

Modelos Simulados, mediación virtual para el pensamiento complejo

Lecciones filosóficas desde la Vida Artificial

Xabier Barandiaran

xabier@barandiaran.net
http://barandiaran.net

Alvaro Moreno

alvaro.moreno@ehu.es
http://www.ehu.es/ias-research/moreno

*Dept. of Logic and Philosophy of Science, University of the
Basque Country, POBOX, 29900 / San Sebastian / Spain*

RESUMEN | Las metáforas de lo artificial (autómatas, relojes, robots) han venido a socorrer, desde el temprano pensamiento filosófico griego, la tensión epistemológica que genera la complejidad orgánica. Pero, más allá del ámbito meramente metafórico, el estudio de sistemas complejos es hoy impensable sin el uso de modelos simulados. Superando el estrecho margen metodológico atribuido a la modelización en la filosofía de la ciencia tradicional, analizamos los diversos usos epistémicos que, en el ámbito de la Vida Artificial, hacen de las simulaciones por ordenador verdaderas prótesis del pensamiento desnudo.

PALABRAS CLAVE | modelos simulados, complejidad, modelos conceptuales, emergencia, filosofía de la ciencia, mediación virtual

1. Introducción

La complejidad característica de los sistemas vivos ha sido objeto de fascinación durante gran parte de la historia del pensamiento. Esta fascinación va unida a una distinción intuitiva que penetra profundamente nuestra categorización del mundo entre lo animado y lo inanimado. División que refleja claramente la dificultad, por un lado, de proyectar las categorías de lo mecánico sobre un

dominio (lo viviente) que se resiste a tal formato y por otro de conciliar el modo de explicación (intencional, teleológica, ...) de lo animado con nuestra experiencia operacional, mecánica, controladora de lo inerte. Sin duda el concepto de *forma* en Aristóteles, despojado del dualismo platónico, es el que mejor consiguió apaciguar esa tensión y abrir el camino para un tratamiento sistemático de lo orgánico. Sin embargo, el mecanicismo (más bien maquinismo) cartesiano inauguró un dualismo radical entre la penetración mecanicista de lo orgánico y la siempre elusiva naturaleza del espíritu o la consciencia. Y lejos de agotarse en un dualismo ontológico es el propio método cartesiano el que desplaza la comprensión de lo complejo al dominio de la consciencia o, en su defecto, lo relega a lo inaprensible desde un a priori puramente metodológico. Y es que es precisamente la prescripción metodológica cartesiana de proceder de lo más simple hacia lo más complejo “suponiendo inclusive un orden entre aquellos que no se preceden naturalmente los unos a los otros”, lo que de hecho ha conducido a la exclusión de los sistemas complejos (reticulares, no-lineales, retroalimentados) del orden del discurso. Pero es Kant en la Crítica del Juicio de quien plantea el problema en su expresión más clara: el entendimiento no puede (más que apelando a la teología) penetrar la naturaleza de lo orgánico dada su circularidad causal (interpretada en términos de teleología interna).

Las metáforas de lo artificial (autómatas, relojes o robots) han venido a socorrer y suturar, desde el temprano pensamiento filosófico griego, la tensión epistemológica subyacente a estos dos modos de explicación. Pero el pesimismo epistemológico de Kant se enfrenta hoy a una alternativa paradójica: es la propia máquina (abstraída de su materialidad), la Máquina Universal de Turing, la que permite penetrar la naturaleza recursiva de lo orgánico. Y no precisamente desde la lógica universal automatizada, que ha permitido a muchos augurar el surgimiento de la Inteligencia Artificial, basada en la manipulación automática de símbolos y relaciones lógicas, sino desde la automatización del cálculo diferencial que permite traspasar los límites metodológicos de la mecánica clásica. Paradójicamente pues es la máquina la que permite acce-

Índice

1. Introducción.....	1
2. Modelos simulados y aperturas hacia lo complejo.....	2
2.1. Emergencia.....	3
2.2. Intratabilidad analítica.....	3
2.3. Interacciones intemivéticas.....	3
2.4. Intratabilidad experimental.....	3
2.5. El problema de la universalidad.....	4
3. El papel tradicional atribuido a los modelos en la ciencia.....	4
4. La modelización en Vida Artificial.....	5
4.1. Modelos mecanísticos.....	5
4.2. Modelos funcionales.....	5
4.3. Modelos genéricos.....	6
4.4. Modelos conceptuales.....	6
5. Conclusiones.....	7
Referencias.....	7

Copyright 2007 Xabier Barandiaran y Álvaro Moreno: Este artículo está licenciado bajo los términos de la licencia de Creative Commons Atribución-CompartirIgual. Usted es libre de copiar, distribuir y comunicar públicamente este artículo así como de hacer obras derivadas siempre y cuando se respete la autoría del artículo y se distribuya bajo los términos de esta misma licencia. Los términos específicos de esta licencia están disponibles en: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/es/legalcode.es>

Enviado, a 15 de Marzo de 2007, para publicación en la revista *Ontology Studies / Cuadernos de Ontología*.

