

## NOCIONES DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL: SIMULACIONES Y MODELOS CIENTÍFICOS

### CONCEPTIONS OF COMPUTER SIMULATION: SIMULATIONS AND SCIENTIFIC MODELS

JUAN M. DURÁN

Universidad Nacional de Córdoba – Argentina

CONICET – Argentina

juanduran@gmail.com

RECIBIDO: 17/03/2015

ACEPTADO: 20/05/2015

**Resumen:** El uso masivo y ubicuo de simulaciones computacionales en la práctica científica actual hace que su estudio filosófico cobre centralidad para la comprensión general de estos métodos. En este trabajo analizo el modo en que el concepto de simulación computacional ha tenido tratamiento en la literatura filosófica contemporánea. Concretamente, analizo tres conceptualizaciones de simulación computacional que han servido de base fundante para toda la literatura posterior. Muestro, asimismo, cuáles son las dificultades que estas conceptualizaciones deben afrontar. Finalmente presento críticas que, a mi ver, resultan insalvables y que sugieren un cambio en el modo de conceptualizar simulaciones computacionales.

**Palabras claves:** Simulaciones computacionales; modelos científicos; práctica científica.

**Abstract:** The massive and ubiquitous use of computer simulations in current scientific practice makes their philosophical study a necessity for the general understanding of such methods. In this work I analyze the different ways in which the concept of computer simulation has been conceptualized in the contemporary philosophical literature. Concretely, I analyze three conceptualizations of the notion of computer simulation that have grounded the succeeding philosophical literature. I show, in addition, the difficulties that these conceptualizations run into. Finally, I present some criticisms that, to my mind, are insurmountable and therefore suggest a change in the way of conceptualizing computer simulations.

**Keywords:** Computer simulations; scientific models; scientific practice.

### Introducción

El surgimiento de las computadoras ha producido cambios profundos en nuestros modos de ver el mundo, cambios que se han introducido en casi todo campo de estudio. Prácticamente todas las disciplinas hacen uso, de un modo u otro, de computadoras y software especializado. Ahora bien, de todas las direcciones posibles en que se puede abordar un estudio de la computación, mi punto de atención estará en el uso que se hace de las computadoras dentro de la actividad

científica. Más puntualmente, ceñiré mis estudios a la caracterización de las simulaciones computacionales como se las encuentra en la práctica científica<sup>1</sup>.

La historia del encuentro entre la actividad científica y las simulaciones computacionales se remonta a la introducción de nuevas metodologías y herramientas muy poderosas que simplificaban enormemente el tedioso y complicado cálculo. Hoy el escenario ha cambiado sustancialmente. La complejidad alcanzada en el desarrollo de simulaciones, la gran variedad de técnicas asociadas a ellas, el cambio tecnológico y científico, son sólo algunas de las instancias del devenir tecnológico-científico que ponen de relieve el hecho de que hablar de simulaciones computacionales como cálculo para obtener resultados de ecuaciones sea una simplificación excesiva. El innegable impacto de las simulaciones computacionales en la actividad científica estimula la exploración de los alcances y características de éstas a fin de lograr un mejor conocimiento en su implementación científica<sup>2</sup>.

Así pues, en este artículo discutiré el trabajo de tres autores que analizan las simulaciones computacionales como modelos científicos. A su vez, presentaré objeciones a la interpretación de cada uno de estos autores al tiempo que mostraré qué queda aún por analizar y resolver en materia filosófica.

### Ábacos y computadoras

Desde una perspectiva histórica, la utilización de simulaciones computacionales en la ciencia no está exclusivamente asociada con el surgimiento de la computadora digital. De hecho los primeros usos del término ‘simulación’ dependen primariamente de un uso no-computacional y se encuentran designados especialmente para imitar el comportamiento de algún fenómeno del mundo real, como por ejemplo la imitación de las distintas reglas en el mundo de las finanzas o de la guerra, como puede encontrarse en distintos juegos de mesa.

Fue la introducción de la computadora digital la que proporcionó un mayor ímpetu para la adopción de técnicas de simulación en la investigación científica moderna. Hoy, a 65 años de Colossus, es fácil comprender las razones por las cuales tanto científicos como instituciones rápidamente adoptan las simulaciones computacionales como mecanismos fiables de exploración, experimentación y

---

<sup>1</sup> Aquí sólo tengo interés por simulaciones *computacionales* en las ciencias naturales. También me referiré a ellas simplemente como ‘simulaciones’.

<sup>2</sup> Andrés Rivadulla Rodríguez (2012), por ejemplo, ha argumentado extensivamente de cómo la ciencia de la computación ha abierto campos de investigación científica que difícilmente serían accesibles mediante modelos científicos tradicionales.

desarrollo de nuevas teorías. Ahora bien, parecería que ni filósofos ni científicos han llegado a un acuerdo generalizado acerca de qué se entiende por ‘simulación computacional’. Una forma de mirar a este asunto es tomar que el programador “conoce” en qué consiste la simulación que ha desarrollado. En este sentido, el programador conoce los algoritmos que ha implementado, las estructuras de datos que le serán de mayor utilidad, y hasta podría tener una buena idea acerca de qué resultado esperar, pero al final deberemos acordar que esto es todo y que esta sola información no brinda una respuesta satisfactoria a la pregunta filosófica que nos interesa. Por el contrario, responder a esta pregunta es una empresa un poco más exigente de lo que se podría esperar al principio.

Desde la perspectiva filosófica, es admisible pensar que las simulaciones no son más que complejos mecanismos para el cálculo y resolución de modelos científicos, aliviando así la parte rutinaria y poco gratificante de este trabajo. De hecho, y hasta el surgimiento de las computadoras digitales, la resolución de ecuaciones diferenciales complejas era una tarea difícil, si no imposible. Con la restricción de que es física e intelectualmente imposible resolver algunas de estas ecuaciones, el estudio de fenómenos empíricos complejos estaba severamente limitado por lo que se pudiera lograr mediante mecanismos de simplificación de modelos, aproximaciones numéricas, idealizaciones, y cualquier técnica matemática disponible en el momento.

