD según la intención de los mensajes (positivos o negativos) recibidos por los ciudadanos**



Esta conclusión es análoga a la del caso del ejemplo del proyecto LOCAW, en el que vimos que se obtienen iguales o incluso mejores resultados con políticas menos agresivas, ya que los agentes son más proclives a cumplirlas. Como aspecto más específico de este caso, se realizó una simulación en la que los nodos críticos estaban alineados en cuanto al tipo de mensaje a enviar, mientras que en contraposición en otra simulación había ciertos actores en desacuerdo, propagando noticias negativas sobre las medidas (como la peligrosidad e ineficacia de las vacunas, remedios no científicos o inexistencia de la pandemia). Como podemos ver en la [figura 14](#), la evolución es mucho mejor en el escenario alineado positivo que en negativo.

## 6. CONCLUSIONES

En conclusión, el modelado basado en agentes en inteligencia artificial se perfila como una herramienta potente y muy versátil para poder analizar y entender sistemas complejos. Este enfoque permite la creación de simulaciones detalladas de interacciones entre agentes autónomos, que están situados en un entorno específico que podemos también simular, dando lugar a la aparición de comportamientos emergentes que surgen de las interacciones entre esos agentes, y que serían muy complejas de apreciar en otros modelos de simulación. Una opción interesante que hemos visto en los tres casos que hemos detallado es que con estos modelos es posible la generación de datos sintéticos que replican patrones de comportamiento observados en sistemas reales. En muchas áreas, como sería el caso de la economía, esta capacidad es particularmente valiosa porque facilita la exploración de posibles escenarios y el ensayo de políticas en un entorno controlado, sin riesgos reales para el sistema. Además, el modelado basado en agentes aumenta la libertad en la toma de decisiones, ya que permite adaptar los agentes a distintos perfiles psicológicos y sociales, obteniendo resultados que consideran factores humanos profundos y no meramente racionales.

Esta técnica abre nuevas posibilidades para ecosistemas sociales y económicos al permitir no solo predecir comportamientos futuros sino también evaluar el impacto de innovaciones, políticas y cambios regulatorios de manera mucho más precisa. En última instancia, los modelos basados en agentes ofrecen una visión integral y fundamentada de las dinámicas sistémicas, lo que los convierte en una herramienta de gran valor para quienes buscan aplicar la inteligencia artificial no solo en la ciencia y la tecnología, sino también en la toma de decisiones estratégicas en sectores como el financiero, el social o el ambiental.

## Referencias

- ALONSO-BETANZOS, A., GUIJARRO-BERDIÑAS, B., RODRÍGUEZ-ARIAS, A., y SÁNCHEZ-MAROÑO, N. (2021). Generating a synthetic population of agents through decision trees and socio-demographic data. En *International Work-Conference on Artificial Neural Networks* (128-140). Cham: Springer International Publishing.
- ANDERSON, R. M., y MAY, R. M. (1992). *Infectious Diseases of Humans: Dynamics and Control*. Oxford University Press.
- ANTOSZ, P., JAGER, W., POLHILL, G., SALT, D., ALONSO-BETANZOS, A., SÁNCHEZ-MAROÑO, N., GUIJARRO-BERDIÑAS, B., y RODRIGUEZ, A. (2019). *Simulation model implementing different relevant layers of social*

*innovation, human choice behaviour and habitual structures.* [https://local-social-innovation.eu/fileadmin/user\\_upload/Deliverables/SMARTTEES-D7.2\\_Simulation\\_model\\_DR1.pdf](https://local-social-innovation.eu/fileadmin/user_upload/Deliverables/SMARTTEES-D7.2_Simulation_model_DR1.pdf)