Este artículo puede descargarse de la siguiente dirección: http://barandiaran.net/textos/modelos_simulados

der científicamente a lo orgánico.

Los modelos de simulaciones por ordenador son hoy lugar común en ciencia. La literatura sobre el papel epistémico de los modelos simulados en filosofía de la ciencia ha sufrido un *boom* extraordinario en los últimos años que invitan a replantear los límites de lo cognoscible a través de la mediación virtual que la computadora ofrece al pensamiento. Bien es cierto que muchos modelos simulados adoptan una función parecida a la de los modelos matemáticos en ciencia tradicional, con la única diferencia de que las ecuaciones que componen el modelo no pueden resolverse analíticamente y el modelo simulado hace las veces de laboratorio numérico para lo que viene a llamarse un análisis cualitativo del modelo. Los modelos actúan como mediadores entre teorías y experimentos empíricos permitiendo el desarrollo de predicciones e hipótesis y sucesivos ajustes de la teoría a través del modelo.

Sin embargo existe toda una serie de modelos simulados por ordenador que no tiene como referente un objeto o fenómeno empírico determinado (no existe una dirección de ajuste hacia ningún observable concreto). Este es el caso de muchos de los mundos virtuales utilizados en el campo de la Vida Artificial para estudiar algunos de los principios organizativos emergentes de la organización biológica y cognitiva. La paradoja surge al intentar comprender cómo estas simulaciones pueden aportar conocimiento alguno sobre la realidad si su naturaleza formal-computacional impide transgredir el límite de la deducción formal. Y son precisamente las categorías a priori del entendimiento humano las que se ven transformadas por estas prótesis del pensamiento desnudo que son los ordenadores.

Defenderemos que estos mundos virtuales actúan a menudo como *modelos conceptuales simulados* para esclarecer y desarrollar las relaciones entre conceptos en el campo de los sistemas complejos en los que las interacciones no-lineales y recurrentes entre sus componentes los hace difícilmente penetrables al pensamiento lingüístico humano. Es por ello que algunos investigadores han acuñado el término *experimento mental opaco* (Di Paolo et al. 2000) para caracterizar el papel epistemológico que juegan dichos modelos en la investigación científica. A diferencia de los experimentos mentales tradicionales que operan en condiciones conceptuales transparentes (evidentes para el pensamiento humano ---Dennett 1994), los modelos conceptuales simulados exigen todo un proceso explicativo (en términos hipotético-experimentales con el propio modelo) para arrojar luz sobre las complejas relaciones que se establecen entre sus componentes. Analizamos la necesidad, ventaja y estructura epistemológica del uso de modelos simulados en ciencia, distinguiendo cuatro usos fundamentales: mecanístico, funcional, genérico y conceptual (Barandiaran & Moreno 2006). Los modelos de esta última categoría (los conceptuales) resultan de especial interés ya que permiten el ejercicio de prácticas filosóficas como las pruebas de concepto, clarificación conceptual, establecimiento de relaciones entre teo-

rías (o relaciones inter-nivélicas), y reducción al absurdo.

2. Modelos simulados y aperturas hacia lo complejo

Es lugar común en filosofía de la ciencia que comprender los sistemas complejos exige modelos simulados por ordenador. Pero... ¿Qué es exactamente un modelo simulado? Para responder a esta cuestión debemos empezar por comprender el instrumento en el que implementamos materialmente el modelo. Un ordenador es una máquina que tiene un número inmenso de estados binarios que son, gracias al procesador, recombinables y transformables muy rápidamente a voluntad, expresada ésta en una plantilla o programa. En definitiva un ordenador no es más que la realización física de una idealización matemática, la Máquina Universal de Turing, a cuyo funcionamiento podemos reducir casi la totalidad de los problemas y procedimientos formalizables.