Dado este estado del arte, lo más razonable es pensar que el primer y más obvio uso que se hizo de las computadoras digitales fuera el de explotar su gran capacidad de cálculo. Actualmente se coincide en que tanto la ciencia de la computación como la tecnología que la acompaña se han alejado considerablemente de esta perspectiva; sin embargo no termina de ser completamente transparente el hecho de que la computadora digital sea algo más que una inmensa, compleja y rápida máquina de calcular. La idea de volver utilizables técnicas ya conocidas es, desde luego, atractiva. Desarrollar y perfeccionar estas técnicas en un instrumento que ofrece gran capacidad de cálculo, de almacenamiento en memoria, de una rapidez en el cálculo nunca antes conocida a muy bajo costo y con alta eficacia parece, sin lugar a dudas, ideal. En sus comienzos, sin embargo, la computadora se presentaba como un gran ábaco capaz de realizar una enorme cantidad de cálculo que ningún ser humano –ni ningún equipo de seres humanos- podía llevar adelante.

Un caso histórico interesante es el caso del método Monte Carlo. Fue declarado como el origen de las simulaciones computacionales (por ejemplo, por Mize y Cox 1968), aunque sólo consistía en un método de resolución de ecuaciones diferenciales no-lineales mediante un isomorfismo formal con la teoría de probabilidades. Pero el uso y la variedad de simulaciones

computacionales va mucho más allá de Monte Carlo. Pongamos la mirada en la ciencia contemporánea, donde distintas disciplinas hacen un intenso uso de complejos cálculos matemáticos –tales como ecuaciones diferenciales ordinarias, polinomios, etc.- que no poseen solución analítica conocida. En biología, por ejemplo, las ecuaciones de Lotka-Volterra puede tomar condiciones iniciales tales que no haya solución analítica para un conjunto inicial de ecuaciones dadas. El modelo, por su parte, describe el dinamismo de un sistema biológico en el cual dos especies interactúan, una actuando como la presa y la otra como el depredador. Algo similar sucede en la dinámica de fluidos y gases modelada mediante las ecuaciones de Navier-Stokes. Este último caso es interesante pues, para conseguir soluciones próximas a lo que sería una solución analítica, las ecuaciones de Navier-Stokes sólo pueden ser encontradas con la ayuda de computadoras. Pero no sólo esto, también hay que tener presente que una gran variedad de algoritmos, estructuras de datos, arquitecturas de computadoras, métodos numéricos, etc., han ido evolucionando a fin de poder resolver estas ecuaciones, todo lo cual da la pauta de que no es sólo innovación tecnológica lo que rodea a las computadoras digitales sino además un abanico de elementos que interactúan como engranajes de una gran maquinaria lógico-matemática.

Los ejemplos pueden multiplicarse indefinidamente, pero podemos encontrar un punto en común, esto es, que existe gran cantidad de modelos confiables para los cuales sus ecuaciones no poseen solución analítica. Esto obliga, para su resolución, al empleo de métodos numéricos conjuntamente con el gran potencial de cálculo de las computadoras. ¿Debemos concluir de aquí que la resolución de modelos del cambio climático o del dinamismo de dos especies en un ecosistema depende de cuán versátil sea una computadora? ¿Podemos afirmar que, al reemplazar los tubos de vacío y las tarjetas perforadas por transistores, silicio y dispositivos ópticos, estamos hablando de la misma computadora? Desde luego la respuesta no es simple. No debería haber muchas dudas acerca de que el progreso general en la ciencia y en la tecnología, progreso que abarca desde la implementación y demostración de los algoritmos que utiliza un chip hasta los materiales que se implementan al fabricar ese chip, ha incrementado considerablemente el poder de cálculo con respecto a sus antecesoras. Pero hablar en estos términos no parecería que responde a la pregunta filosófica que aquí nos interesa, esto es, la pregunta acerca de qué es una simulación computacional, qué valor epistémico posee, en qué sentido su metodología es filosóficamente relevante, y preguntas similares. Es correcto indicar que, históricamente, los primeros usos de las computadoras sirvieron para la resolución de problemas intratables como los que hemos descrito anteriormente, pero en la actualidad el creciente éxito en las distintas prácticas científicas y la

implementación de nuevas técnicas hacen que la idea de las computadoras como meros instrumentos de cálculo parezca inadecuada —o al menos insuficiente— para capturar lo que los científicos hoy denominan simulaciones computacionales.

### Filosofía de las simulaciones computacionales

*Humphreys: simulaciones como sustituto de métodos analíticos*

En la literatura especializada es habitual hacer referencia a algunos artículos de principios de los 90 que establecieron, en cierta forma, los términos de la discusión actual<sup>3</sup>. Entre estos artículos se encuentra el de Paul Humphreys (1990), quién sugiere que lo que caracteriza las simulaciones no es tanto el uso de algún método computacional particular sino el que haga tratable problemas sin una solución analítica conocida. A pesar de las críticas que ha recibido este artículo, gran parte de la discusión posterior y las nuevas propuestas que se dieron en filosofía mantuvieron y discutieron con este marco de referencia.

Continuando con la disputa acerca de si las simulaciones computacionales son viejas técnicas en nuevas arquitecturas, Humphreys presenta dos condiciones para que un método numérico pueda ser interpretado como una simulación computacional. La primera condición consiste en que un método numérico debe aplicarse a problemas científicos específicos; la segunda condición destaca que el método debe ser computable en tiempo real e implementado en una máquina concreta. Estas dos condiciones transparentan la intención del autor de separar las simulaciones computacionales de métodos numéricos. Sin embargo, y desde mi punto de vista, Humphreys no consigue dar con una distinción clara.

Para comenzar, no es inmediato que un método numérico no se aplique sólo a problemas científicos específicos. Cualquier método numérico proporciona herramientas de resolución de operaciones matemáticas, por ejemplo encontrar la raíz de una función, resolver una integral o una derivada, que constituyen pequeñas partes de complejos problemas científicos. Pero ninguno de estos métodos esencialmente numéricos es exclusivo de un problema concreto. La segunda condición es menos objetable, pero igualmente confusa. Por un lado, parecería que Humphreys sugiere que un método numérico se diferencia de una simulación computacional por la *arquitectura* donde se despliega. Es decir que un mismo algoritmo es una simulación computacional si se implementa en una

---

<sup>3</sup> Esto no significa, desde luego, que la discusión filosófica sobre simulaciones computacionales comenzó por la década de los 90, sino que ha tenido un resurgimiento importante.

computadora digital pero no lo es si se computa mentalmente. Además, ¿a qué se referiría con “máquina concreta”? Tal vez se refiere a que dos arquitecturas de computadoras son dos “máquinas distintas”. Desafortunadamente, estas cuestiones no han sido desarrolladas en su artículo. En todo caso lo que parecería sugerirse es que las simulaciones computacionales son casos particulares de métodos numéricos con la única finalidad de encontrar soluciones a modelos matemáticos cuando nuestras capacidades analíticas se ven limitadas. Así es como Humphreys lo presenta en su ‘definición provisoria’ [working definition]:

