



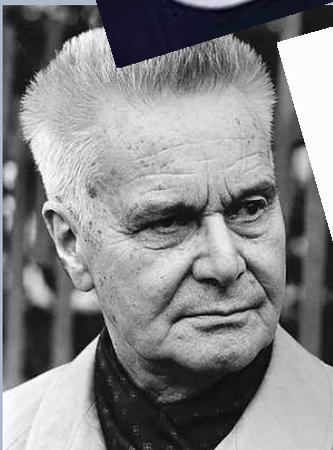
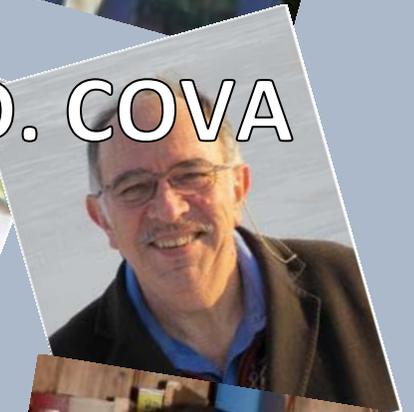
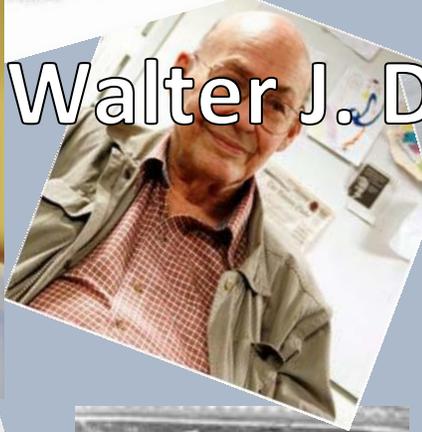
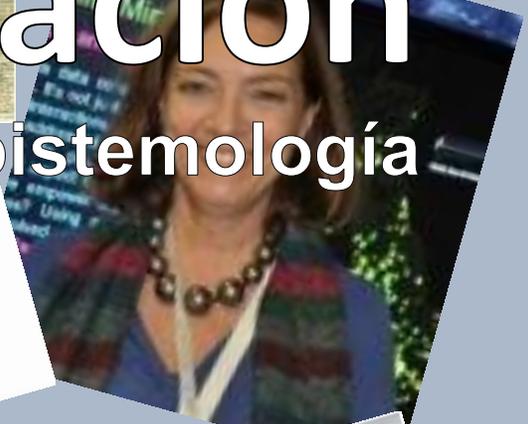
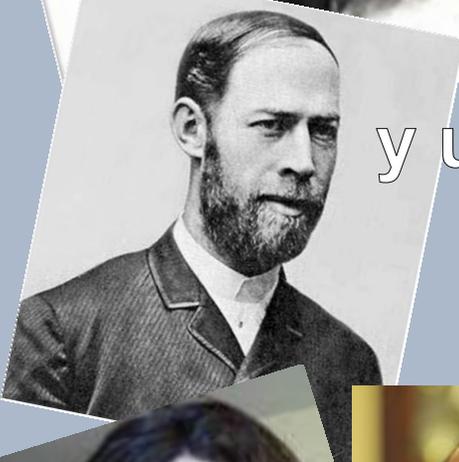
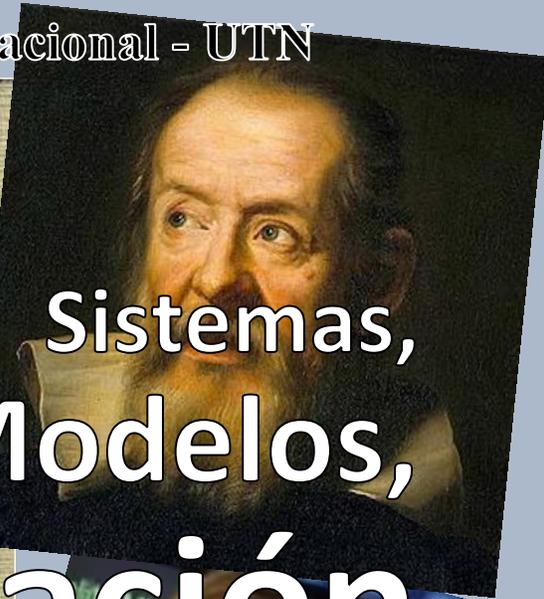
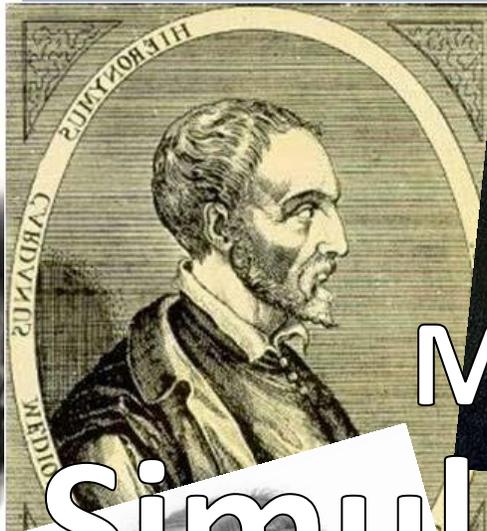
Editorial de la
Universidad Tecnológica Nacional - UTN

Sistemas,
Modelos,

Simulación

y un toque de Epistemología

Walter J. D. COVA



Sistemas, Modelos, Simulación

y un toque de Epistemología



Walter J. D. Cova

GPS – Grupo Proyectos y Servicios
Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional La Rioja

Agosto de 2016

Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional - edUTecNe
<http://www.edutecne.utn.edu.ar>
edutecne@utn.edu.ar

©[Copyright]

edUTecNe, la Editorial de la U.T.N., recuerda que las obras publicadas en su sitio web son de libre acceso para fines académicos y como un medio de difundir la producción cultural y el conocimiento generados por autores universitarios o auspiciados por las universidades, pero que estos y edUTecNe se reservan el derecho de autoría a todos los fines que correspondan.

*When engineers... dismiss philosophical analysis and reflection
as marginal to the practice of engineering,
they are mistaken on at least two counts:
historical and professional.*

Carl Mitcham

PRESENTACIÓN

Estas notas se originaron en una compilación realizada en 2014 para servir de apoyo al curso de Posgrado MODELADO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DINÁMICOS A PARÁMETROS CONCENTRADOS, implementado en la Facultad Regional La Rioja de la Universidad Tecnológica Nacional. La buena acogida brindada por los cursantes –todos con formación en ciencias exactas– a los contenidos relacionados con ciencias sociales, me estimuló para ajustar el contenido de algunos temas, complementándolos con una serie de referencias bibliográficas que, a pesar de su incompletitud, son representativas del estado del arte, razón por la que me atrevo a recomendarlas.

El desarrollo experimentado por la tecnología computacional y de comunicaciones en el último medio siglo ha convertido el uso de las que en un muy reciente pasado se consideraban herramientas de simulación superespecializadas y casi rayanas en lo esotérico, en un hecho normal y cotidiano a disposición de cualquier usuario, sea lego o experto: y aquí aparece un peligro. «*Magister dixit*» era el recurrente argumento a la autoridad de los antiguos que constituía el fundamento –y muy a menudo la conclusión– de las discusiones escolásticas medievales. Hoy se asiste a una transferencia del peso de la prueba científica desde los hombros de los antiguos maestros a las más anchas y cómodas

espaldas de la herramienta computacional. Con la misma carencia de espíritu crítico con que en el pasado se recurría a las autoridades reconocidas, se manifiesta hoy una tendencia a defender aserciones sólo porque son el resultado de cálculos computacionales o, peor aún, «*porque lo dice Internet*». No resulta entonces ocioso llevar a cabo un intento de caracterizar desde el punto de vista de la teoría del conocimiento los dominios de validez tanto de los resultados obtenidos como de los eventuales aprendizajes derivados de la simulación de sistemas y sus incidencias sobre nuestra sociedad del conocimiento.

Aunque históricamente el auge de la simulación se ha producido en el ámbito de las ciencias exactas y físicas, su dominio de aplicación se ha extendido a las ciencias biológicas y sociales. A pesar de su comprobada utilidad para el diseño de políticas públicas, nuestra dirigencia política –en todo el espectro partidario– no parece demasiado proclive a su utilización, tal como ha quedado demostrado en el reciente intento de ajustes de tarifas por suministros energéticos. En respuesta a esta poco feliz situación, me siento impelido a publicar estas notas, con la esperanza de contribuir un aporte equilibrante.

El presente es un artículo de difusión y la única tesis que sustenta –ampliamente demostrada por cierto– es que la simulación constituye una herramienta muy importante, que permite dar respuestas a una serie de preguntas del tipo «*¿qué pasaría si...?*» mediante experimentos computacionales que no implican riesgos físicos, ni daños morales, ni atentados al bolsillo del ciudadano, sino que brindan respuestas para diversas alternativas o configuraciones operacionales del objeto o situación en estudio.

El contenido que se desarrolla es el siguiente:

1. Introducción
2. Definiciones y contexto
3. Modelos y más modelos
4. Simulaciones y más simulaciones
5. Cuestiones epistémicas relativas a la simulación
6. Simulación y sociedad
7. Notas finales.

Al lector predominantemente interesado en las aplicaciones sociales de la simulación, aconsejo pasar del punto 1 directamente al punto 6. Los restantes lectores podrán saltar el punto 5 si no se sienten atraídos por las especulaciones epistémicas.

A todos mis lectores –y en especial a quienes aportaron atinadas críticas a las versiones preliminares de este artículo– les agradezco por su paciente tolerancia.

Walter J. D. Cova

Agosto de 2016.

*Dedicado a la memoria de Jan Tinbergen,
a 22 años de su desaparición.*

1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de las ingenierías, los métodos de modelado y simulación han revestido una importancia progresivamente creciente para el análisis y diseño de sistemas, en especial a partir de la introducción del microprocesador y el desarrollo de las computadoras personales desde 1975 en adelante.



F. Quesnay

En el campo de las ciencias sociales y en especial de la economía, François Quesnay con su *Tableau Économique* presentó en 1758 el concepto de matriz de producto-insumo originando así la primera modelización de una actividad social¹. Siguió el análisis estadístico de fenómenos sociales y, a partir de la aparición del libro de texto de Gilbert y Troitzsch *Simulation for the Social Scientist* en 1999 queda firmemente establecida la simulación social como disciplina.