Por lo tanto un ordenador puede computar cualquier proceso cuyo mecanismo conozcamos suficientemente bien (es decir, que pueda expresarse formalmente). Al proceso de *reproducción* en la máquina de la estructura formal de un determinado proceso se le llama *simulación*. Sin embargo, cualquier representación computacional/formal de un sistema natural no entra dentro de la categoría de simulación, el concepto clave es el de reproducción. Pongamos como ejemplo el clásico ejercicio de programación de encontrar el camino más corto desde una estación de metro a otra partiendo de un mapa. Muchos de los procedimientos formales para resolver este problema parten de una representación lógica de la red de líneas de metro, sus intersecciones y sus estaciones, asumiendo una distancia igual entre estaciones y un coste de tiempo equivalente entre intercambios. Si la red es suficientemente simple pueden encontrarse todos los caminos posibles, clasificarlos de acuerdo con el número de estaciones e intercambios necesarios para llegar al destino y tomar como respuesta el trayecto más corto. Este proceso deductivo y comparativo puede implementarse fácilmente en un ordenador. Sin embargo no es a este tipo de programas a los que característicamente se les atribuye el término de simulación. La deducción se realiza sobre las propiedades topológicas de la red de metro (lógicamente formalizadas): los caminos no deben ser "recorridos" en la representación del mapa, basta con un "recuento" de las estaciones intermedias. Sin embargo si la red del metro es suficientemente compleja el número de recorridos posibles sufre una explosión combinatoria exponencial. Si, además, queremos dotar a esta representación del metro de un realismo más detallado, tendremos que tener en cuenta factores adicionales como la velocidad de los trenes, las distintas a recorrer dentro de los intercambiadores, el número de gente que se amontona en las paradas, etc. Puede, por tanto, darse el caso de que la única forma de resolver el problema del camino más corto sea la de representar los mecanismos que

rigen el *comportamiento* de los trenes y los pasajeros de forma detallada, y *reproducir* el comportamiento de miles de agentes (usuarias del metro) recorriendo caminos alternativos de forma masiva y observar, después de un largo periodo de cómputo, cuál de las estrategias de los agentes resulta, estadísticamente, más ventajosa. Y es precisamente a este tipo de programas y a su implementación a lo que generalmente se refiere el término *simulación*: una reproducción (más o menos detallada) de los procesos subyacentes de un problema, de tal modo que diferentes alternativas pueden ser exploradas a través de la recreación de varias condiciones.

La diferencia entre la simulación y la inferencia deductiva de carácter lógico-formal es precisamente la que permite distinguir y caracterizar a los sistemas complejos. Abordar en detalle las propiedades de dichos sistemas así como su dificultades de modelizado constituye el objeto de las siguientes secciones. Sólo así podremos abordar con precisión el modo específico en que las simulaciones devienen mediación imprescindible para el pensamiento de los sistemas complejos.

2.1. Emergencia

Una de las propiedades características de los sistemas complejos es que generan estructuras y fenómenos emergentes: es decir, no analíticamente deducibles de su estructura subyacente. La razón es doble. Por un lado, múltiples componentes interactúan recurrentemente ("nivel micro") para generar un patrón global ("nivel macro"); piénsese en múltiples agentes que viajan en el metro para generar el flujo de viajeros o las moléculas interactuando en patrones de autoorganización físico-química. Por otro lado, la interacción entre componentes es no-lineal (pequeños cambios pueden implicar grandes consecuencias o, por el contrario, no tener prácticamente ninguna) debido a que los efectos de un componente (agente o molécula) se propagan por la red de la forman parte. Pero además de las relaciones no-lineales entre componentes internos, muchos sistemas complejos exhiben también fenómenos emergentes en su interacción recurrente con el entorno. Esto significa que para comprender la dinámica del sistema en su entorno no podemos analizar los componentes por separado y agregarlos después ya que el fenómeno es el resultado de sus interacciones recurrente (el todo es más que la suma de las partes). Ni podemos estudiar el sistema aislado de su entorno, porque sistema y entorno forman un todo integrado.

2.2. Intratabilidad analítica

Como consecuencia de su naturaleza integrada y emergente, los sistemas complejos no resultan analíticamente tratables. Se dice que un sistema es analíticamente tratable cuando puede construirse un modelo matemático que puede resolverse analíticamente para predecir el comportamiento del sistema. Las ecuacio-

nes pueden en ese caso resolverse de tal modo que el estado del sistema puede calcularse directamente para cualquier valor del tiempo. Los ejercicios típicos de física de secundaria (el cálculo de la trayectoria de un proyectil) pertenecen a esta clase; pero también muchos de los desarrollos más sofisticados de la física cuántica, electromagnética o astronómica. Sin embargo, los sistemas complejos no pueden modelizarse con ecuaciones analíticamente resolubles. La causa eficiente, entendida como condición inicial no permite predecir el estado del sistema. He ahí la versión matemática del límite Kantiano para con el entendimiento de lo orgánico. Para afrontar este problema (cuya primera manifestación relevante en la ciencia es el problema de los tres cuerpos en la mecánica clásica) el matemático Poincaré desarrolló hace un siglo un método para resolver este problema: el análisis cualitativo a través del cálculo numérico. Y es precisamente el cálculo numérico lo que constituye el núcleo de la mayoría de las simulaciones; es decir, la reproducción (por cada unidad infinitesimal de tiempo) el estado del sistema y las interacciones entre todos sus componentes. Este tratamiento requiere una gran capacidad computacional que sólo recientemente ha podido generalizarse gracias al aumento exponencial de la capacidad de cálculo de los sistemas informáticos.