*Definición provisoria:* Una simulación computacional es cualquier método implementado computacionalmente para explorar las propiedades de modelos matemáticos donde los métodos analíticos no están disponibles. (Humphreys 1990, p. 501)

A riesgo de simplificar demasiado las ideas de Humphreys, la ‘definición provisoria’ puede reinterpretarse en varios puntos esenciales. Primero, una simulación computacional es un mecanismo de resolución de modelos matemáticos. En este punto el autor ignora la metodología asociada a las simulaciones computacionales. No es correcto sugerir que un modelo matemático se implementa en la computadora para su resolución, pues se ignoraría no sólo los métodos de adaptación del modelo matemático en un modelo implementable en la computadora (como ser, métodos de discretización), sino que se ignorarían los cambios ontológicos (la mayoría de los modelos matemáticos son continuos cuando las simulaciones son discretas), introducción de errores (por ejemplo, errores de truncado, errores de redondeo, errores de programación, etc), entre otros aspectos a tener presente sobre simulaciones computacionales. Segundo, Humphreys toma que “cualquier método implementado computacionalmente” es posible. Esto no es enteramente correcto pues hay que ser cuidadosos con los límites impuestos por la teoría de la computabilidad, así como con consideraciones prácticas (como por ejemplo, que no se agote la memoria, que la simulación termine en un tiempo finito, etc).

El autor sugiere que, si refrescamos nuestra memoria con los usos tradicionales que se le dan a las simulaciones, entonces será posible captar su significado central. Para tal fin da una lista –que reconoce incompleta- de estos usos habituales :

- 1) Proveer métodos de solución para modelos matemáticos donde no se encuentren disponibles métodos analíticos.

2) Proveer experimentos numéricos en situaciones donde la experimentación natural es inapropiada (por razones prácticas) o inalcanzable (por razones físicas)

3) Generar y explorar modelos teóricos<sup>4</sup> de fenómenos naturales. (1990, p. 502)

Es interesante destacar que los tres casos propuestos por Humphreys presentan un común denominador: los tres son mecanismos de cálculo para la resolución de problemas matemáticos intratables. Asimismo, esta lista muestra cómo la caracterización de las simulaciones computacionales de Humphreys puede oscilar entre acercarse estrictamente a métodos numéricos (caso 1) y alejarse de dichos métodos (caso 3). Recordemos que estos casos paradigmáticos deben comprenderse bajo la lupa de la ‘definición provisoria’: el primero resulta trivial y explícito ya que es una repetición de la ‘definición provisoria’ y por ello no merece mayores comentarios. El segundo caso acepta el uso de métodos numéricos entendidos como “la parte de la matemática numérica concerniente a encontrar una solución aproximada y factible” (1990, p. 502). En otras palabras, no parecería ser más que la implementación del primer caso en situaciones especiales<sup>5</sup>. Por último, el tercer caso dependerá de cómo interprete el autor la idea de “explorar”. Si es entendida, como según creo, en el sentido de búsqueda de solución de modelos teóricos mediante el cálculo –tal y como se daría con fenómenos naturales como el caracterizado por las ecuaciones de Lotka-Volterra o Navier-Stokes-, entonces parecería que es una generalización del segundo caso y, por intermedio de este último, llegamos casi sin escalas al primero. La oscilación desde el caso 1 al caso 3 no se trata más que de gradaciones de un común denominador que se encuentra siempre presente, a saber, la ‘definición provisoria’, y por ello no es sorprendente la sensación de encontrarnos dando vueltas en círculos.

Pero dar vueltas en círculos no siempre es malo ya que se debería volver, luego de un tiempo, al mismo punto. Y Humphreys hace lo propio al admitir que “no hay diferencias entre simulaciones y cualquier otro tipo de modelo matemático” (1990, p. 501). Si el modelo matemático –o modelo teórico- que subyace en las simulaciones computacionales puede ser construido con cierto grado de realidad –esto es, no como una mera herramienta heurística- y está bien

---

<sup>4</sup> Humphreys identifica ‘modelos teóricos’ con ‘modelos matemáticos’.

<sup>5</sup> En este artículo, Humphreys no realiza ningún comentario especial acerca de lo que entiende por ‘experimentación natural’ [natural experimentation]. Tal y como veremos en otros autores, la idea de simulación computacional como ‘experimentación’ será muy explorada. Aquí tomo las palabras de Humphreys sin carga teórica.

confirmado, entonces la simulación computacional heredará este “realismo” del modelo teórico subyacente (Cf. Humphreys 1990, p. 502). Se trazan así dos direcciones: una que va del modelo científico a la simulación computacional y que proyecta las características del modelo en la simulación –idealizaciones, capacidades representativas, etc.- equiparándolos epistemológicamente –y hasta un cierto punto ontológicamente; y otra dirección inversa que toma la solución aportada por la simulación computacional como equivalente a la que podría aportar el modelo científico, equiparando funcionalmente las simulaciones con los modelos teóricos. La pregunta que queda flotando en el aire es ¿por qué diferenciar las simulaciones computacionales de los modelos científicos si son, al menos, epistemológica y funcionalmente equivalentes? Tal vez porque las simulaciones computacionales están usualmente orientadas a alcanzar soluciones aproximadas antes que soluciones exactas, pero esta respuesta difícilmente pueda ser un criterio suficiente para responder a la pregunta.

*Hartmann: simulaciones como procesos de representación*

Mucha de las investigaciones que actualmente se llevan a cabo en ciencias naturales y en ciencias sociales difícilmente pueden ser imaginadas sin el aporte de las simulaciones. Este parecer es la principal motivación de Hartmann para proponer una alternativa a la definición de simulación computacional de Humphreys.

La idea de simulación que maneja Hartmann está íntimamente relacionada con la noción de modelo teórico, en especial con la lectura de Achinstein acerca de los modelos teóricos en ciencia: “un conjunto de supuestos acerca de algún sistema” (Achinstein, 1968). Debemos distinguir, a su vez, entre *modelos dinámicos* y *modelos estáticos*. La diferencia es que en el primero se incluyen supuestos acerca de la evolución temporal del sistema, mientras que el segundo carece de ellas. Las simulaciones se asocian con los modelos dinámicos o, más concretamente, “una simulación resulta cuando las ecuaciones del modelo dinámico subyacente han sido resueltas” (Hartmann 1996, 5). Así, una simulación no es más que un modelo dinámico con capacidad de resolución mediante cálculo; si la simulación es ejecutada en una computadora, es denominada *simulación computacional*. En otras palabras, Hartmann define las simulaciones computacionales como “un proceso que imita otro proceso” (Hartmann 1996, p. 5), donde ‘proceso’ se refiere a una secuencia temporal de estados de un sistema.