G. Cardano



H. R. Hertz

De acuerdo a Niehans (1990) con la publicación de *Die Prinzipien der Mechanik* de Heinrich R. Hertz² en 1894 comenzó la era en que los científicos concibieron sus actividades como construcción de modelos; de hecho, en el

¹ Podría aducirse aquí que el desarrollo de la teoría de la probabilidad iniciado por Girolamo Cardano hacia 1560 con el estudio de los juegos de azar (publicado en su obra póstuma *Liber de ludo aleae*) corresponde también al modelado de una actividad social y antecedería a la econometría de Quesnay. Se prefiere sin embargo asignar la primacía a Quesnay por el carácter no lúdico de su aporte.

² En realidad Hertz habría sido el primer científico en exponer por escrito un procedimiento de deducción de consecuencias teóricas en base a modelos.

último cuarto del siglo XIX, la modelización comenzó a dominar la actividad teórica en el campo de la física: Maxwell utilizó modelos analógicos hidrodinámicos para deducir sus muy conocidas ecuaciones del electromagnetismo y W. Thompson (Lord Kelvin) expresaba que no podía comprender un fenómeno antes de haber construido un modelo mecánico del sistema en estudio (Hartmann 1996).



J. C. Maxwell

Las actividades de modelado y simulación han significado un fuerte impulso para la investigación y el crecimiento del conocimiento científico, por lo que resulta conveniente plantear las definiciones de los conceptos de sistema, experimento, modelo y simulación, que constituyen el contenido de la segunda sección de estas notas. La tercera sección se ocupa de los modelos desde los enfoques semántico, ontológico, epistemológico y muy especialmente de los aspectos axiológicos y la incertidumbre que incide sobre los resultados que pueden proporcionar. En la sección cuarta se analizan las simulaciones analógicas y computacionales, como asimismo el uso de la simulación en ciencias sociales. La quinta sección analiza algunos problemas epistémicos relativos a la simulación, mientras que la sexta se ocupa de las aplicaciones e influencia de la simulación en la vida social destacando su empleo en el diseño de políticas públicas. Unas breves observaciones finales cierran el trabajo.

2. DEFINICIONES Y CONTEXTO

Sistema. De acuerdo con Gaines (1979):

«Un sistema es aquello que es caracterizado como sistema. [...] Sistema es cualquier cosa que deseemos caracterizar como sistema».

Por cierto, esta definición es extraordinariamente general y amplia (y casi tautológica): el mayor de los sistemas concebibles es el universo. Cada vez que se decida cortar una parte del universo de modo tal que se pueda establecer claramente qué está *dentro* de esa parte (lo que le pertenece) y lo que está por *fuera* de la misma, se estará definiendo un nuevo sistema. Un sistema está caracterizado por el hecho que puede aseverarse qué cosas le pertenecen y cuáles no, y también porque se puede especificar cómo interactúa con su entorno³. Esto último conduce a que un sistema puede ser *controlado* y *observado*⁴. Sus interacciones con el entorno (ambiente) caen naturalmente en dos categorías:

- i) Hay variables (acciones) que son generadas por el ambiente e influyen el comportamiento del sistema. Se las denomina las *entradas* del sistema (o variables de excitación).
- ii) Hay otras variables (acciones) que son determinadas por el sistema y que a su vez influyen sobre el comportamiento de su ambiente. Se las denomina *salidas* del sistema y constituyen su respuesta a la excitación ejercida.

En general, debiera ser posible asignar valores a por lo menos algunas de las entradas del sistema, para poder observar su comportamiento registrando las salidas resultantes. Esto conduce a otra definición de sistema debida a Cellier (1991):

«Un sistema es una fuente potencial de datos.» (D1)

³ Se deduce inmediatamente que los sistemas se organizan jerárquicamente, pues toda parte diferenciable de un sistema –es decir, un subsistema– es a su vez caracterizable como un sistema.

⁴ Aquí los términos derivados de “control” y “observación” se emplean en un sentido general y amplio. De ninguna manera se corresponden con los conceptos de *controlabilidad* y *observabilidad* tal como son utilizados en Teoría de Control.

Precisando un poco más las precedentes definiciones, puede decirse que un sistema es un conjunto de elementos que interactúan entre sí y con su ambiente de acuerdo a ciertas reglas o principios. El sistema queda determinado por la naturaleza de sus elementos componentes, por las interacciones entre ellos y por su frontera, es decir por las relaciones de pertenencia que separan al sistema del ambiente en que se encuentra inmerso.

Los sistemas pueden ser tipificados en naturales o artificiales, materiales o abstractos; abiertos, cerrados o aislados; estáticos o dinámicos; por su parte cada disciplina define los sistemas que en particular estudia e investiga (sociales, biológicos, de procesamiento de datos, organizativos, termoelectrónicos, etc., etc.).



F. Cellier

Experimento. La definición de sistema (D1) conduce de manera inmediata a una definición para el término “experimento” (Cellier 1991) concebido como procedimiento empírico, cualquiera sea el objetivo que el mismo persiga:

*«Un experimento es el proceso de obtener datos de un sistema,
mediante la excitación de sus entradas» (D2)*

Experimentar con un sistema significa entonces hacer uso de su propiedad de ser controlado y observado. Una de las mayores desventajas de experimentar con sistemas reales está dado por el hecho que éstos se encuentran usualmente bajo la influencia de un gran número de entradas inaccesibles (perturbaciones) y que una cantidad de salidas realmente útiles tampoco son medibles, ya que constituyen estados internos del sistema. Entre las principales motivaciones de la simulación está el hecho que –en el mundo simulado– todas las entradas y salidas son accesibles. Ello brinda la posibilidad de extender las simulaciones más allá del rango de los experimentos que puedan efectuarse sobre el sistema real.

Modelo. Dadas las definiciones (D1) y (D2) para sistemas y experimentos, surge para “modelo” la siguiente definición debida a Marvin Minski (1965):

«Un modelo (**M**) para un sistema (**S**) y un experimento (**E**) es cualquier objeto al que puede aplicarse **E** para responder preguntas acerca de **S**». (D3)

Nótese que esta definición no implica que un modelo sea necesariamente un programa de computación. Un modelo puede muy bien ser un objeto material, o también el



M. Minski

entendimiento, la comprensión, acerca de cómo funciona un sistema (es decir, un modelo mental). Sin embargo es menester consignar que en estas notas ocupan un preponderante lugar aquellos modelos que son codificables como programas de computadora, ya sea que correspondan a modelos matemáticos o –alternativamente– a modelos algorítmicos⁵.

También se debe notar que la definición (D3) conduce a que todo modelo sea también un sistema. Ello a su vez implica que los modelos poseen naturaleza jerárquica, lo que significa que el recorte de un modelo, genera un nuevo modelo que resulta válido para un subconjunto de los experimentos aplicables al modelo original. Estos “modelos de modelos” configuran – al decir de Kleijnen (1982)– “meta-modelos”, que son versiones simplificadas de los modelos originales.

Se debe finalmente insistir que la definición (D3) no describe a “modelos de sistemas” sino que un modelo siempre está referido al par {*sistema, experimento*}. El modelo de un sistema puede ser válido para un experimento e inválido para otro; la expresión “validación

⁵ En el presente contexto, se considera a los modelos matemáticos como representables mediante conjuntos de ecuaciones algebraicas y/o diferenciales que caracterizan la operación de un sistema (o que, más precisamente, definen su estado). Tales ecuaciones pueden –o no– ser tratables analíticamente. Por cierto, los modelos matemáticos sin solución analítica conocida, deben ser tratables por medio de procedimientos numéricos recursivos (algoritmos) implementados en un programa de cómputo, para proporcionar resultados útiles.

Por su parte, los modelos algorítmicos se basan en el concepto que algunos fenómenos pueden y deben ser modelizados como algoritmos programables en computadora y no como ecuaciones. Los modelos basados en autómatas celulares –introducidos por von Neumann (1966)– o en agentes inteligentes, se utilizan en disciplinas tales como ecología, control de tráfico, logística, economía, etc. reemplazando exitosamente a los enfoques basados en ecuaciones. Estos modelos también se denominan *discretos* por cuanto su evolución temporal (cambios de estado) es discontinua, al igual que su disposición espacial.

del modelo” siempre se refiere a un experimento o a una clase de experimentos aplicados a un sistema.

La importancia que reviste la modelización para las ciencias y las ingenierías puede inferirse partiendo de una definición aportada por Zeigler (1984): “Modelizar significa el proceso de organizar conocimientos acerca de un sistema dado”.

Realizando experimentos se acumulan conocimientos sobre un sistema: conocimientos que, inicialmente, se encuentran totalmente desestructurados. Identificando causas y efectos, y ordenando temporal y espacialmente las observaciones, se organiza el conocimiento acopiado durante la experimentación. De acuerdo a la muy amplia definición precedente, se ha realizado entonces un proceso de modelización. Resulta así obvio que todas y cada una de las disciplinas científicas, al igual que la ingeniería, estén interesadas en la modelización y la emplean como herramienta para resolver problemas.

Puede entonces afirmarse que la modelización es una actividad central común para el quehacer científico y tecnológico. Mientras el científico se contenta con observar y comprender el mundo, creando un modelo del mismo, el ingeniero pretende modificarlo: mientras en la ciencia todo es análisis, la esencia de la ingeniería es el diseño. De aquí la importancia que revisten los modelos de desarrollo (también llamados “modelos de diseño”) en la práctica de la ingeniería.

Simulación. Las siguientes definiciones –citadas en (Grüne-Yanoff y Weirich 2010)– son debidas a Paul Humphrey y a Stephan Hartmann:

“Simulación es cualquier método implementado en computadora destinado a explorar las propiedades de modelos matemáticos, cuando no se dispone de métodos analíticos” (Humphrey).

“Una simulación imita un proceso por medio de otro proceso” (Hartmann).

Mientras Humphrey centra su definición en el uso de la computadora como instrumento y limita la simulación a modelos matemáticos analíticamente intratables, Hartmann se enfoca en objetos o sistemas cuyo estado cambia en el tiempo (procesos), desestimando las simulaciones destinadas a estudiar la estructura de un sistema y no sus propiedades dinámicas.