2.3. Interacciones internivélicas

Hasta ahora hemos tratado los sistemas complejos haciendo referencia a un único nivel de organización y una única escala temporal pero ningún sistema medianamente complejo puede eludir el efecto de múltiples niveles de causalidad entrelazados. Por un lado diferentes escalas temporales convergen en la formación y despliegue de un fenómeno; un caso paradigmático de entrelazamiento de dos escalas temporales diferentes lo encontramos en los organismos vivos en los que la plasticidad ontogenética (desarrollo y aprendizaje) aparecen íntimamente imbricados con la plasticidad filogenética (evolutiva). Por otro lado diferentes niveles de organización participan a menudo en la realización de muchos sistemas: la interacción entre las escalas individuales y sociales es un ejemplo paradigmático en los comportamientos colectivos; pero incluso en los fenómenos cognitivos más elementales participa una jerarquía anillada de niveles causales genéticos, metabólicos, neuronales, cerebrales, corporales y ambientales. La virtud de una simulación en relación a las relaciones internivélicas (temporales y organizativas) reside precisamente en su capacidad de integración de estos niveles de causalidad en un mismo modelo computacional.

2.4. Intratabilidad experimental

Otra de las características de los sistemas complejos que los hace resistentes a una investigación científica sistemática es su intratabilidad experimental. Esta intratabilidad aparece por varios motivos.

1. *Motivos materiales*: es difícil o incluso imposible conseguir las necesarias condiciones de control para experimentar de forma repetible (pongamos por caso en la reproducción, bajo condiciones de control, de todos los factores que generan un huracán, o las condiciones evolutivas del precámbrico)
2. *Motivos derivados de su naturaleza emergente*: que el fenómeno sea el resultado de un enorme número de variables (como las que pueden darse en el cerebro humano) supone en sí mismo una dificultad experimental considerable, pero a eso tenemos que añadir también las dificultades derivadas de aislar a un sistema de su entorno para un estudio controlado (piénsese en los experimentos psicológicos con animales fuera de su hábitat natural y las limitaciones experimentales derivadas de estudiarlos en su propio contexto).
3. *Motivos de precisión*: la naturaleza no lineal de los sistemas complejos hace que su comportamiento se encuentre al límite del caos, entendido éste como una divergencia exponencial de la evolución del sistema partiendo de condiciones iniciales (y de contorno) infinitesimalmente pequeñas. Una precisión infinitesimal de dichas condiciones puede ser en muchos casos imposible de alcanzar con los sistemas de medición y control disponibles.
4. *Motivos económicos*: a las dificultades anteriores hay que añadir (muchas veces derivada de ellas) la no menos importante dificultad económica que supone el control y la reproducción experimental sistemática en términos de personal, tiempo, dinero, y energía necesaria para someter a dichos sistemas a un riguroso proceso experimental.
5. *Motivos éticos*: finalmente consideraciones de tipo ético pueden sobreponerse a las dificultades anteriormente mencionadas. Podemos poner como ejemplo los límites éticos que nos impiden la experimentación sistemática con animales o humanos o la intervención impredecible sobre los ecosistemas que habitamos.

Frente a estas dificultades experimentales que presentan los sistemas complejos naturales las simulaciones computacionales pueden construirse en base al conocimiento existente de los componentes "simples" del sistema complejo y sus relaciones, simplificando considerablemente los problemas de experimentación con el sistema como un todo. Al estar codificados todos los estados, relaciones y parámetros del sistema en el ordenador pueden hacerse exploraciones exhaustivas del comportamiento y los estados del sistema, reiniciar el modelo con valores diferentes, alterar con mucha precisión diferentes parámetros de control, etc. A

esto hay que añadir que las simulaciones por ordenador permiten que las mediciones y el tratamiento de los datos se puedan además automatizar. Además el modelo simulado se utiliza, a menudo, en combinación con la experimentación directa: el modelo sirve para explorar y diseñar posibles experimentos cuando la experimentación es costosa, reduciendo la variabilidad de condiciones experimentales a unas pocas: precisamente a aquellas que (bajo el conocimiento adquirido por la simulación) permitan mostrar comportamientos clave que desvelen algunos de los factores causales determinantes del comportamiento del sistema.