Hasta aquí un modelo dinámico de un sistema, como puede ser una bola atada a un palito mediante una cuerda que modele el movimiento centrífugo, no

se diferencia, exceptuando en la arquitectura donde se ejecuta, de un programa de computadora que haga lo mismo. Ambos *imitan un proceso mediante otro proceso* en tanto que ambos pueden ser entendidos como dos modos de representar una secuencia temporal de estados del movimiento centrífugo. Un caso más problemático se presenta al preguntar acerca de las distinciones entre simulaciones –entendidas como procesos- y otros procesos que también lleva adelante la computadora. En este caso la mera referencia a la caracterización de Hartmann no parece suficiente. Por ejemplo, la distinción entre simulación y emulación es un buen caso. Esta distinción, muy utilizada en las prácticas computacionales y para los cuales se desarrolla software especializado, no tiene mucha repercusión en la literatura filosófica acerca de simulaciones computacionales. Una emulación es entendida como un software de computadora que intenta imitar el comportamiento de un sistema. Así, diríamos que una máquina virtual, por ejemplo, imita el comportamiento de la arquitectura de una máquina real –física-, aunque no diríamos que la simula. El cambio conceptual se daría no sólo a niveles prácticos, sino y fundamentalmente a niveles teóricos. Cuando se construye una máquina virtual, es teórica y tecnológicamente posible *reproducir* una determinada arquitectura (x86, Mac, etc.) de modo tal que, sin importar el sistema operativo que se le implemente, el sistema responderá *como si* fuese una arquitectura real.

Ahora, si la sometemos a la caracterización que hace Hartmann de las simulaciones, podremos ver que una emulación se corresponde, *mutatis mutandis*, con una simulación ya que ambas imitan el mismo proceso, a saber, el funcionamiento de una computadora. El punto filosófico importante es que una máquina virtual es una emulación de una máquina real en un sentido fuerte, y como tal, absorbe la noción de representación de Hartmann. Una simulación, por el contrario, no se comporta *como si* fuese un fenómeno sino, más bien, tiene el sentido más débil de *imitación*. Para que una simulación se comporte *como si* fuese un fenómeno, debería identificársela con alguna noción de experimento que no sea la mera idea de *experimento numérico*, que es a fin de cuentas la que trabaja el autor.

Volviendo a la definición de Hartmann, vemos que al acentuar el vínculo entre simulaciones computacionales y modelos dinámicos el autor cree poner distancia con las ideas de Humphreys. Hartmann le critica que la ‘definición provisoria’ de Humphreys no afirma el carácter dinámico de los modelos subyacentes. Tal y como lo considera, los científicos reservan el término ‘simulación’ exclusivamente para la exploración de modelos dinámicos, y este hecho no ha sido suficientemente enfatizado por Humphreys. Además una simulación computacional debe ser útil aún cuando se disponga de métodos

analíticos. Como dije, estas dos críticas ponen distancia entre los dos autores y lanzan a Hartmann a la caza de las diversas funciones de las simulaciones. Estas funciones pueden sintetizarse en la siguiente lista: simulaciones como una técnica que investiga el dinamismo de un sistema; simulaciones como herramientas heurísticas para desarrollo de modelos y teorías; simulaciones como sustitutos de experimentos, llevando a cabo experimentos numéricos; inclusive simulaciones como herramientas pedagógicas que permiten la adquisición de conocimiento de un proceso. Todas estas funciones tienen algo en común, esto es, son distintas manifestaciones de nuestra comprensión de los modelos y las teorías que subyacen a las simulaciones. En palabras del autor:

Debo enfatizar nuevamente que es importante, al ejecutar una simulación, tener razones para creer en los detalles del modelo o teoría subyacente, los cuales son independientes de los resultados de una simulación completa. (Hartmann 1996, p. 11)

Las simulaciones funcionan así como un puente tendido entre el conocimiento del científico y la teoría o modelo que aun no logra ser claramente comprendido. Ya sea por razones pragmáticas, éticas o teóricas, la ventaja de las simulaciones es que “permiten al científico explorar los detalles dinámicos de un proceso real” (Hartmann 1996, p. 6). La posibilidad de obtener soluciones precisas de las ecuaciones del modelo subyacente tiene la consecuencia interesante de que permite ‘probar’ el modelo o teoría. En efecto, “cada término en el modelo tiene que ser interpretado completamente. No hay entendimiento de un proceso sin un entendimiento detallado de las contribuciones individuales al modelo dinámico” (Hartmann 1996, p. 8) El camino que va desde los modelos a la simulación es un camino sin curvas, sin carteles, sin distracciones, y que sólo transitamos para ver con ojos más claros el origen del cual partimos.

Asimismo, comparar los resultados de una simulación con el “mundo real” permite que se valore críticamente la teoría en cuestión. Éstas inspiran experimentos cuando, por ejemplo, nuevas regularidades o hipótesis han sido encontradas mediante el análisis de los resultados de las simulaciones para diferentes parámetros. Preseleccionan sistemas posibles cuando es difícil encontrar los parámetros que demuestran los efectos que los experimentalistas están buscando, en especial en experimentos reales. O analizan experimentos cuando efectos triviales o conocidos han sido abstraídos para identificar contribuciones no tan triviales. Quiero hacer notar dos detalles que están vinculados. El primero consiste en que, desde la perspectiva de Hartmann, las simulaciones contribuyen solamente como experimentos numéricos. Así entendida, la función de las simulaciones es muy limitante, en especial cuando se reconoce que las simulaciones pueden contribuir en situaciones donde existen

limitaciones prácticas (p.e., cuando es imposible realizar un experimento sobre galaxias). En todo caso, el asombro disminuye al recordar el asfixiante vínculo que une las simulaciones computacionales con los modelos dinámicos y, por lo tanto, el limitado alcance de las primeras. El segundo detalle que hay que observar es que las tres tareas que Hartmann asignó a las simulaciones computacionales siempre tienen como correlato la comparación con un experimento real. Nuevamente esto es confuso pues las simulaciones computacionales son tanto o más útiles en situaciones donde es pragmáticamente imposible realizar un experimento real. Lo que está en juego aquí son los supuestos de Hartmann sobre la confiabilidad de los resultados de una simulación. Para él, el conocimiento obtenido por una simulación es menos confiable que el obtenido de un experimento, una idea que se propagó viralmente, y que es enteramente falsa. Es fácil mostrar que la confiabilidad en los resultados de las simulaciones, y por lo tanto en el conocimiento que de ellas depende, ni es extrapolable y comparable con los experimentos reales, ni tiene menos valor epistémico por no interactuar directamente con el mundo. Como mencioné, esta idea se propagó mucho en la literatura posterior, al punto que se trazaron las más absurdas comparaciones entre simulaciones computacionales y experimentos reales<sup>6</sup>.