Una definición mucho más abarcativa, que no limita sus alcances a un tipo particular de modelos ni al empleo de una computadora, es la propuesta por Korn y Wait (1978):

“Una simulación es un experimento que se ejecuta sobre un modelo” (D4)

Teniendo en cuenta (D1), (D2) y (D3), la definición aportada por (Bratley et al. 1987) es una ampliación descriptiva de (D4): “Simular es excitar al modelo de un sistema con entradas adecuadas y observar las salidas correspondientes”, que posee la virtud de puntualizar que se deben emplear las “entradas adecuadas” para que la simulación sea válida, pues resulta muy fácil caer en el error de aplicar un experimento a un modelo para el cual este último no es válido.

Los experimentos de laboratorio que se llevan a cabo sobre el sistema real en estudio (o sistema-objetivo) son siempre válidos, puesto que el sistema real es obviamente válido para cualquier experimento, mientras que un modelo no posee esta propiedad. Como consecuencia, resulta particularmente importante que junto con la *descripción del modelo* se acompañe necesariamente la estipulación de su *marco experimental*, donde se establezca el conjunto de experimentos soportados por el modelo. Como bien dice Celier (1991, p.9):

«... muy a menudo la simulación se convierte en una historia de amor con final triste: creamos un modelo de un sistema y nos enamoramos de él. Como habitualmente el amor es ciego, lo olvidamos todo acerca del marco experimental, olvidamos que no estamos en el mundo real, sino en una muy limitada representación del mismo: en una palabra, nos convertimos en adictos al modelo... Simulando, encontramos una estrategia de control que logra que el modelo se comporte de la manera que deseamos y luego aplicamos nuestra estrategia al mundo real convencidos que trabajará a la perfección, para enfrentarnos al final triste: nuestra estrategia simplemente no funciona.»

Con las precauciones del caso, la *simulación* es la única técnica disponible para analizar el comportamiento de sistemas arbitrarios, como alternativa de la experimentación directa. Las *técnicas analíticas* son muy importantes pero muchos sistemas son analíticamente intratables, o bien requieren de un conjunto de simplificaciones muy difícilmente justificables o solamente verificables mediante experimentación o simulación.

Frecuentemente la simulación es aplicada en forma conjunta con otras técnicas analíticas o semianalíticas. La simulación resulta utilizable donde otras técnicas no lo son, y constituye la herramienta más frecuentemente empleada en resolución de problemas en todas las disciplinas de la ciencia y la ingeniería.

Razones para simular. Existe un número de buenas razones para emplear la simulación como herramienta para resolver problemas, entre las que se encuentran:

- a. El sistema físico no está disponible, como ocurre en todas las situaciones de diseño en ingeniería.
- b. La experimentación puede ser peligrosa ya sea para el personal, o para los materiales, o por sus consecuencias a largo plazo.
- c. El costo de la experimentación es muy alto.
- d. La experimentación es muy compleja. En estos casos la simulación puede ser utilizada para determinar la mejor disposición de los instrumentos de medida y las condiciones de realización más convenientes para el ensayo.
- e. Los tiempos de duración de los fenómenos no resultan compatibles con el observador. Fenómenos muy rápidos (p. ej. una explosión) o muy lentos (p. ej. los movimientos galácticos), son muy difícilmente observables y resultan candidatos a la simulación.
- f. Las variables de control, las variables de estado y/o los parámetros del sistema-objetivo pueden ser inaccesibles.
- g. Suprimir perturbaciones actuantes sobre el sistema físico o sobre los instrumentos de medición (ruido).
- h. Suprimir efectos de segundo orden. En la simulación se pueden suprimir efectos accesorios que inciden sobre el sistema físico para concentrar el estudio en su comportamiento básico.

Al tratar en el punto 5 la simulación en ciencias sociales aparecerán algunas razones adicionales y específicas para el empleo de esta herramienta.

Tipos de modelos y sistemas. Debe tenerse presente que modelado y simulación son actividades orientadas a objetivos, es decir que se debe conocer en primer lugar el propósito perseguido antes de iniciar el proceso de modelización.

Centrando la atención en los modelos que son implementables en simulaciones computacionales, las metodologías lógico–matemáticas empleadas abarcan desde las ecuaciones diferenciales ordinarias, pasando por las ecuaciones en derivadas parciales, ecuaciones algebraicas de diferencias, métodos estadísticos, autómatas celulares y procedimientos basados en agentes. Estos últimos se han desarrollado a consecuencia de los avances en inteligencia artificial y han permitido extender las técnicas de simulación a las ciencias sociales y cognitivas.

Para cerrar el presente apartado, corresponde mencionar la complejidad de sistemas. Los sistemas simples poseen un número reducido de componentes que accionan de acuerdo a leyes bien comprendidas. Los sistemas complicados poseen un elevado número de componentes con roles perfectamente definidos y son gobernados por reglas bien comprendidas (por ejemplo una aeronave Boeing 747-400 posee 3 millones de partes, sin contar los remaches y demás elementos de unión). Los sistemas complejos poseen típicamente gran cantidad de componentes que pueden actuar siguiendo reglas no demasiado bien conocidas y además variables en el tiempo; la conectividad de los componentes puede ser muy plástica y sus roles muy fluidos.

Una bandada de aves migratorias, el mercado de valores, las ciudades, el cerebro humano, son algunos ejemplos de sistemas complejos. El número de partes que los componen no es su característica principal. La característica clave es la adaptabilidad: los sistemas complejos responden a cambios en las condiciones externas. Las herramientas principalmente aplicadas para el estudio y modelización de sistemas complejos son los métodos derivados de la dinámica no lineal, la física estadística y la teoría de redes (Amaral y Ottino 2004, Mitchell 2009).



M. Mitchell

3. MODELOS Y MÁS MODELOS

En la filosofía de la ciencia se ha reconocido la importancia de los modelos, investigando los diversos roles que éstos asumen en la práctica científica. Como consecuencia se ha tenido una insondable proliferación de tipologías: modelos de prueba, modelos fenomenológicos, modelos computacionales, modelos de desarrollo, modelos explicativos, modelos empobrecidos, modelos a escala, modelos heurísticos, modelos teóricos, didácticos, imaginarios, matemáticos, substitutos, icónicos, formales, instrumentales, analógicos y un largo etcétera, son algunas de las nociones empleadas para categorizar a los modelos en los diferentes problemas que se suscitan a su respecto.

Aspectos semánticos. Desde el punto de vista semántico los modelos pueden desempeñar dos funciones representacionales diferentes: a) por una parte un modelo puede ser la representación de una parte seleccionada del mundo (el “sistema-objetivo”) y, dependiendo de la naturaleza del objetivo, se clasifican en modelos de fenómenos y modelos de datos. b) Por otro lado un modelo puede representar una teoría en el sentido que interpreta las leyes y axiomas de esa teoría. Ambas nociones no son mutuamente excluyentes. Los problemas que surgen con relación a estas funciones son tratados con profundidad en (Frigg y Hartmann 2012).

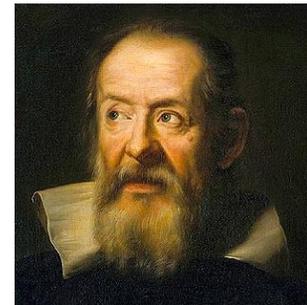
Por lo que hace a los *modelos de fenómenos*, el estilo representacional empleado origina diferentes variantes: modelos a escala, modelos idealizados, modelos analógicos y modelos fenomenológicos. Los *modelos a escala* son copias reducidas o ampliadas de sus sistemas-objetivo, cuya fidelidad es restringida en función de los fines perseguidos por el modelado⁶.

Los *modelos idealizados* constituyen una deliberada simplificación de algo complicado a fin de hacerlo más tratable. Filosóficamente se distinguen dos clases de idealizaciones: las aristotélicas y las galileanas. Una idealización aristotélica consiste en despojar a un objeto concreto de todas aquellas propiedades que no resultan relevantes para el problema en

⁶ Un modelo de un avión construido en madera resulta adecuado para realizar ensayos de comportamiento aerodinámico en túnel de viento: la fidelidad material no es requerida, basta con la fidelidad geométrica del modelo.

estudio⁷. Las idealizaciones galileanas por su parte involucran la introducción de distorsiones deliberadas⁸ en el tratamiento de problemas complicados. ¿Qué puede aseverar acerca de la realidad un modelo que incluya abstracciones/distorsiones? Esta cuestión puede ser respondida desde el realismo perspectivista de Giere y Rueger de acuerdo con el cual cada modelo particular revela un aspecto del fenómeno en cuestión y, tomados en conjunto, los modelos brindan una explicación más completa (Frigg y Hartmann 2012, p. 29).

Modelos analógicos. A nivel básico, material, dos cosas son análogas si existen algunas similitudes relevantes entre ellas o entre sus propiedades. La analogía también se puede basar en la igualdad o parecido de las relaciones entre partes de los dos sistemas. A nivel formal, dos items son análogos si ambos son interpretaciones del mismo cálculo formal: entonces, lo que el modelo analógico comparte con su objetivo es la misma configuración de relaciones abstractas, es decir la misma estructura formal⁹.



Galileo Galilei

Una definición tradicional de los *modelos fenomenológicos* los caracteriza por representar sólo las propiedades observables de sus objetivos, evitando postular mecanismos ocultos. Muchos modelos fenomenológicos, que no son deducibles a partir de una teoría, pueden incorporar principios y leyes asociados con teorías diversas¹⁰.

Un *modelo de datos* es una versión corregida, rectificadora, ordenada y en muchos casos idealizada de los datos obtenidos en la observación experimental. Los modelos de datos juegan un rol crucial en la confirmación de teorías, porque las predicciones que la teoría

⁷ Un ejemplo es el modelo clásico del sistema planetario, que describe a los planetas como teniendo tan sólo masa y forma geométrica, prescindiendo de las restantes propiedades.

⁸ Masas puntuales, líquidos sin viscosidad, superficies libres de fricción, poblaciones aisladas, agentes omniscientes, son ejemplos de idealizaciones galileanas.

⁹ Ello ha constituido el fundamento de la computación analógica.

¹⁰ Tal es el caso del modelo “gota de líquido” del núcleo atómico, que le asigna diversas propiedades - (tensión superficial, carga eléctrica) originadas en teorías diferentes (hidrodinámica, electrodinámica).

proporciona son comparadas no con los resultados experimentales “en bruto”, sino con su correspondiente modelo obtenido por reducción de datos y ajuste de curvas¹¹.