2.5. El problema de la universalidad

Los sistemas complejos que conocemos son (muchas veces) el resultado de la cristalización de contingencias históricas (p.e. la evolución natural). Sin embargo la ciencia aspira a lo universal, a patrones y regularidades que permitan extrapolar el conocimiento adquirido de los casos concretos estudiados a un dominio más amplio de fenómenos aún desconocidos. En palabras del fundador de la vida artificial se trata de poder llegar a comprender "no tanto la vida-tal-y-como-la-conocemos sino la vida-tal-y-como-fuera-posible" (Langton 1989). Un modelo simulado permite transformar el conjunto de parámetros contingentes en los que está "anclado" lo conocido (lo real) y explorar el espacio de lo posible en busca de patrones universales o regularidades generalizables que permitan un conocimiento más general y profundo.

3. El papel tradicional atribuido a los modelos en la ciencia

En la concepción tradicional los modelos constituyen la mediación entre la teoría y el mundo empírico. Los modelos se elaboran a partir de construcciones conceptuales más generales y abstractas (lo que llamamos "teorías") y contienen hipótesis predictivas, las cuales son confrontadas con observaciones sobre ámbitos específicos del mundo. En este proceso los modelos son reajustados, pero en segundo término, es la propia teoría de la que dependen la que es evaluada.

La ciencia clásica se ha basado en un concepto de modelización que consiste en construir funciones matemáticas que permitan, a partir de un conjunto de observables obtenidos por medición (y que definen el estado del sistema en un momento dado) averiguar el estado (futuro o pasado) del sistema mediante la deducción del valor de las variables del modelo como correspondientes al valor de los observables. Como expresara H. Hertz (1956:1894), hace más de un siglo el conocimiento científico acerca del mundo empírico se articula en forma de modelos simbólicos, que este autor denominaba "imágenes". Hertz distinguía entre una parte lógico-formal (esto es, expresiones matemáticas)

una parte “semántica” (esto es, el significado empírico de la parte formal) y otra parte intencional (esto es, la elección del objeto de estudio). Primero hemos de construir una imagen simbólica de los objetos a estudiar; pero lo sustancial para considerar a un modelo como bueno es que la forma que hemos de dar a tales símbolos sea tal que las necesarias consecuencias de las imágenes en el pensamiento se correspondan siempre con las consecuencias necesarias de las cosas en la naturaleza.

La esencia de esta idea de modelización es la separación entre estados (cuyos primeros valores son lo que se denominan condiciones iniciales) y relaciones (leyes). Las relaciones (funciones) establecen vínculos entre estados en momentos sucesivos de tiempo. Así, a partir de una información muy reducida sobre el sistema se puede predecir una gran cantidad de comportamientos. La experiencia juega posteriormente una función evaluadora (a través de procesos que pueden ser muy largos y complicados). Pero la idea esencial es que cuando disponemos de un modelo supestamente bueno, una vez que el estado completo de un sistema ha sido elegido asignando las condiciones iniciales en un instante dado, toda información adicional acerca de un estado del sistema anterior o posterior a éste es mera redundancia. Esto es, ninguna predicción mejor acerca del pasado o del futuro puede ser hecha, en principio, por el aporte de más información.

Esta manera de entender la modelización ha permitido el desarrollo de las ciencias tradicionales. La construcción de modelos simplificados de un determinado ámbito de lo real, es la expresión clásica de ello. Resolver problemas ha consistido en buscar la forma de construir modelos simplificados. Dentro de este esquema, un paradigma, en el sentido de Kuhn, sería un estilo, un conjunto de principios de construcción de modelos y el cambio de paradigmas, un cambio en dichos principios.

Sin embargo, esta metodología no ha funcionado en el caso de los sistemas complejos, por las razones que se han explicado anteriormente. Como ya dijimos, el desarrollo de las simulaciones computacionales ha permitido una forma nueva de construir modelos de sistemas complejos. Veremos en el punto siguiente de qué manera esta nueva forma de modelización cambia los supuestos metodológicos y epistemológicos de la modelización tradicional.

4. La modelización en Vida Artificial

En el estudio de los sistemas complejos en general y de la Vida Artificial en particular, los modelos operan de forma distinta en tres sentidos: 1) los propios modelos, en el curso de su despliegue como simulación computacional, generan información para el investigador (en el sentido de datos que éste no puede deducir directamente del programa y que requieren más teoría, incluso experimentación, para ser comprendidos); 2) los modelos son

ellos mismos sistemas complejos que requieren ser explicados e interpretados; y 3) a veces, los modelos ni siquiera tienen un referente empírico directo (con lo que se pierde el estatus de mediadores entre teorías y experimentos empíricos).