Después de comprender que sólo importan las simulaciones computacionales en tanto metodología de comprensión de teorías y modelos subyacentes, y no como una herramienta con “vida propia”, es comprensible pensar que todo el asunto se trata acerca de *imitar* otro proceso. La imitación permite, hasta cierto punto, aplicar las mismas reglas de comprensión a ambas puntas del proceso. Si disolviéramos la imitación, la simulación cobraría vida y se instanciaría como semiautónoma –no independiente- de la teoría y del modelo subyacente. Pero estas ideas de semiautonomía no tienen ningún valor en tanto que, para Hartmann, se perdería el mayor beneficio que poseen las simulaciones computacionales, esto es, una lupa de lo que subyace y se encuentra inaccesible para el científico. En este sentido una bola atada por una cuerda a un palito y que “simula” la fuerza centrífuga tiene el mismo estatus epistemológico –en tanto nos permita comprender las leyes que subyacen al movimiento- que el de un código ejecutándose en una computadora y que “simule” el mismo proceso. Dos procesos que *imitan* un mismo proceso son, desde la perspectiva de Hartmann, epistémicamente equivalentes.

---

<sup>6</sup> Véase el trabajo de Durán 2013.

*Simpson: las simulaciones no son modelos (científicos)*

Otro filósofo que ha llevado adelante estudios en materia de caracterización de simulaciones computacionales ha sido John Simpson (2009). Este autor propone distinguir entre simulaciones computacionales y modelos científicos en un sentido que no habíamos visto en los autores anteriores. Puesto como un eslogan, para Simpson las simulaciones *no* son modelos.

Hay tres razones que fundamentan esta diferencia. Las dos primeras consisten en realizar experimentos mentales a fin de mostrar que los modelos computacionales<sup>7</sup> utilizados en las simulaciones son independientes funcional y ontológicamente de los modelos científicos. La tercera razón consiste en un cambio de mirada a los modos en que las simulaciones son usadas en la práctica científica. Simpson cree que este cambio permitirá concebir las simulaciones como un tipo especial de experimentación auto-contenida de estados conectados por otros estados: “la simulación es la actividad de inferir estados futuros” (Simpson 2006, p. 1).

Comencemos primero viendo qué noción de modelo científico maneja el autor para luego dar paso a la noción de simulación computacional. Una vez que tengamos estos dos conceptos más o menos identificados, mostraré cuáles son las razones que llevan a Simpson a pensar que las simulaciones computacionales no son modelos científicos.

Simplificando en gran medida, Simpson reconoce tres perspectivas de modelos científicos que deben ser consideradas:

1. Modelos como entidades abstractas: aquí analiza algunos aspectos ya vistos de la concepción sintáctica y de la concepción semántica de teorías.

2. Modelos físicos: la idea principal es que los modelos tienen una relación isomórfica e imperfecta con algún objeto real. A pesar de la imperfección de esta relación, estos modelos sirven como instrumentos de instrucción e investigación.

---

<sup>7</sup> A fin de preservar la distinción entre modelo científico y otro tipo de modelo (*no* científico) que requieren las simulaciones computacionales, utilizo el término ‘modelo computacional’. Simpson utiliza el término ‘modelo subyacente’, pero esta terminología no es suficiente para distinguir de modelos científicos.

3. Modelos como instrumentos de mediación: aquí analiza algunos aspectos ya considerados de la perspectiva de Mary Morgan (2005) y Margaret Morrison (2009). (Cf. Simpson 2006, p. 4 y ss)

No es difícil identificar cuáles son las diferencias en cada una de estas perspectivas. Lo interesante es, en todo caso, que el autor hace el esfuerzo de encontrar un espacio en común donde asentar una concepción de modelo científico con la cual trabajar. Para el autor cada interpretación filosófica concibe la noción de modelo como un conjunto de relaciones que se constituyen como vínculos representacionales con aquello que es modelado. Así pues, los modelos científicos son entendidos como un conjunto de relaciones representacionales, entendidas éstas en un sentido muy amplio.

En cuanto a las simulaciones, se apela a una noción intuitiva de qué calificaría como un ejemplo de simulación computacional. Es evidente que la mera referencia a los procesos ejecutados en una computadora es insuficiente; de allí que Simpson apele a un sentido intuitivo de cuáles procesos realizados por computadoras pueden ser considerados simulaciones y cuáles no: una hoja de cálculo parece tener importantes diferencias “naturales” con respecto a otros procesos ejecutándose en una computadora digital. Pero esto es claramente insuficiente para trazar cualquier tipo de definición. A fin de superar este problema, Simpson apela a la distinción entre simulaciones computacionales *abiertas y cerradas*.

Una simulación *abierta* consiste en la intervención de nuevos valores de entrada en distintas ocasiones y durante toda la simulación. En este sentido, los valores de entrada provenientes del operador son considerados como partes integrantes de la simulación. Un ejemplo típico de simulación abierta es la de un simulador de vuelo. En este caso interviene un piloto –humano– que interactúa con la computadora mediante un conjunto de controles. Basados en los valores de entrada provistos a través de dichos controles, la computadora produce un conjunto de valores de salida que deben ser considerados como representaciones de lo que realmente sucede en un avión real. Por el contrario, una simulación computacional *cerrada* es aquella que se encuentra auto-contenida una vez que los valores iniciales de entrada han sido provistos. En este caso, la simulación contiene toda la información necesaria para completarse sin la necesidad de la intervención de ningún operador.