Modelos de teoría. En lógica moderna un modelo es una estructura que hace verdaderas a todas las oraciones de una teoría, donde por teoría se entiende un conjunto –en general deductivamente cerrado– de oraciones expresadas en un lenguaje formal. La estructura es un modelo, en el sentido de ser lo que la teoría representa¹².

Ontología de modelos. ¿Qué clase de cosas son los modelos? La respuesta a esta pregunta abarca una variedad de cosas: objetos físicos, objetos de ficción, estructuras formales, descripciones, ecuaciones/algoritmos, o combinaciones de algunas de ellas. Las categorías citadas no son mutuamente exclusivas, ni conjuntamente exhaustivas.

Los modelos analógicos y los modelos a escala son ejemplos de objetos físicos y se los identifica como modelos materiales. Una gran parte de los modelos no son materiales y resulta natural concebirlos como objetos de ficción u objetos abstractos. Los neokantianos han enfatizado la importancia de estos objetos para el razonamiento científico (Vaihinger 1911). Esta posición es compatible con la práctica científica –en la que los investigadores se refieren a menudo a los modelos como si fueran objetos– y con los enfoques filosóficos que conciben la manipulación de modelos como una parte esencial del proceso de la investigación científica.

Un modelo para que pueda ser simulado computacionalmente, ha de pertenecer a la clase de las ecuaciones (modelo matemático) o a la clase de los procedimientos (modelo algorítmico). Por cierto que tanto en el caso de las ecuaciones como en el de los algoritmos no existe una correspondencia biunívoca entre una instanciación particular y el comportamiento del sistema-objetivo modelado. Es decir que el mismo comportamiento puede ser representado por diferentes ecuaciones dependiendo de las variables que se elijan

¹¹ Nótese que el clásico modelo de Lotka-Volterra para dos especies (presa-predador) es un modelo dinámico de datos, ya que ninguna ley biológica establece que el comportamiento de las especies esté regido por ecuaciones matemáticas.

¹² Como ejemplo considérese la geometría euclídeana, que consiste en un conjunto de oraciones formado por axiomas y los teoremas derivados de ellos. Cualquier estructura para la que estas oraciones sean verdaderas, es un modelo de geometría euclídeana. Para más detalles consultar (Hodges 1997).

y de su dominio de existencia (real o complejo)¹³. Lo mismo ocurre si el modelo pertenece a la clase de las descripciones: tampoco hay correspondencia biunívoca, ya que empleando diferentes lenguajes se pueden formular diferentes modelos del mismo sistema-objetivo.

Nótese finalmente que para la definición de modelo de Minski (D3) resulta indiferente la clase de cosas a que pertenezca el modelo (**M**), en tanto y en cuanto se le pueda aplicar un experimento prescrito (**E**) para obtener conocimiento sobre el sistema-objetivo (**S**) en estudio.

Modelos y valores. Los *modelos de diseño* (o modelos de desarrollo) son ampliamente empleados en ingeniería como representación de sistemas aún no existentes que se desea materializar. Si bien el sistema-objetivo no existe, se cuenta con un conjunto de especificaciones que definen su comportamiento en el ambiente en el que ha de operar. Nótese que los modelos de diseño son modelos idealizados de las características del sistema que se intenta sintetizar.

La construcción de un modelo de diseño queda determinada por la selección de las especificaciones del sistema-objetivo, del entorno en el que opera y de su interacción con el mismo. La descripción adoptada para el ambiente y las interacciones con el sistema están influenciadas por normas y valores éticos. En general, la formulación de un modelo en ingeniería debe tener en cuenta la naturaleza y estructura de las organizaciones sociales que integran el ambiente del sistema a diseñar. Resulta claro que la actividad del modelado ha de ir más allá de lo meramente operacional y basarse expresamente en la noción de sistema, para la cual lo importante está en delimitar correctamente la frontera, de modo tal que el sistema tenga apropiadamente en cuenta la presencia de otras entidades que afectan su comportamiento o son afectadas por el mismo (Sterrett 2013).

Modelos como vehículos de conocimiento. Los modelos son medios para aprender acerca del mundo. Partes significativas de la investigación científica se llevan a cabo sobre

¹³ Así, un sistema dinámico lineal puede ser modelado como un conjunto de ecuaciones diferenciales (dominio de variables reales), o como un conjunto de ecuaciones algebraicas en el dominio de las variables complejas.

modelos y no sobre el mundo real, porque estudiando un modelo se pueden descubrir características y verificar hechos referidos al sistema que el modelo sustituye.

La cuestión acerca de cómo sea posible aprender de un modelo, puede responderse mediante la explicación DDI de Hughes (1997), según la cual el aprendizaje ocurre en tres etapas: denotación, demostración e interpretación. Se comienza estableciendo una relación de representación (“denotación”) entre el modelo y el objetivo. Luego se investigan las propiedades del modelo para demostrar algunas afirmaciones teóricas acerca de su constitución y/o mecanismos internos (“demostración”). Finalmente los hallazgos se convierten en aserciones acerca del sistema-objetivo, configurando la etapa final (“interpretación”).

Modelos e incertidumbre. Los modelos de sistemas complejos se ven afectados por tres fuentes de incertidumbre que afectan a sus resultados y a las predicciones basadas en los mismos. En primer término existe una *incertidumbre estructural* generada por el conjunto de suposiciones auxiliares, aproximaciones y parametrizaciones que están incorporadas al modelo, aunque su construcción esté fundada en teorías científicamente comprobadas¹⁴.

En segundo lugar los modelos complejos involucran extensos conjuntos de parámetros: aspectos del modelo que deben ser cuantificados antes de ser empleado en una simulación. A menudo existe una gran incerteza acerca de los valores a reemplazar en estos parámetros, por lo que –aunque se dispusiera de un modelo con estructura perfecta (ideal)– sus predicciones continuarían planteando incertidumbres sobre el comportamiento del mundo real, ya que diferentes conjuntos de valores de los parámetros resultarán en predicciones diferentes. Ésta es la que se designa como *incertidumbre paramétrica* del modelo.

Existe una tercera fuente asociada con la *incertidumbre de los datos* del mundo real, contra los que se comparan los resultados (predicciones o retrodicciones) proporcionados

¹⁴ Siendo esto válido en ciencias físicas, en las que la construcción de modelos es guiada por teorías subyacentes firmemente establecidas (p. ej. modelos de clima), es tanto más válido en ciencias sociales donde generalmente no se cuenta con teorías de base suficientemente probadas.

por el modelo¹⁵. La incertidumbre de los datos afecta en definitiva la calibración del modelo.

La evaluación de los efectos de las incertidumbres descriptas depende del propósito del modelo, es decir cuáles características del sistema-objetivo en estudio son consideradas como objetos principales de predicción, por lo que puede esperarse que la modelización e investigación a la que está asociada queden “cargadas” por valores, tanto epistémicos como no epistémicos (Biddle y Winsberg 2010), ya que el proceso de priorización lleva aparejados uno o múltiples juicios de valor.

¹⁵ En los modelos de clima normalmente se comparan los resultados con registros históricos. Tales registros pueden estar constituidos por datos meteorológicos directos o por valores inferidos a partir de indicios asociados (anillos de los árboles o muestras de hielo fósil). Ambas fuentes de datos son propensas a errores, de modo que existe una incerteza respecto del clima en el pasado, lo que a su vez afecta al conocimiento del clima futuro mediado por las predicciones del modelo.

4. SIMULACIONES Y MÁS SIMULACIONES

Simulaciones analógicas y computacionales. Al igual que existen modelos analógicos (físicos) y modelos matemáticos/algorítmicos (abstractos), las simulaciones –concebidas como experimentos realizados sobre modelos– pueden ser clasificadas en simulaciones analógicas y simulaciones computacionales (también designadas como simulaciones digitales).

En las simulaciones analógicas la experimentación recae sobre un modelo analógico que representa y sustituye al sistema-objetivo y guarda con este último relaciones de similitud, ya sea a nivel de escala¹⁶ o a nivel de estructura¹⁷ funcional. En esta clase de simulaciones pueden intervenir computadoras en tareas auxiliares de captura y sistematización/representación de datos o bien controlando dispositivos, pero carecen de papel protagónico.

En una simulación computacional, se realiza un experimento numérico por medio del cual se resuelve –utilizando un algoritmo implementado en computadora– un modelo formal del sistema en estudio. De la misma manera que un experimento analógico requiere del *simulacionista*¹⁸ conocimientos básicos del sistema-objetivo en estudio, del objeto que lo sustituye y de la instrumentación necesaria para llevar a cabo el experimento, la simulación computacional implica no solamente el conocimiento del modelo, sino asimismo de las técnicas algorítmicas necesarias para convertirlo en un modelo discreto implementable, teniendo en cuenta las restricciones de capacidad de memoria y velocidad de procesamiento del equipo computacional utilizado. La implementabilidad significa entonces que el modelo sea numéricamente tratable en computadora y se puedan producir resultados en tiempos adecuados a la finalidad perseguida por la simulación. En el caso de sistemas complejos, puede hacerse necesario que el simulacionista introduzca en el sistema-

¹⁶ Túneles de viento y canales hidráulicos son ejemplos clásicos de modelos para simulación a escala.

¹⁷ Particularizando al caso de los sistemas físicos, la equivalencia estructural del objeto con el sistema-objetivo está garantizada si ambos poseen modelos matemáticos formalmente idénticos (es decir, están representados por ecuaciones del mismo tipo). Tal es el caso de circuitos eléctricos como análogos de dispositivos mecánicos.

¹⁸ Se prefiere simulacionista a *simulador* por las obvias implicaciones negativas asociadas a este último término.

objeto simplificaciones, idealizaciones y suposiciones *ad hoc* a fin de reducir los requerimientos de memoria y tiempo de cálculo.