Pero dentro de estos rasgos generales vamos a ver que los modelos de Vida Artificial pueden tener diferentes características y usos epistémicos, según la posición que el modelo ocupe entre la teoría y los datos empíricos. Veamos ahora cuatro tipos diferentes de modelos en VA: a) Modelos simulados mecanísticos, b) Modelos simulados funcionalistas, c) Modelos simulados genéricos y d) Modelos simulados conceptuales.

4.1. Modelos mecanísticos

Este tipo de modelos es característico de la práctica científica más especializada, como la neurociencia computacional o la biología sistémica. Son modelos realistas de una parte de un determinado sistema natural o de una conducta determinada. Un buen ejemplo de este tipo de modelos es la simulación detallada de los diversos procesos que participan en la conducta quimotáctica de la bacteria *e-coli* (concentraciones químicas, movimiento browniano, procesos genéticos) realizado por el grupo de Dennis Bray en la universidad de Cambridge (Shimizu et al. 2000)¹. En los modelos mecanísticos existe una relación de correspondencia entre las variables del modelo y los observables del fenómeno natural modelado. En el ejemplo mencionado las especies moleculares y sus concentraciones, el número y tipo de genes así como las proteínas codificadas son mapeados isomórficamente en el modelo, es decir con una correspondencia directa entre variables del modelo y observables naturales.

El valor epistémico de estos modelos reside en la posibilidad de averiguar la estructura causal del sistema objeto mediante la manipulación y selección de las variables relevantes. Para ello es preciso integrar una serie de contingencias junto con la autoorganización de patrones que forman el fenómeno natural objeto de estudio. La gran ventaja sobre los modelos tradicionales es que, cuando esto se consigue, es posible realizar una experimentación intensiva, sistemática y automatizable sobre el modelo en vez de sobre el sistema natural.

4.2. Modelos funcionales

Se trata de modelos más abstractos, que no analizan un sistema natural específico, sino una clase genérica de sistemas considerados desde una perspectiva funcional o conductual. Un buen ejemplo es el trabajo de Vickerstaff y Di Paolo (2005) sobre la capacidad de búsqueda del camino a casa en el caso de las hormigas

¹ Trabajo de modelización por el que obtuvieron el premio *Microsoft European Science Award* del 2006 otorgado por la Royal Society británica y la Académie des Sciences francesa.

del desierto (las cuales carecen de señales locales que les permitan reconocer un recorrido de vuelta). El modelo desarrolla una evolución artificial de un controlador neuronal para la integración de rutas y descubre que la misma arquitectura neuronal es capaz de integrar el camino de vuelta y de hacer una búsqueda en la vecindad del hormiguero para corregir el posible error del cálculo de vuelta al punto de partida (algo que se creía que requería un módulo cerebral especializado y diferente del circuito encargado de buscar el camino de regreso).

En los modelos funcionalistas no hay una correlación entre los observables específicos de los mecanismos internos de los sistemas naturales del tipo estudiado y las variables estructurales en el modelo, solamente de la conducta o función que se está modelando. Generalmente se usan Algoritmos Genéticos y otras técnicas de optimización para obtener los resultados funcionales deseados, aunque dichos mecanismos sean diferentes de los que operan en los sistemas naturales. Naturalmente, la futura aplicación de estos modelos para la explicación del funcionamiento de los sistemas naturales requiere un análisis y una experimentación de las soluciones optimizadas. Pero en todo caso, estos modelos permiten testar diferentes hipótesis sobre los mecanismos responsables de una función o conducta, y evaluar qué factores ambientales y/o corporales participan en la estructura causal de la conducta o funcionalidad global. En el caso de estudio anteriormente mencionado el modelo simulado (que ajusta sus resultados a la conducta de la hormiga) permite demostrar, al menos, que los mecanismos que gobiernan las dos conductas (integración del camino de vuelta y búsqueda local) no tienen porqué ser necesariamente diferentes, permitiendo a los neuroetólogos ajustar sus hipótesis empíricas a lo que ha sido demostrado que es funcionalmente posible.

4.3. Modelos genéricos

Estos modelos son constructos computacionales sin referencia específica a un determinado dominio empírico. Su forma y dinámica estructural se suele seleccionar en virtud de su parecido con un amplio abanico de fenómenos naturales; lo que P. Humphreys llama “moldes computacionales” que son aplicables a diferentes dominios (Humphreys 2002). Entre los múltiples ejemplos de este tipo de modelos podemos citar las redes booleanas aleatorias, autómatas celulares, osciladores acoplados, redes libres de escala, y un largo etcétera.