Para el caso de la simulación abierta, la presencia de un piloto humano hace difícil llamar a todo el sistema una simulación pues el operador es entendido como una ‘instancia’ o ‘actualidad’, esto es, un agente externo al proceso que lo interviene regularmente. El autor entiende que, intuitivamente, no

clasificaríamos la interrelación entre un proceso computacional y una ‘instancia del operador’ como una simulación computacional. Las razones son que tanto el caso de una hoja de cálculo como el de una simulación de vuelo se parecen. En efecto, ambos casos un operador provee un conjunto de valores de entrada a la computadora que, a su vez, provee un conjunto de valores de salida que son usados por el operador como un nuevo conjunto de valores de entrada, iniciándose todo el proceso nuevamente. Como bien lo indica Simpson,

Dado que estamos buscando un conjunto de ejemplos que puedan, sin disputa, ser considerados simulaciones, algunos usos de las computadoras que complican la cuestión mediante una regular intervención externa, como el caso de los simuladores de vuelo, necesitan ser excluidos hasta que hayamos desarrollado las herramientas conceptuales para tratar con su estatus. (Simpson 2006, p. 11)

No continuaré la discusión de estas ideas del autor ya que lo que interesa, en todo caso, es trazar una caracterización de las simulaciones computacionales.

#### *Las simulaciones no son modelos científicos: Experimentos mentales I*

Consideremos una simulación que se puede detener temporalmente de modo que no se degrade ninguno de sus estados<sup>8</sup>. La pregunta que se hace el autor es si el proceso suspendido puede ser considerado una simulación. La respuesta que da es negativa puesto que si una simulación es un proceso, entonces no habría algo que ha sido pausado. De aquí infiere que no hay simulación puesto que no hay proceso en ejecución. De acuerdo a Simpson,

A pesar de la continua existencia de un modelo apropiado dentro de los datos no tenemos una simulación al parar; la existencia de este modelo dentro de los datos no constituye un proceso en ningún sentido en el que consideramos que las simulaciones son procesos, indicando que los ambos no son lo mismo. (Simpson 2006, p. 14)

En cambio lo que tenemos es una colección de estados dentro del hardware de una computadora que representa algún conjunto de datos –considerados como una descripción de ‘un estado de cosas’- y las instrucciones de qué hacer con estas descripciones. El truco, para Simpson, está en detener la simulación en un

---

<sup>8</sup> Un caso en el cual sí se degradan parece ser el de la mayoría de las simulaciones analógicas tales como un túnel de viento; una vez que se detiene la simulación no hay ya capacidad representacional y por tanto no hay ni simulación ni “modelo”.

punto  $t$  y, rastreando el estado del hardware hasta un código de alto nivel, obtener un modelo de dicho estado del hardware:

Pensando que este código fue escrito para capturar algún conjunto de relaciones observadas en otro lugar, entonces podemos considerar al programa como una representación de esas relaciones y, por lo tanto, de un modelo. Los datos que permanecen al detenerse la simulación retendrán este conjunto de relaciones y, a través de su linaje, los caracteres representativos de esas relaciones que califican como un modelo. (Simpson 2006, p. 13)

Para Simpson, entonces, un código de programa en tanto ejecutándose en la máquina posee todos los criterios relevantes para ser considerado un modelo computacional, ya que actúa como representación de un estado de cosas.

Antes de considerar qué sucede cuando se restablece la simulación, debemos primero analizar las dos últimas afirmaciones del autor. Para comenzar, no se ve cómo es posible –en términos técnicos- detener una simulación y establecer una relación directa con un lenguaje de alto nivel. En la ejecución de un proceso computacional –de cualquier tipo- intervienen distintas ‘capas’ que conforman un sistema operativo; pero para pensar que un proceso está en ejecución, se debe pensar que está asociado con una dirección en memoria que a su vez contiene el programa que se ejecuta, los datos y su *stack*<sup>9</sup>. También se encuentra asociado con cada proceso un conjunto de registros, incluyendo el contador del programa, punteros del stack, otros registros de hardware y gran cantidad de información necesaria para ejecutar el programa. Cuando un proceso es suspendido temporalmente se debe reiniciar en exactamente el mismo estado que tenía cuando se detuvo –asumiendo que no ha habido ningún conflicto. Esto significa que toda la información con que contamos acerca de un proceso debe ser explícitamente guardada en algún lugar durante la suspensión. Por ejemplo, el proceso puede tener distintos archivos abiertos para lectura. Asociado con cada uno de estos archivos, un puntero deberá dar la posición de dicho archivo –esto es, el número del byte o record que debe ser leído después- (Cf. Tanenbaum y Woodhull 1997).

Lo que quiero señalar aquí es que, junto con esta gran maraña de información que se debería reconstruir para identificar el modelo, también se debería reconstruir el particular estado del sistema operativo donde se ejecuta el proceso computacional. Pero aun aceptando esto, técnicamente difícil y prácticamente imposible, no habríamos avanzado en casi nada. Si se tiene en cuenta el

---

<sup>9</sup> Esto es, una zona física de memoria donde se guardan variables locales de subrutinas y funciones, parámetros, resultados intermedios de cálculos complejos, etc.

procedimiento usual del scheduler<sup>10</sup> del sistema operativo, se verá que permanentemente los procesos se están deteniendo y retomando desde el instante en que se dejaron. Pero la información guardada en cada detención nunca podrá ser la misma dado que el scheduler del sistema operativo funciona mediante un reloj que le indica cómo, dónde y cuándo almacenar información para detener un proceso y comenzar otro. Todo lo cual da la idea de que tenemos potencialmente infinitas relaciones y estados de un proceso detenido que “representan” el mismo modelo. Simpson no da cuenta de cómo es posible realizar semejante tarea ni quién –o qué– podría reconocer que en el instante de detención  $t_i$  y  $t_{i+1}$  tenemos, potencialmente, dos conjuntos relacionales que constituyen el mismo modelo.

Una respuesta iluminadora sería considerar que esta maraña puede resolverse si establecemos una jerarquía de modelos computacionales y distinguimos aquel modelo que controla de manera más directa la simulación. En efecto, Simpson considera que existe un *modelo ideal* definido como la intersección de todos los modelos computacionales que constituyen una simulación, siendo éste el modelo más simple posible que podría producir la simulación. Los modelos ideales, entonces, interpretan a todos los modelos computacionales que podrían producir datos de la simulación (Simpson 2006, p. 27). En este sentido, el modelo ideal estaría contenido en todos los modelos computacionales.

Ahora bien, si se considera seriamente que identificar un modelo computacional en una maraña de información es técnica y prácticamente difícil, encontrar un modelo ideal es claramente imposible. Debemos pensar que para lograr identificar el modelo ideal que guía a la simulación sería primero necesario identificar cada uno de los modelos computacionales de la familia de modelos que intervienen en una simulación, y luego identificar la intersección<sup>11</sup>. Ante esta situación, podríamos especular, Simpson apelaría a la distinción ‘en principio/en práctica’ y sostener que encontrar el modelo es teóricamente posible, aunque prácticamente dificultoso. La repuesta a esto sería que en el fondo se oscurece la idea de un modelo ideal como convergente de estados de hardware y datos de los modelos computacionales, ya que éstos no pueden ser conocidos teóricamente.