Como no podía ser de otra manera, existe también una clase de simulaciones híbridas, cuyo ejemplo típico son los simuladores de vuelo para el entrenamiento de aviadores¹⁹. Se integra la simulación del sistema-objetivo (tipo particular de avión) y de su ambiente (altura, condiciones atmosféricas, locación geográfica). El piloto se ubica en un habitáculo (cabina) provisto de todos los dispositivos reales de comando e instrumentos indicadores del avión en cuestión, incluyendo parabrisas y ventanillas. La dinámica de vuelo y las condiciones atmosféricas son simuladas digitalmente; la cabina es sometida a movimientos mediante efectores hidráulicos siguiendo la actitud angular del vehículo calculada en respuesta a los comandos del piloto y a la situación ambiental reinante (altura, vientos actuantes, etc.). Paralelamente un procesador digital de gráficos proyecta las imágenes del mundo exterior que el piloto vería desde su butaca. Debe destacarse que el objetivo principal de esta clase de simulaciones es la adaptación (entrenamiento físico) de los pilotos; si bien su valor epistémico es bajo, no es necesariamente nulo, ya que de los registros de las acciones de los pilotos en situaciones especiales, se han derivado conocimientos que posibilitaron la mejora de dispositivos e instrumentos²⁰.

Simulación en ciencias sociales. Prácticamente la totalidad de las disciplinas integradas en las ciencias sociales (antropología, economía, teoría organizacional, ciencias políticas y legales, planeamiento urbano y ambiental, etc.) emplean la simulación computacional en sus investigaciones. La experimentación directa sobre grupos humanos suscita problemas éticos que restringen fuertemente tanto sus alcances como la posibilidad de su realización. Por ello se defiende que la simulación representa en el ámbito de las ciencias sociales una

¹⁹ Existen paralelamente otros *sistemas entrenadores* de naturaleza híbrida, destinados a capacitar operadores de plantas químicas, destilerías, buques, etc. que incluyen dispositivos reales y simulación computacional en entornos cuasi-virtuales.

²⁰ Nótese que en este último caso, el sistema-objetivo que la simulación permite observar es el conjunto avión-piloto-ambiente. Aquí la simulación cumple un objetivo pedagógico (entrenamiento) para el piloto y un objetivo experimental para los diseñadores aeronáuticos.

tercera y nueva modalidad de investigación científica, que complementa los métodos clásicos de inducción y deducción (Axelrod 2005).

La inducción permite descubrir regularidades presentes en datos empíricos (p. ej. al analizar encuestas de opinión). La deducción parte de un conjunto de axiomas establecidos e intenta probar consecuencias de los mismos (p. ej. la existencia de puntos de equilibrio en teoría de juegos aplicando axiomas de elección racional –Russell y Norvig 1995). La simulación, al igual que la deducción, emplea un conjunto de suposiciones explícitas, no para probar teoremas sino para generar datos analizables inductivamente. Al contrario de lo que ocurre en la inducción típica, los datos producidos por la simulación provienen de un conjunto de reglas rigurosamente especificadas y no de mediciones directas sobre el mundo real.



R. Axelrod

La utilización en estudios sociales de análisis basados en agentes que buscan la optimización racional de una función de utilidad, ha sido ampliamente aplicada no en virtud de sus supuestos –mayoritariamente irreales– sino porque a menudo posibilita la deducción (analítica) de algunas propiedades emergentes²¹ de tales sistemas. La alternativa principal a la optimización es la adaptación: utilizar agentes basados en planeamiento adaptivo (Altermann 1988 y Hammond 1989). La adaptación puede ocurrir a nivel individual (aprendizaje) o a nivel población (supervivencia/reproducción diferencial); de cualquier forma, las emergencias de la adaptación son difíciles de calcular o –simplemente– resultan intratables analíticamente cuando hay muchos agentes en interacción siguiendo reglas con efectos no lineales. La principal ventaja de la simulación es que permite analizar sistemas integrados por agentes racionales optimizantes y/o adaptivos.

La simulación basada en agentes, o ABS (por sus iniciales en inglés), está caracterizada por la existencia de múltiples agentes que interactúan entre sí sometidos a poca o ninguna dirección centralizada y no tiene por objetivo la representación precisa de una aplicación empírica en particular, sino el de enriquecer el conocimiento acerca de procesos

²¹ Se denominan “propiedades emergentes” del sistema a los efectos globales producidos por agentes individuales interactuando a nivel local.

fundamentales que pueden aparecer en una variedad de situaciones. Resulta importante cuidar que los supuestos básicos incorporados en el modelo de agente sean simples y explícitos, al objeto que la complejidad quede limitada a los resultados de la simulación. La simplicidad es asimismo importante para facilitar a otros investigadores la posibilidad de reproducir el modelo y replicar la experimentación computacional, lo que a su vez obliga a una documentación completa del modelo, del programa que lo implementa y de los resultados producidos (Axelrod et al. 2004).

Otros tipos de simulación social requieren por el contrario una elevada precisión en los detalles y utilizan modelos extremadamente complejos, como ocurre en la elaboración de predicciones económicas o en el caso de simuladores para entrenamiento de tripulaciones de buques-tanque.

Los finalidades perseguidas por la simulación en ciencias sociales incluyen: predicción, ejecución de tareas²², entrenamiento, entretenimiento (juegos), educación, prueba de existencia de soluciones y descubrimiento de relaciones y principios (como se mencionara al tratar las propiedades emergentes).

A título de ejemplo, aspectos tales como la reputación y la influencia de la murmuración como mecanismo de control social (Giardini y Conte 2011), la emergencia de comportamientos cooperativos en sociedades artificiales (Axelrod et al. 2004) y el análisis del proceso de producción social del conocimiento científico en sociedades artificiales (Edmonds 2004), son algunos de los temas sociológicos que han sido objeto de simulación computacional. En González Bailón (2004) se presenta una muy interesante introducción a la simulación social como técnica de análisis, sus usos y posibilidades.



R. Conte

²² En especial en aplicaciones de sistemas expertos (diagnóstico médico, reconocimiento de voz, optimización funcional, etc.).

5. CUESTIONES EPISTÉMICAS RELATIVAS A LA SIMULACIÓN

Según Humphreys (1994) “...los métodos computacionales de experimentación numérica constituyen una nueva clase de método científico, en una posición intermedia entre la experimentación empírica y la teorización analítica.” Aparecen entonces la modelización y la simulación computacional como mediadoras entre teoría y observación, planteando importantes problemas referidos a la compleja cadena de inferencias que sirven para transformar estructuras teóricas en conocimiento referido a sistemas concretos.

Las simulaciones (computacionales y analógicas) y los experimentos, comparten muchas propiedades. Sin embargo se ha insistido a menudo que ambas actividades son epistemológicamente diferentes. ¿Existe alguna diferencia de especie entre las actividades de experimentación y simulación? ¿Y si la hay, de qué modo se la podría caracterizar? Si bien estas cuestiones continúan siendo motivo de discusión –tan sólo a modo de ejemplo se pueden citar al respecto a (Winsberg 2009), (Cartwright 1998), (Parker 2009), (Kästner y Arnold 2012)– se expondrá aquí de manera sintética una posición al respecto.

Tradicionalmente la filosofía de la ciencia se ha ocupado de la justificación de las teorías y no de su aplicación. Una filosofía de la ciencia que considerara a las teorías como estructuras completamente articuladas y que tratara a los problemas de cálculo como meros resultantes de limitaciones prácticas, pasaría por alto importantes y estimulantes cuestiones metodológicas y epistemológicas atinentes a la teorización científica (Winsberg 2001). De acuerdo a lo planteado por Echeverría (2010) en el contexto de la tecnociencia actual:

«...la filosofía de la ciencia debe dejar de ser únicamente una filosofía teórica (filosofía del conocimiento científico) para pasar a ser, además, una filosofía práctica, es decir: una filosofía de la actividad científica.»

La distinción conceptual entre experimento y simulación puede plantearse de la siguiente manera: cuando una actividad de investigación requiere disponer –como conocimiento de base– de principios probados y confiables para construir modelos de los



E. Winsberg

sistemas-objetivo, y la confiabilidad de tales principios constituye la base para justificar la utilización del objeto de estudio como sustituto del sistema-objetivo, y además se invoca la creencia en la adecuación de tales principios para afirmar y acreditar la validez externa²³ de los resultados de la investigación, entonces la actividad en cuestión es una simulación. De lo contrario, se trata de un experimento. Especialmente en ciencias naturales ocurre frecuentemente que los principios de modelización aplicados son regidos por teorías a cuyo dominio pertenece el comportamiento del sistema-objetivo en estudio.

El argumento para justificar la validez externa de la simulación computacional es el mismo que se emplea para simulaciones analógicas: que tanto el objeto sustituto como el sistema-objetivo poseen modelos con similitudes relevantes.



W. Parker

Se ha insistido que los experimentos poseen un status epistémico privilegiado con respecto de las simulaciones computacionales, puesto que “poseerían un mayor potencial para hacer fuertes inferencias sobre el mundo real”. Siguiendo a (Parker 2009) se puede afirmar que la precedente aserción es falsa, ya que una buena simulación computacional del sistema solar que calcule las órbitas con precisión en la base a las leyes de Newton, suministrará mejores inferencias sobre el mundo de los planetas que casi cualquier montaje experimental imaginable, ya que en este caso el conocimiento relevante de base (que se traduce en capacidad de construir modelos confiables y correctos) es virtualmente irrefutable. La medida de la confiabilidad y fidelidad de los resultados de un experimento o de una simulación, depende exclusivamente de la *calidad* del conocimiento de base y de la pericia con la cual es aplicado y no de la *clase* a la cual pertenece.

Las inferencias realizadas por simulación poseen algunas características peculiares. El conocimiento producido por simulaciones computacionales, no procede en el sentido normal, desde la observación a la teoría (procedimiento ascendente de abstracción), sino

²³ Un resultado experimental es internamente válido cuando el sistema en estudio no es indebidamente perturbado por interferencias externas. El resultado es externamente válido cuando la información adquirida y aprendida acerca del sistema posee relevancia probatoria con referencia a la clase de sistemas de interés (Winsberg 2009, p.579).

que es el resultado de inferencias *descendentes* (yendo de lo teórico a lo fenoménico), en el sentido que están parcialmente fundadas en consideraciones teóricas y luego son aplicadas a características particulares del objeto en estudio. Son además inferencias *polisustentadas*, en el sentido en que se basan en una amplia variedad de fuentes, que incluyen la teoría, la intuición física, aproximaciones, idealizaciones, ficciones, informaciones auxiliares y la experiencia acumulada en muchas instancias de prueba y error. Y finalmente, son inferencias *autónomas*, en cuanto el conocimiento producido por simulación no puede ser corroborado enteramente por comparación u observación empírica.