- BALCI, O. (1998). Verification, validation, and testing. *Handbook of simulation*, 10(8), 335-393.
- CAMPOS, P., RAO, A., y JOAQUIM, M. (2025). *Machine-Learning perspectives of agent-based models: Applications to economic crises and pandemics with Phyton R, NetLogo and Julia*. Springer International Pub.
- COLLINS, A., KOEHLER, M., y LYNCH, C. (2024). Methods that support the validation of agent- based models: An overview and discussion. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 27(1).
- HALL, M. A. (1999). Correlation-based feature selection for machine learning, Ph.D. Thesis, Permanent. <https://hdl.handle.net/10289/15043>
- HORTON, R. (2020). Offline: Science and the breakdown of trust. *The Lancet*, Vol. 396, Issue 10256, 945.
- KOROLEV, I. (2020). Identification and estimation of the SEIRD epidemic model for COVID-19. *J. Econom.*, Vol 220(1), 63-85. doi: 10.1016/j.jeconom.2020.07.038. Epub 2020 Jul 30. PMID: 32836680; PMCID: PMC7392128.
- MENDA, K., LAIRD, L., KOCHENDERFER, M. J. ET AL. (2021). Explaining COVID-19 outbreaks with reactive SEIRD models. *Scientific Reports*, vol. 11, 17905. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97260-0>
- QUINLAN, J. ROSS. (1993). *C4.5: programs for machine learning*. Morgan Kaufmann Publishers.
- RAILSBACK, S. F, y GRIMM, V. (2019). *Agent-based and individual-based modeling: A practical introduction*, 2nd edition. Princeton University Press.
- RODRÍGUEZ-ARIAS, A., ALONSO-BETANZOS, A., GUIJARRO-BERDIÑAS, B., y SÁNCHEZ-MAROÑO, N. (2023). *Agent-Based Model: Simulating a Virus Expansion Based on the Acceptance of Containment Measures.* <https://arxiv.org/pdf/2307.15723>
- RODRÍGUEZ-ARIAS, A., SÁNCHEZ-MAROÑO, N., B. GUIJARRO-BERDIÑAS, B., ALONSO-BETANZOS, A., LEMA-BLANCO, I, y DUMITRU, A. (2024). An agent-based model to simulate the public accep- tability of social innovations. *Expert Systems*, e13731, <https://doi.org/10.1111/exsy.13731>
- SÁNCHEZ-MAROÑO, N., ALONSO-BETANZOS, A., FONTENLA-ROMERO, O., BRINQUIS-NÚÑEZ, C., POLHILL, J. G., y CRAIG, T. (2015). Influence of internal values and social networks for achieving sustainable organizations. *Proceedings of the Twenty-First European Conference on Artificial Intelligence (ECAI 2014)*, 1179–1185. IOS Press.
- SÁNCHEZ-MAROÑO, N., ALONSO-BETANZOS, A., FONTENLA-ROMERO, O., BRINQUIS-NÚÑEZ, C., POLHILL, J. G., CRAIG, T., DUMITRU, A, y GARCÍA-MIRA, R. (2015). An agent-based model for simulating environmental behavior in an educational organization. *Neural Processing Letters*, Vol. 42, 89-118. DOI 10.1007/s11063-014-9390-5
- SÁNCHEZ-MAROÑO, N., ALONSO-BETANZOS, A., FONTENLA-ROMERO, O., POLHILL, J. G., y CRAIG, T. (2017). Empirically-derived behavioral rules in agent-based models using decision trees learned from questionnaire data. *Agent-Based modeling of sustainable behaviors* ( 53-76). Springer. DOI 10.1007/978-3-319-46331-5
- STEG, L., y DE GROOT, J. I. (2012). *Environmental values.* In: *The Oxford handbook of environ- mental and conservation psychology*. Oxford University Press.
- VAN ECK, P., y JAGER, W. (2010). Social network structures in agent-based modelling: finding an optimal structure based on survey data (or finding the network that does not exist). *Proceedings of the 3rd World Congress on Social Simulation WCSS2010, Kassel, Germany. 2010.*
- WU, J. (2012). *Advances in K-means clustering: a data mining thinking*. Berlin, Alemania: Springer-Verlag, ASIN: B010DPZNA8.
- YANG, Y., y WEBB, G. I. (2001). Proportional k-Interval Discretization for Naive-Bayes Classifiers. En L. De RAEDT y FLACH, P. (eds.), *Machine Learning: ECML 2001*. ECML 2001. Lecture Notes in Computer Science, vol 2167. Berlin: Springer Heidelberg.