---

<sup>10</sup> El scheduler es una parte del sistema operativo que se encarga de administrar los procesos, detenerlos, volverlos a ejecutar, etc. todo lo cual debe manejar el stack de memoria, punteros y demás requisitos para restituir a su estado original un proceso previamente ejecutándose. (Tanenbaum y Woodhull 1997, p. 82)

<sup>11</sup> Es factible pensar que estos modelos interactúen entre sí, en especial dentro lo que constituye la intersección, todo lo cual parecería sugerir que además de identificar a la familia de modelos, debo identificar a esta supuesta interacción *antes* de poder saber algo del modelo ideal.

Preguntemos ahora, ¿qué ocurre cuando volvemos a restablecer la simulación? Sería algo similar a si el tiempo se detuviera para nosotros y se volviera a activar. En tanto todo nuestro marco de referencia se detiene con nosotros, cuando se vuelve a activar es como si nada hubiera ocurrido:

Dado que podemos empezar un programa de nuevo (...) entonces, resumir una simulación pausada debe ser considerado una simulación puesto que reiniciar una simulación pausada es, técnicamente, indiferente a comenzar una nueva simulación que comparte el mismo conjunto inicial de estados. (Simpson 2006, p. 14)

El modelo computacional que se desprende de los datos de la simulación resiste el proceso de detención y reinicio ya que permanece aun dadas las interrupciones mencionadas. Nuevamente, para Simpson esto es posible porque, en principio, podemos obtener en cualquier momento un modelo computacional del estado de hardware y de los datos de la computadora. Estos modelos, pues, son necesarios para la existencia de las simulaciones y dirigen la conducta de éstas. En definitiva, Simpson considera que las simulaciones no son idénticas a los modelos científicos tradicionales por razones ontológicas y funcionales. Analizar la distinción desde esta perspectiva parece ser lo correcto. Sin embargo queda la duda que Simpson haya logrado el cometido que se proponía, ya que no ha conseguido identificar claramente lo que es un modelo computacional y, por lo tanto, defender la distinción. Analicemos brevemente su segundo experimento mental y veamos si consigue sostener su tesis de que las simulaciones computacionales no son modelos científicos.

#### *Las simulaciones no son modelos científicos: Experimentos mentales II*

A fin de considerar la posibilidad de que las simulaciones puedan ser modelos científicos dinámicos, necesitaremos una caracterización que encuadre en este concepto. Así, Simpson entiende que los modelos dinámicos son “modelos que representan uno o más procesos, i.e., representan cambios entre estados y los mecanismos que ocasionan tales *cambios*” (Simpson 2006, p. 16. Subrayado en original). Dada esta caracterización, Simpson pregunta ¿deberían verse las simulaciones como modelos dinámicos? La respuesta es, nuevamente, negativa. Para el autor, una simulación es un proceso paso-a-paso dirigido por la lógica de un modelo computacional donde el futuro estado está determinado por la dirección de una lógica relacional. Y esto no es verdadero de los modelos dinámicos en general (Simpson 2006, p. 16).

A fin de ver que las simulaciones son dirigidas por la lógica de sus modelos computacionales, Simpson sugiere una computadora que representa los movimientos de los planetas del sistema solar mediante un conjunto de estados internos y que sea comparada con el mismo sistema solar pero dibujado en un flip-book. En este ejemplo, podemos apreciar más o menos el mismo movimiento del sistema solar tanto en la simulación como en el flip-book. En este último, al mover las páginas rápidamente se representa el movimiento de los planetas alrededor del sol –cada página captura un estado sucesivo tomado de la página anterior y las diferencias entre estados indican cambio. En comparación, entonces, la simulación parece no ser diferente de un flip-book: mostrando el mismo movimiento de los planetas alrededor del sol, la simulación tiene las mismas propiedades representacionales que el flip-book y mantiene las mismas relaciones con el sistema solar (Simpson 2006, p. 17). Pero aquí sólo estamos viendo y comparando el resultado de los dos procesos; si intentamos investigar más profundamente veremos que las similitudes comienzan a desdibujarse. En particular, ni las mismas propiedades representacionales se mantienen (por ejemplo, el nivel de detalle formal que permite la predicción de futuros estados del sistema solar en la simulación no está presente en el flip-book), ni los dos procesos son ontológicamente iguales. Estos dos puntos están en el fondo del argumento de Simpson, y es central entenderlos más cabalmente para ver por qué las simulaciones no son modelos dinámicos.

En el caso del flip-book el movimiento planetario es representado mediante la sucesión de imágenes que están siendo presentadas. El orden de esta sucesión es determinado por los dibujos y por nuestros dedos haciendo mover las páginas a una determinada velocidad. Por el otro lado, si bien la simulación puede proveer el mismo conjunto de imágenes, no debe reducirse este proceso al considerado en el caso del flip-book. Antes de que cada imagen sea presentada, la computadora debe determinar cuál es la siguiente imagen, y toma esta decisión en base a cierta información que tiene tales como la descripción de ciertos estados iniciales y finales, cierta estructura lógica y matemática contenida en el modelo computacional, etc. El flip-book, por el contrario, no realiza ninguna toma de decisión por sí mismo. Esto puede parecer absurdo, pero debemos considerar que el flip-book sólo podría responder a la pregunta “¿cuál es el próximo paso?” si se la hiciéramos a la persona que mueve las páginas. En definitiva, el flip-book requiere la intervención e interpretación de alguien fuera de sí mismo –nosotros-, mientras que la simulación pasa de estado en estado sin más ayuda que la lógica de su estructura.

Simpson concluye que la existencia de una determinación interna de estados en una simulación permite diferenciarla de algunos modelos dinámicos ya que

éstos no permiten la determinación interna de estados, tal y como sucedía con el flip-book. Ahora bien, como no es posible sostener que todos los modelos dinámicos son como el flip-book, entonces quedan tres vías posibles: una es aceptar que las simulaciones son un tipo especial de modelo dinámico, lo cual lo llevaría a invalidar su tesis inicial, aunque sería más consistente con una mirada puesta en la práctica científica actual. La otra es truncar la asimilación entre simulaciones computacionales y modelos científicos, afirmando que sólo aquellos modelos dinámicos con determinación interna de estados son equivalentes a simulaciones computacionales. Finalmente la tercera vía, que es la aceptada por el autor, establece que todos los modelos dinámicos con determinación interna sean excluidos de dicha categoría a fin de que se distingan de las simulaciones. En otras palabras, Simpson estaría sugiriendo que se recategoricen todos los modelos dinámicos con determinación interna a una categoría que aun no ha sido definida con el sólo propósito de sostener su propia tesis.