Los procesos de *validación* y *verificación* conducentes a la acreditación de los resultados de una simulación computacional merecen un párrafo aparte. Se entiende por validación de una simulación al procedimiento que asegura que las ecuaciones del modelo subyacente a la simulación, representan correctamente al sistema-objetivo. Por su parte, se entiende por verificación al proceso que asegura que los resultados numéricos de la simulación y las conclusiones obtenidas de los mismos, se aproximan suficientemente a los resultados que proporcionarían las soluciones de las ecuaciones del modelo original (suponiendo que tales soluciones fueran formulables analíticamente).

En el caso de la simulación de algunos sistemas-objetivo simples o de baja complejidad, resulta posible llevar a cabo los procesos de validación y verificación por separado, ya que se pueden determinar las soluciones analíticas de las ecuaciones del modelo. Pero en cuanto la complejidad del sistema aumenta, aparece en primer lugar el problema de la intratabilidad formal del modelo (no se dispone ya de soluciones analíticas) y, con un mayor incremento de la complejidad, surge el problema de la intratabilidad computacional (las ecuaciones discretizadas no son resolubles para la capacidad de cómputo o de tiempo de cálculo disponibles).

Cuando los modelos son suficientemente complejos y no lineales, raramente es posible encontrar argumentos matemáticos que puedan ofrecer una prueba confiable de verificación de los resultados. Lo que el simulacionista se ve obligado a hacer es establecer que el efecto combinado de los modelos originales con los métodos computacionales utilizados, suministran resultados suficientemente confiables para los propósitos perseguidos por la simulación. Cuando una simulación computacional es exitosa –porque proporciona

resultados adecuados— puede no deberse a que el modelo subyacente sea ideal, o a que los algoritmos empleados produzcan las soluciones precisas, sino que muy posiblemente se deba a lo que en jerga de simulación se designa como “equilibrio o compensación de aproximaciones”. Resulta verosímil que tal sería el caso cuando un modelo es deliberadamente ajustado para contrarrestar limitaciones conocidas en los esquemas empleados para transformar el modelo en un algoritmo computable. Si el éxito se alcanza en virtud de adecuaciones y aproximaciones de este tipo, resulta entonces difícil establecer cuál es el real significado de afirmar que el modelo haya sido validado y verificado por separado.

Colateralmente debe mencionarse que recientemente, en el campo de la filosofía, ha crecido el interés en establecer relaciones y asociaciones entre simulación computacional y experimentos mentales: véase al respecto (Brown y Fehige 2011, p.28) y en particular (Lenhard 2011). El asunto luce prometedor, máxime por el valor epistémico de los buenos experimentos mentales, puesto que pueden probadamente provocar una crisis o por lo menos crear una anomalía en la teoría establecida, contribuyendo de esta manera a un cambio de paradigma (Kuhn 1964).

6. SIMULACIÓN Y SOCIEDAD

La sociedad debe participar de manera crítica y creativa de los procesos de producción de conocimiento, aportando sus perspectivas para valorar la relevancia de la evidencia científica. Cualquier tema de la tecnociencia actual abarca aspectos científicos y consecuencias políticas que ponen en juego no solamente aspectos especializado-disciplinares, sino también consideraciones éticas y sociales, a las que no pueden permanecer ajenos los ciudadanos.

¿Qué es CTS? Los estudios sociales de la ciencia y la tecnología, o estudios sobre ciencia, tecnología y sociedad (CTS), constituyen un campo de trabajo en los ámbitos de la investigación académica, la educación y la política pública²⁴. CTS se originó hace tres décadas a partir de nuevas corrientes de investigación en filosofía y sociología de la ciencia, y de un incremento en la sensibilidad social e institucional sobre la necesidad de una regulación democrática del desarrollo científico-tecnológico. Se trata de indagar y comprender los aspectos sociales del fenómeno científico-tecnológico, tanto en lo que respecta a sus condicionantes como en lo que atañe a sus consecuencias para la sociedad y para el medio ambiente. El enfoque general es de índole interdisciplinar, con la concurrencia de disciplinas de las ciencias sociales y la investigación académica como la filosofía y la historia de la ciencia y la tecnología, la sociología del conocimiento científico, la teoría de la educación y la economía del cambio técnico. CTS define hoy un campo de trabajo bien consolidado institucionalmente en universidades, centros educativos y las administraciones públicas de numerosos países.

²⁴ Los conceptos que se desarrollan en este punto y en el subsiguiente, han sido sintetizados de *OEI – Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura* en cuya página web <http://www.oei.es/cts.htm#0> se encuentra una sección especialmente dedicada a Ciencia, Tecnología y Sociedad.

Objetivos sociales de CTS. CTS trata de promover la comprensión general de la ciencia, mostrándola como una actividad humana de gran importancia social. Forma parte de la cultura general en las sociedades democráticas modernas.

CTS trata de estimular o consolidar en los jóvenes la vocación por el estudio de las ciencias y la tecnología, junto con la independencia de juicio y un sentido de la responsabilidad crítica. Promueve el desarrollo y consolidación de actitudes y prácticas democráticas en cuestiones de importancia social relacionadas con la innovación tecnológica o la intervención ambiental. CTS propicia el compromiso respecto a la integración social de las mujeres y minorías, así como el estímulo para un desarrollo socioeconómico respetuoso para con el medio ambiente y equitativo respecto a futuras generaciones. En los puntos que se exponen a continuación, se detallan algunas aplicaciones socialmente trascendentes de la simulación.

Simulación y educación. Las instituciones educativas poseen un rol ineludible para el aprendizaje de mecanismos democráticos de toma de decisiones en cuestiones concernientes a políticas científico tecnológicas. Las aulas han de operar como laboratorios de participación social en los que simular procesos de evaluación socialmente contextualizados (García Rodríguez 2013). Simuladores computacionales integrados en videojuegos tales como *SimCity* –en sus diversas versiones (individual o en red)– brindan a los educandos la posibilidad de experimentar y aprender acerca de políticas de creación, gestión y evolución de ciudades, planeamiento de tráfico, gestión de residuos, aspectos fiscales y tarifarios, etc.

Prevención de catástrofes naturales. El modelado y simulación del clima con la concurrencia de datos obtenidos por sensores satelitales, ocupan un lugar dominante en la pronosticación meteorológica y la prevención de catástrofes climáticas. Igual énfasis se está poniendo en el desarrollo de la simulación de movimientos tectónicos y erupciones volcánicas.

Participación ciudadana. La simulación computacional adquiere una preponderancia cada vez mayor como actor instrumental de la participación ciudadana en la problemática de Ciencia, Tecnología y Sociedad a nivel global. Esta aseveración puede ser justificada analizando la propuesta *FuturICT* en el marco del programa «Future and Emerging Technologies»²⁵ de la Unión Europea (www.futurict.eu).

El proyecto *FuturICT* ha surgido, de acuerdo a (Helbing et al., 2012), como un cambio de paradigma para enfrentar los retos que acosan a la humanidad: crisis financieras, guerras internacionales, terrorismo global, proliferación de enfermedades y del cibercrimen, pasando por cambios ambientales, demográficos y tecnológicos. Se propone que, para comprender los principios sobre los que se basan nuestros sistemas tecno-socio-económicos altamente interconectados, se debe cambiar la caracterización del mundo desde un enfoque orientado a los componentes a un nuevo enfoque orientado a las interacciones. Para ello el proyecto defiende combinar la potencia de las TICs (tecnologías de la información y comunicación) –ICT por sus iniciales en inglés– con los conocimientos a ser proporcionados por las ciencias sociales y las ciencias de la complejidad²⁶.



D. Helbing

Entre las principales razones que sus promotores esgrimen a favor de esta propuesta, merecen ser destacadas las siguientes, que reflejan algunos de los argumentos de Mitcham (1997) justificativos de la participación pública en la gestión de la ciencia y la tecnología. *FuturICT* pretende promover el desarrollo de TICs inspiradas en la co-evolución de los instrumentos tecnológicos con la sociedad, aplicando nuevos paradigmas de auto-

²⁵ *FuturICT* es propiciado por una red de organismos europeos con intereses en diferentes áreas de la ciencia y la tecnología. Debe destacarse la participación entre otros de ETH Zurich, Oxford University, Fraunhofer Society, Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), etc. El Consejo de Coordinación del proyecto reside en la ETH Zurich y se han formado comunidades de apoyo en Australia, China, Japón, Israel, USA y Latinoamérica.

²⁶ Al decir de sus impulsores: “Las TICs suministrarán los datos requeridos para llevar a acelerar los conocimientos en ciencias sociales; las ciencias de la complejidad echarán luz sobre los fenómenos emergentes en sistemas sociales interactivos y las ciencias sociales proveerán una mejor comprensión de las oportunidades y riesgos de redes fuertemente acopladas, en especial los sistemas TIC del futuro”.

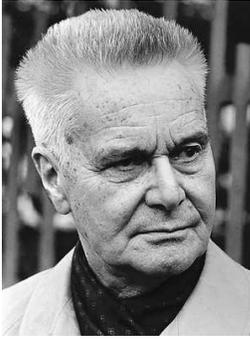
organización, adaptación y confiabilidad. La propuesta apoya el comportamiento cooperativo a escala global, en contraposición con las empresas comerciales, que tienden principalmente a promover comportamientos competitivos. Defiende evitar que potentes herramientas e innovaciones sociales terminen en las manos de unos pocos interesados sin beneficiar a la humanidad en su conjunto.

Se debe consignar que el proyecto –originado en el ámbito científico-académico europeo– intenta obtener su financiación exclusivamente de fuentes públicas. La simulación computacional se encuentra totalmente integrada en él, ya que las realizaciones previstas en el marco de FuturICT: *Living Earth Simulator* (simulador del mundo viviente), *Planetary Nervous System* (sistema nervioso planetario) y *Global Participatory Platform* (plataforma participativa global)²⁷ plantean incorporar simulaciones soportadas en software abierto y brindar a los ciudadanos medios de comunicación, coordinación y cooperación que hagan posible su participación social, económica y política más allá de la actual e-Governance. El proyecto mantiene actualizado el blog <http://futurict.blogspot.com.ar/> donde se exponen los análisis que sustentan las propuestas de FuturICT.