Su valor epistémico reside en su capacidad para descubrir propiedades abstractas y genéricas de los sistemas complejos (redes, sistemas dinámicos, sistemas multiagente, etc.). Un ejemplo de ello es el descubrimiento del *parámetro lambda* (Langton 1990) que mide la relación de actividad entre los componentes de una red y permite establecer la transición entre lo ordenado y lo caótico, una propiedad genérica de los sistemas complejos indepen-

diente de su funcionalidad, mecanismo o dominio concreto en el que aparezca.

4.4. Modelos conceptuales

Los modelos conceptuales constituyen el tipo más original y específico de modelos simulados en Vida Artificial. Los modelos conceptuales no son modelos de propiedades genéricas ni de objetos empíricos del mundo real, sino de relaciones conceptuales dentro de o entre diferentes teorías. Por ejemplo, en ciencias cognitivas son modelos que estudian las relaciones abstractas entre diferentes estructuras conductuales (cuerpo y espacio), entre diferentes niveles de análisis (cerebral y conductual, bioquímico y representacional, etc.) y en teoría evolutiva estudian relaciones de mapeo genotipo-fenotipo, neutralidad y máximos locales, evolución y desarrollo, etc. Un buen ejemplo de modelo conceptual es el trabajo de Mills y Watson (2005) en el que estos autores demuestran que la asimilación genética es suficiente para producir el llamado “efecto Baldwin” (Hinton & Nowland 1987) y que la canalización no es necesaria.

La función epistémica de los modelos conceptuales es la investigación experimental con relaciones conceptuales complejas; lo que Di Paolo y colegas llaman “experimentos mentales opacos” en contraposición a los experimentos mentales tradicionales que funcionan gracias a la transparencia (para el entendimiento humano) de su estructura lógico-lingüística (Di Paolo et al. 2001). Podemos clasificar el uso de modelos simulados conceptuales en cuatro categorías principales. La primera y más evidente es la de la *clarificación conceptual*. La definición de conceptos y sus relaciones (especialmente entre los que se aplican a sistemas complejos) es, a menudo, difícil de formalizar o explicitar lingüísticamente. Para desarrollar una discusión productiva sobre ellos la creación de modelos simulados es de gran ayuda. El concepto de autopoiesis es un ejemplo paradigmático ilustrado con una de las primeras simulaciones de Vida Artificial en 1974 (Varela, Maturana & Uribe 1974). También numerosos trabajos conceptuales o filosóficos sobre el concepto de emergencia han hecho uso de modelos simulados. Así el/los modelo/s se convierten en un *ring* conceptual en el que se proponen modificaciones, medidas, condiciones necesarias y suficientes, etc. para discutir, rechazar o clarificar el concepto.

Otro uso generalizado de las simulaciones conceptuales es el de la *prueba de concepto*. Por ejemplo, en el estudio de los mecanismos del aprendizaje, los neurobiólogos tienden a considerar que la plasticidad sináptica es un mecanismo necesario para que tenga lugar el aprendizaje. Sin embargo, modelos simulados de robótica evolutiva (Harvey et al. 2005) han demostrado que la actividad neuronal sin presencia de plasticidad sináptica es suficiente para generar conductas de aprendizaje. El papel epistémico que juega el modelo en este caso es la exploración del espacio de lo

posible (dados unos presupuestos determinados; p.e. mecanismos cognitivos sin plasticidad sináptica), de tal modo que puede discernirse con gran precisión qué presupuestos son suficientes para generar un resultado determinado; e.d. probar que, dados ciertos presupuestos, cierto resultado es al menos posible. Esto permite generar hipótesis (cuya consistencia teórica ha sido demostrada en la simulación) que luego se puedan contrastar con experimentos de carácter empírico.

Los modelos simulados también son útiles para *estudiarlas relaciones entre diferentes niveles o dominios conceptuales*: ontogénicos y filogenéticos, escalas individuales y colectivas, mecanismos y conducta, aprendizaje y evolución. Se trata aquí no tanto de modelizar un fenómeno natural en concreto, sino de modelizar relaciones entre conceptos; e.d. modelizar los conceptos de las teorías mismas. Así, el uso de modelos simulados ha permitido desentrañar la compleja relación existente entre el aprendizaje y la evolución (los modelos del efecto Baldwin mencionados anteriormente) sin que el modelo parta del estudio de ninguna especie en concreto sino de los conceptos teóricos de herencia, reproducción, selección y variabilidad ontogénica.