Este proyecto, que muestra en su formulación un genuino acercamiento no tecnocrático de la ciencia a la sociedad, conduce a pensar en la existencia de una toma progresiva de conciencia tendente a crear y ampliar una zona de intersección entre ciencia y sociedad que permita dirimir las controversias asociadas a la tecnociencia (Bucchi 2010, cap. 6), superando las tradicionales categorías dicotómicas del debate público y de la decisión política referendaria: sí/no, correcto/equivocado, aprobado/rechazado.

Formulación de políticas públicas. Ya se ha expuesto de qué manera la simulación –empleando sistemas multiagentes– ha abierto una vía para el enriquecimiento de las teorías sociológicas y la formulación de modelos de comportamiento e interacción social. No se debe sin embargo creer que fuese necesario el advenimiento de las computadoras para que la simulación social adquiriera impulso y trascendencia en la formulación de políticas de gobierno. En 1936 Jan Tinbergen –uno de los fundadores de la econometría– y su equipo

²⁷ Véanse los documentos “FuturICT Project Summary” y “FuturICT Outline” en <http://www.futurict.eu/>



J. Tinbergen

de calculistas construyeron un modelo completo de la economía de Holanda²⁸ sobre el que se simularon seis políticas diferentes para determinar su impacto buscando aliviar los efectos de la Gran Recesión. Como consecuencia de tales estudios Tinbergen recomendó abandonar el patrón oro, política que el gobierno holandés llevó finalmente a la práctica²⁹ con muy buenos resultados, que se reflejaron en una palpable mejora del bienestar popular en la Holanda de preguerra.

Jan Tinbergen recibió junto a Ragnar Frisch el premio Nobel de Economía 1969 “por haber desarrollado y aplicado modelos dinámicos para el análisis de procesos económicos”. En la Conferencia Nobel³⁰ que brindó el 12 de diciembre de 1969, al referirse a los modelos econométricos destacó:

«Tales modelos constituyen un elemento real y esencial de la preparación de políticas bien coordinadas. Pero no pueden hacer este trabajo por sí solos. Los modelos constituyen un *marco* o un *esqueleto* y la carne y la sangre tendrán que ser añadidos con gran sentido común y conocimiento de los detalles. ... El marco al que me refiero provee los ingredientes principales para la coordinación de las políticas gubernamentales al nivel de un gobierno central; es decir, la coordinación de las políticas de los diversos ministerios.»

Con ello Tinbergen dejó claramente establecido que los modelos no son la panacea universal para el gobierno pero que, debidamente complementados con un criterioso ajuste a los datos de la realidad, son herramientas útiles para una buena gestión. Quizás en este punto resulte pertinente recordar que Jan Tinbergen fue toda su vida miembro del partido socialista holandés y que su trabajo a partir de 1955 como asesor de Naciones Unidas estuvo dirigido al mejoramiento de las condiciones de vida en los países en vías de

²⁸ Este primer modelo macroeconómico, conocido como «*dutch model*» fue presentado en 1936 en La Haya.

²⁹ Mayores antecedentes y referencias bibliográficas en la entrevista a Jan Tinbergen realizada por Magnus y Morgan (1987).

³⁰ Para el texto completo de la conferencia en inglés y español ver (Tinbergen 1969).

desarrollo. Queda entonces claro que una “buena gestión” para Tinbergen significaba promover el nivel económico de los asalariados y de la sociedad en su conjunto.

Los estudios de simulación en apoyo a políticas públicas se desenvuelven en un entorno de *modelado exploratorio*, en cuyo marco los investigadores ejecutan una cantidad de experimentos computacionales, para elucidar cómo se comportaría el sistema-objetivo si las diversas conjeturas referidas a ambientes y mecanismos de interacción fueran correctas. De este modo se pueden depurar opciones, eliminando algunos escenarios incompatibles con las políticas perseguidas (Grüne-Yanoff y Weirich 2010). Repetimos lo ya dicho precedentemente: la experimentación directa sobre grupos humanos suscita (o por lo menos debiera suscitar) problemas éticos que restringen fuertemente tanto sus alcances como la posibilidad de su realización... Sano sería que los gobernantes no lo olvidaran.

Política tarifaria. A modo de ejemplo de aplicación, intentaremos en este punto formular un breve esbozo de tratamiento de las tarifas de la energía eléctrica³¹, que servirá para explicitar los datos que se requieren para llevar a cabo una simulación.

La energía eléctrica como toda otra forma de energía sometida a control estatal, debe ser considerada bajo tres aspectos principales: a) como fuente de producción de bienes y servicios y medio de preservación/incremento de puestos de trabajo, b) como factor de promoción regional para el desarrollo/integración de zonas geográficas postergadas, c) como insumo para hacer más confortable la vida de la población (iluminación, refrigeración, calefacción). Por otra parte la generación, transporte y distribución de energía eléctrica es una actividad industrial y como tal debe generar utilidades para asegurar el mantenimiento y expansión de sus prestaciones. De acuerdo a lo precedente queda en claro que la tarifa de energía eléctrica no puede ser resorte exclusivo de una sola área gubernativa específica, sino que debe atender los requerimientos de planificación regional, desarrollo social, economía de la nación y de los gobiernos provinciales.

³¹ Ejemplos similares se podrían desarrollar para los combustibles líquidos y gaseosos.

Si el crecimiento económico de una nación es acompañado por una mejora de las condiciones de vida de sus habitantes mediante una equitativa distribución de la riqueza generada, entonces la tarifa de la energía insumida por la industria debe ser más baja que la correspondiente al consumo residencial. Por su parte la energía residencial debe contar con escalones tarifarios que contemplen por una parte los requerimientos energéticos para garantizar un grado mínimo confort per cápita (con las obvias diferenciaciones climáticas por regiones), teniendo en cuenta por otra parte el nivel suntuario de la vivienda y el consumo por sobre el mínimo básico. La sumatoria de lo percibido por venta de energía aplicando los diferentes escalones tarifarios debiera ser igual o superior a los costos de producción, transporte y distribución.

La población ha de asumir que la energía no es un bien renovable ni tampoco barato, por lo que su consumo no puede ser ilimitado y debe ser racionalizado. Se trata por otra parte de un bien social, por lo que en situaciones de carestía se deberá priorizar el consumo industrial frente al consumo domiciliario, por las razones ya mencionadas.

Habida cuenta que al presente hasta la más remota cooperativa eléctrica del interior del país utiliza herramientas informáticas para facturar sus servicios y realizar el seguimiento histórico de los consumos, ello significa que el país cuenta –en su conjunto– con bases de datos que permiten determinar claramente los agregados regionales y locales del consumo eléctrico en cada escalón de suministro y de la recaudación por cada nivel tarifario vigente en los diferentes centros de consumo. Tal como se conocen los ingresos por ventas, se conocen los costos de generación de cada central productora de energía eléctrica y los valores correspondientes a transporte, distribución e intercambio de energía a nivel mayorista. Además se encuentra disponible en los organismos de seguridad social (ANSeS) los datos de los ciudadanos en condiciones de pobreza (candidatos por tanto a un escalón tarifario promocional). En consecuencia –y aunque el procedimiento no es para nada trivial– resulta calculable sin excesiva dificultad la incidencia de la modificación de valores tarifarios en el balance económico de cada región.

A partir del bienio de 2010-2011 Argentina, de ser un país productor y exportador de energía se ha convertido en un neto importador de recursos energéticos. Paralelamente, una serie de acciones gubernamentales mantuvieron artificialmente bajo el precio de la energía

eléctrica, hasta el punto de que la recaudación en algunos centros de consumo, no alcanzaba a cubrir los costos. Más aún: se generaron importantes asimetrías entre los valores de las tarifas eléctricas para diferentes zonas del país, resultando particularmente favorecido el conglomerado urbano de Buenos Aires frente a las restantes provincias. Junto a esta situación específica del sector energético, se debe tener presente el proceso de inflación acelerada que acompañó al cambio de gobierno producido en el segundo semestre de 2015.

En el contexto que se acaba de describir el ajuste de las tarifas de energía no puede ser el mismo en todo el país, ni tampoco se debiera aplicar en forma abrupta, por su inmediata repercusión sobre el precio de los bienes (en especial de aquéllos con alto componente energético en su costo de producción) y su consiguiente impacto inflacionario. Se impone realizar toda una serie de simulaciones ensayando diversas alternativas para distintas zonas del país, considerando asimismo los ciclos estacionales que afectan particularmente al consumo residencial, a fin de poder evaluar los impactos sociales y económicos emergentes de tales ajustes.

Por cierto que, para problemas de esta complejidad, no existe una solución única sino un conjunto de soluciones más o menos adecuadas de acuerdo a cual sea el objetivo perseguido. Existen en esta clase de situaciones objetivos claramente incompatibles entre sí: no se puede por ejemplo, proponer un ajuste que permita recuperar los costos de producción de energía y tenga simultáneamente incidencia nula sobre la inflación. Para alcanzar una solución viable es necesario aplicar tanto criterios económicos, como de protección del nivel de vida de los habitantes, en especial de los sectores más desvalidos de la población, para determinar una política de ajustes secuenciales y diferenciales de tarifas que resulte equitativa para los ciudadanos de todo el país. Las herramientas, los datos y el capital humano para lograrlo están disponibles: se deberá entonces proceder –como indicaba Tinbergen– con prudencia y conocimiento de los detalles para elaborar una política tarifaria correcta.

7. NOTAS FINALES

Las simulaciones computacionales poseen características que las diferencian de los experimentos convencionales y las vuelven nuevas herramientas científicas, con consecuencias epistemológicas que son aún motivo de estudio y discusión en cuanto a sus alcances y limitaciones, dentro del ámbito de la filosofía del conocimiento.

Por otro lado, no se puede negar la importancia que hoy reviste la simulación para el avance tanto de la Ciencia como de la Filosofía de la Ciencia, con un protagonismo que trasciende el carácter subordinado o meramente instrumental y auxiliar que algunas corrientes de pensamiento pretenden asignarle.

Se ha presentado también una descripción resumida del rol que cumplen los métodos de simulación en el mundo contemporáneo y su profunda inserción tanto en las ciencias físicas y naturales, como en las ingenierías y en las ciencias sociales.

Por último, la modelización y simulación de sistemas socioeconómicos es una herramienta insustituible para los gobernantes prudentes, cuyo empleo permite analizar diferentes alternativas de políticas públicas y seleccionar las más convenientes al bienestar general, sin irritar a la ciudadanía con medidas no suficientemente ponderadas.