Finalmente la *reducción al absurdo* (una de las metodologías más características de la filosofía) también puede realizarse utilizando modelos simulados en el campo de los sistemas complejos. Lo que permite en este caso el modelo es partir de una serie de premisas aceptadas, implementarlas en el ordenador y dejar que sea la simulación (a través del cálculo recurrente e intensivo) quien extraiga las consecuencias que, de otro modo, no serían accesibles al pensamiento humano.

5. Conclusiones

El uso de modelos conceptuales simulados introduce una nueva dimensión de lo virtual, no ya como sustituto de lo real (en el sentido de los modelos tradicionales en ciencia), sino como sustituto del pensamiento desnudo. Aparece así un nuevo nivel de mediación en el que pensamiento, virtualidad y realidad se encuentran imbricados de forma irreversible para abrir nuevos horizontes epistemológicos. No sólo la ciencia sino la filosofía misma se ve transformada en este proceso, convirtiendo al ordenador en verdadera prótesis filosófica (Moreno 2002) capaz de reconstruir, relacionar y explorar el espacio de lo posible y lo complejo de formas antes imposibles de imaginar. Ello permite superar ciertos límites del método tradicional y hacer comprensible la complejidad de lo orgánico. O, más bien, es el comprender el que se expande, abarcando no sólo la cogitación aislada de la consciencia sino la extensión de una práctica de modelado que integra a la máquina en el propio proceso de pensamiento: una vuelta a la caverna de Platón para que un nuevo juego de luces y sombras permita arrojar luz sobre las sombras del exterior y liberarnos así de las ataduras de lo complejo.

Referencias

- Barandiaran X. & Moreno, A. (2006): Alife as epistemic artefacts. En Rocha, L.M., Jaeger, L.S., Bedau, M.A., Floreano, D., Goldstone, R.L. and Vespignani, A. (eds) *Artificial Life X: 10th International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems*. MIT Press. pp. 513—519.
- Dennett, D. (1994): *Artificial Life as Philosophy*. *Artificial Life* 1(3): 291—292.
- Di Paolo, E. A., Noble, J. & Bullock, S. (2000): Simulation models as opaque thought experiments. *Artificial Life VII: The Seventh International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems*, Reed College, Portland, Oregon, USA, 1-6 August, 2000.
- Fox Keller, E. (2005). *The Century Beyond the Gene*. *Bioscience* 30(1): 3—10.
- Harvey, I., Di Paolo, E. A., Tuci, E., Wood, R., & Quinn, M. (2005). Evolutionary robotics: A new scientific tool for studying cognition. *Artificial Life* 11(1-2): 79—98.
- Hertz, H., (1956): orig. 1894). *The principles of mechanics, presented in a new form*. Nueva York: Dover,
- Hinton, G. E. & Nowlan, S. J. (1987) How learning can guide evolution. *Complex Systems* 1: 495—502.
- Humphreys, P. (2002) *Computational Models*. *Philosophy of Science* 69: S1—S11.
- Langton, C. (1989) *Artificial Life*. En Langton, C. (Ed.), *Artificial Life*. Redwood City CA: Addison-Wesley, pp.1—47.
- Langton, C. (1990) Computation at the edge of chaos, *Physica D*, 42:12—37.
- Mills, R. & Watson, R. A. (2005) Genetic assimilation and canalization in the Baldwin effect, *Proceedings of the Eighth European Conference on Artificial Life*, pp. 353—362.
- Moreno, A. (2002): *Philosophy of Artificial Life*. *Leonardo* 35:(4) pp 401-405.
- Shimizu, T. S., Le Novère, N., Levin, M. D., Beavil, A. J., Sutton, B. J., & Bray, D. (2000). Molecular model of a lattice of signalling proteins involved in bacterial chemotaxis. *Nat. Cell Biol.* 2, 792-796.
- Varela, Francisco J.; Maturana, Humberto R; & Uribe, R. (1974). Autopoiesis: the organization of living systems, its characterization and a model. *Biosystems* 5:187—196.
- Vickerstaff, R. J., & Di Paolo, E. A. (2005). An evolved agent performing efficient path integration based homing and search. *Proc. ECAL 2005*, Springer Verlag, pp. 221—230.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecemos la financiación de los proyectos: 9/UPV00003.230-15840/2004 (UPV-EHU) y HUM2005-02449 y BFU2006-01951/BMC (Ministerio de Educación y Ciencia). X. B. disfruta de un contrato predoctoral del Gobierno Vasco., BFI03371-AE.