La Rioja, Agosto de 2016.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altermann, (1988): “Adaptive planning”. *Cognitive Science*, 12: 393–422.
- Amaral, L.A.N. y Ottino, J.M. (2004): “Complex networks – Augmenting the framework for the study of complex systems”. *The European Physical Journal B*, 38: 147–162. DOI: 10.1140/epjb/e2004-00110-5.
- Axelrod, Robert (2005): “Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences”. University of Michigan. Disponible en <http://www-personal.umich.edu/~axe/research/AdvancingArtSim2005.pdf>. Acceso 07/01/2014.
- Axelrod R., Hammond R. A. y Grafen A. (2004): “Altruism Via Kin-Selection Strategies that Rely on Arbitrary Tags with Which They Coevolve”. *Evolution*. 58: 1833-1838. Disponible en <http://www-personal.umich.edu/~axe/AHG/main.htm> junto con la documentación completa. Acceso 27/01/2014.
- Biddle, Justin y Winsberg, Eric (2010): “Value Judgments and the Estimation of Uncertainty in Climate Modeling”. Disponible en www.academia.edu/390713/Value_Judgments_and_the_Estimation_of_Uncertainty_in_Climate_Modeling. Acceso 26/01/2014. Una versión modificada del artículo se encuentra en (Winsberg 2010, cap. 6).
- Bratley, P., Fox, B. y Schrage, L. (1987): *A Guide to Simulation*. Second Edition. Springer-Verlag, New York.
- Brown, James R. y Fehige, Yiftach (2011): “Thought Experiments”. Link <http://plato.stanford.edu/archives/fall2011/entries/thought-experiment/> from the Fall 2011 Edition of the Stanford Encyclopedia of Philosophy.
- Bucchi, Massimiano (2010): *Scientisti e Antiscientisti – Perché scienza e società non si capiscono*. Società editrice il Mulino, Bologna.
- Cartwright, Nancy (1998): “How Theories Relate: Takeovers or Partnerships?” *Phylosophia Naturalis*, 54: 23-34.
- Cellier, François E. (1991): *Continuous System Modeling*. Springer Verlag, New York.
- Echeverría, Javier (2010): “De la filosofía de la ciencia a la filosofía de la tecnociencia”. *DAIMON Revista Internacional de Filosofía*, Nº 50, 31-41.
- Edmonds, Bruce (2004): “Artificial Science – a simulation test-bed for studying the social processes of science”. The 2nd International Conference of the European Social Simulation Association (*ESSA 2004*), Valadollid, Spain.

- Frigg, Roman y Hartmann, Stephan (2012): “Models in Science”, en Zalta et al. (editors) *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Fall 2012 Edition. Disponible en <http://plato.stanford.edu/archives/fall2012/entries/models-science/>
- Gaines, Brian (1979): “General Systems Research: Quo Vadis?” *General Systems Yearbook*, 24: 1-9. International Society for the Systems Sciences.
- García Rodríguez, Myriam (2013): “Curso Introducción a la filosofía de la ciencia y la tecnología: nociones básicas, enfoques clásicos y nuevos aportes”. Centro de Estudios sobre Ciencia, Desarrollo y Educación Superior. Buenos Aires.
- Giardini, Francesca y Conte, Rosaria (2011): “Gossip for social control in natural and artificial societies”. *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, 0(00) 1–15. Disponible en: <http://sim.sagepub.com/content/early/2011/05/19/0037549711406912.full.pdf>. Acceso 07/01/2014.
- González Bailón, Sandra (2004): “¿SOCIEDADES ARTIFICIALES? Una introducción a la simulación social”. *Revista Internacional de Sociología (RIS)*, Tercera Época, N°39, Septiembre-Diciembre 2004, 199-222. Disponible en <http://revintsociologia.revistas.csic.es/index.php/revintsociologia/article/view/268/283> Acceso 20/12/2013.
- Grüne-Yanoff, Till y Weirich, Paul (2010): “The Philosophy and Epistemology of Simulation: A Review”. *Simulation & Gaming* 41(1) 20 –50. Disponible en http://home.abe.kth.se/~gryne/papers/PES_imprint.pdf Acceso 20/01/2014.
- Hammond, K. (1989): *Case-Based Planning: Viewing Planning as a Memory Task*. Academic Press, New York.
- Hartmann, Stephan (1996): “The World as a Process: Simulations in the Natural and Social Sciences”, en R. Hegselmann et.al. (eds.): *Simulation and Modelling in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View*. Theory and Decision Library. Kluwer: Dordrecht, pp. 77-100.
- Helbing, D.; Bishop, S.; Conte, R.; Lukowicz, P.; y McCarthy, J.B. (2012): “FuturICT: Participatory computing to understand and manage our complex world in a more sustainable and resilient way”, *European Physical Journal – Special Topics*, 214: 11–39 (2012), published with open access at Springerlink.com DOI: 10.1140/epjst/e2012-01686-y.
- Hodges, Wilfrid (1997): *A Shorter Model Theory*. Cambridge University Press. Cambridge, UK.

- Hughes, R. I. G. (1997): “Models and Representation”, *Philosophy of Science*, 64: 325–336.
- Humphreys, P. (1994): “Numerical Experimentation”. En P. Humphreys y Patrick Suppes (eds.): *Scientific Philosopher*, Vol. 2, 103–121, Dordrecht.
- Karplus, Walter J. (1976): “The Spectrum of Mathematical Modeling and Systems Simulation”, Proceedings Eight AICA Congress on Simulation of Systems, (L. Dekker, ed.), North Holland, Amsterdam.
- Kästner, Johannes y Arnold, Eckhart (2012): “When can a Computer Simulation act as Substitute for an Experiment? A Case-Study from Chemistry”. Preprint Series, Stuttgart Research Centre for Simulation Technology (SRC SimTech). University of Stuttgart.
- Kleijnen, Jack P. C. (1982): “Experimentation with Models: Statistical Design and Analysis Techniques” en F. E. Cellier (editor) *Progress in Modelling and Simulation*, Academic Press, Londres.
- Korn, Granino A. y Wait, John V. (1978): *Digital Continuous System Simulation*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Kuhn, Thomas S. (1964): “A Function for Thought Experiments”, reimpresso en T.S. Kuhn, *The Essential Tension*, Chicago: University of Chicago Press, 1977, 240–265.
- Lenhard, Johannes (2011): “Epistemologie der Iteration: Gedankenexperimente und Simulationsexperimente”, *Deutsche Zeitschrift für Philosophie*, 59: 131–154.
- Magnus, Jan R. y Morgan, Mary S. (1987): “The ET interview: Professor J. Tinbergen”, *Econometric Theory* 3: 117–142.
- Minski, Marvin (1965): “Models, Minds and Machines”, Proceedings IFIP Congress 1965: 45-49.
- Mitcham, Carl (1997): *Thinking Ethics in Technology*. Colorado School of Mines, Golden CO.
- Mitchell, Melanie (2009). *Complexity: A Guided Tour*. Oxford, U.K: Oxford University Press. ISBN 0-19-512441-3
- Niehans, J (1990): *History of Economic Thought*. The John Hopkins University Press, Baltimore.
- Parker, Wendy S. (2009): “Does matter really matter? Computer simulations, experiments, and materiality.” *Synthese* 169:483–496.
- Russell, Stuart y Norvig, Peter (1995): *Artificial Intelligence – A modern Approach*. Prentice-Hall, Upper Saddle River NJ.

- Sterrett, S. G. (2013): “The morals of model-making”. *Studies in History and Philosophy of Science* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.shpsa.2013.11.006>
- Tinbergen, Jan (1969): “The Use of Models: Experience and Prospects” , Nobel lecture. Stockholm: Norstedt, 1970. Disponible en http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/economic-sciences/laureates/1969/tinbergen-lecture.html Existe una versión en español publicada por la Universidad de Málaga (España): “El uso de modelos: experiencia y perspectivas” tomado de *Los Premios Nobel de Economía 1969-1977. Lecturas 25* Prólogo de Gustavo Romero Kolbeck. Banco de México, S. A. Fondo de Cultura Económica. México, pp. 66-78. Disponible en http://www.eumed.net/cursecon/textos/Tinbergen-uso_de_modelos.htm
- Vaihinger, Hans (1911): *Philosophie des Als Ob*. Traducción al inglés: *The Philosophy of 'As If'*, Kegan Paul 1924, London.
- von Neumann, John (1966): *Theory of self-reproducing autómatas*. Edited by A.W. Burks (University of Illinois Press, Urbana and London, 1966).
- Winsberg, Eric (2001): “Simulations, Models, and Theories: Complex Physical Systems and their Representations”. *Philosophy of Science*, Vol 68, N°3.
- Winsberg, Eric (2009): “A tale of two methods”. *Synthese*, 169: 575-592.
- Winsberg, Eric (2010): *Science in the Age of Computer Simulation*. The University of Chicago Press, Chicago, IL.
- Zeigler, Bernard P. (1984): *Multifaceted Modeling and Discrete Event Simulation*. Academic Press, London, UK.

IMÁGENES

Las imágenes que ilustran el presente trabajo han sido tomadas de repositorios públicos disponibles en Internet y/o páginas personales de los autores en las instituciones académicas donde se desempeñan. Vaya a todos mi reconocimiento.



COVA, Walter José Domingo

Ingeniero Electricista-Electrónico, Univ. Nacional de Córdoba, 1973.
Estudios de especialización en Sistemas de Control Automático, Institut für
Regelungstechnik, Technische Universität Darmstadt, Alemania.
Profesor Titular por concurso, Universidad Tecnológica Nacional.
Docente-investigador categorizado.
Docente de Posgrado de la *Maestría en Tecnología Satelital*, UTN – CONAE.
Ex Subsecretario de Formación Docente y Posgrado, UTN- F.R. La Rioja.
Miembro del Consejo Asesor del Programa de Investigación y Desarrollo *APLICACIONES
MECÁNICAS Y MECATRÓNICAS*, UTN-SCTyP, con funciones de evaluador de
proyectos.
Director del grupo facultad *GPS –Grupo Proyectos y Servicios*, UTN-FRLR
Publicaciones nacionales e internacionales, participación en congresos científicos.
Dirección y codirección de proyectos de I+D+i.
Jurado en concursos docentes – evaluador en congresos científicos.
Miembro del Consejo Directivo de AIT (Asociación de Investigaciones Tecnológicas),
Córdoba, Argentina.