Una salida más elegante sería admitir la derrota y considerar que las simulaciones sí son un tipo de modelo científico (dinámico o de otro tipo). Uno podría aceptar que las simulaciones son un tipo *especial* de modelo científico, y esto estaría en perfecta sintonía con la práctica científica actual. El valor especial de las simulaciones se puede analizar desde distintos ángulos. Por ejemplo, desde la perspectiva metodológica, un modelo científico debe ser discretizado (entre otros procesos formales y no formales que permiten la implementación de la simulación). Desde una perspectiva ontológica, los modelos computacionales son algoritmos, una entidad enteramente diferente a las tradicionales ecuaciones diferenciales (por sólo mencionar un solo tipo de simulación computacional). Finalmente, desde una perspectiva epistémica, el poder de cálculo de una simulación hace que el conocimiento que se obtenga no sea para nada comparable al que se obtiene mediante el cálculo de papel y lápiz de un modelo científico. A mí entender, el proyecto de Simpson tiene una serie de obstáculos que no parece que el autor haya sabido solucionar. Ahora voy a discutir la última de sus razones por las cuales las simulaciones no son modelos.

### *Práctica científica*

Simpson entiende que la distinción entre simulaciones y modelos dinámicos queda más clara si se interpretan las primeras como un tipo especial de experimento. Según lo entiende el autor, los experimentos “son *actividades* mediante las cuales buscamos adquirir datos observacionales y, al hacer esto, apoyar o cambiar nuestras perspectivas del mundo” (2006, p. 20). A pesar de la

cercanía que los modelos científicos y los experimentos poseen en tanto acceso al mundo, se mantienen distintos. En efecto, pese a que los modelos pueden verse como instrumentos de investigación, debemos mantenerlos separados de los experimentos, al menos conceptualmente. Los modelos científicos, como ya hemos visto, son entendidos como representaciones relacionadas con otros objetos, abstractos o físicos, que constituyen nuestro conocimiento del mundo y de sus operaciones. Parece, así, que los modelos pueden funcionar como marco de acción en el cual los experimentos pueden desarrollarse. Pero es justamente por ello que, a través de un proceso de éxitos y fracasos experimentales, refinamos nuestros modelos y teorías, colocándose así en un nivel de abstracción mayor al de la experimentación tradicional. Con esta división en mente, se puede argüir que las simulaciones son experimentos y no modelos científicos si y sólo si podemos mostrar que las simulaciones son entendidas como experimentos. La evidencia de que las simulaciones son experimentos descansará, de acuerdo con Simpson, en que la comparación entre los fundamentos de ambas son idénticos.

Cuando se pregunta por qué las simulaciones son usadas, además de preguntar por razones éticas o económicas, se está preguntando fundamentalmente por las prestaciones que éstas ofrecen a aquellos que hacen uso de ellas. Simpson despliega tres de estas prestaciones:

*Demostración:* la precisión matemática con la cual las computadoras completan tediosos cálculos está establecida en la comunidad científica. Así pues, efectuar las demostraciones de teoremas, hipótesis, etc. que hoy llevan a cabo las computadoras es prácticamente imposible realizar a mano. Y a pesar de que se podría demostrar que un código se comporta como es esperado, sólo lograríamos estar seguros de que la demostración es correcta. Como puede verse, Simpson acepta el uso de la simulación como mecanismo de resolución de problemas numéricos. (Cf. Simpson 2006, p. 21)

Además las simulaciones, a diferencia de los modelos, no necesitan ser representativos de procesos actuales sino también pueden serlo de procesos hipotéticos o ideales.

*Puesta a punto:* Cuando la complejidad de las teorías y de los modelos es demasiado alta para que podamos determinar “a ojo” algo acerca de su predicción, la utilización de simulaciones computacionales pasa al centro de la escena. Especialmente durante su etapa de construcción, los científicos están atentos al modo en que se configura e implementa la simulación a través de cuidadosos diseños del modelo que caracteriza la situación en cuestión. (Cf. Simpson 2006, p. 22)

*Inferencia:* Una vez satisfecho con el modelo computacional, el científico explora las inferencias del modelo probándolo con distintos conjuntos de datos

(posibles o imposibles, reales o ficticios). Es en este punto donde las simulaciones actúan como mundos artificiales suficientemente similares al nuestro tal que podemos trazar inferencias y paralelos entre ambos. (Cf. Simpson 2006, p. 23)

Los experimentos tradicionales -y las simulaciones computacionales-, según Simpson, tienen una larga historia de contribuciones con demostraciones, puesta a punto, e inferencias. Son estas cercanías en los papeles de las simulaciones computacionales y los experimentos que nos lleva a aceptar la coincidencia de una con el otro.

A pesar de esta cercanía, sin embargo, Simpson acepta que una identificación definitiva no es segura. Simplemente no debemos aceptar las simulaciones como estando a la par con lo que se suele denominar “experimentos tradicionales” ya que, si bien las simulaciones tienen las mismas funcionalidades que los experimentos, lo hacen de modos diferentes. Estos experimentos tradicionales son llevados a cabo *directamente* en el mundo real, todo lo cual significa que la interacción y las respuestas se ejecutan como una ‘instancia del operador’. En contraste, en las simulaciones computacionales sólo pueden llevar a cabo investigaciones de entidades por vía de una representación de esas entidades, es decir, por vía de representar nuestro entendimiento del mundo y de cómo éste funciona. Esta diferencia –entre un acceso *directo* al mundo o un acceso *indirecto* mediante una representación- es la que lleva a sospechar que la identificación, al menos a nivel ontológico, no es posible.

A pesar de que las simulaciones calificarían en principio más propiamente como experimentos que como modelos científicos, aun mantienen ataduras con los últimos en tanto que hacen uso de un modelo computacional, el cual podría encontrarse ausente en los experimentos<sup>12</sup>. En un experimento tradicional es el mundo el que responde, por así decir, a nuestras intervenciones y manipulaciones. De este modo, de acuerdo con Simpson, se prescinde de la presencia de modelos científicos<sup>13</sup>. En una simulación, por el contrario, el modelo computacional es del todo importante ya que toma el lugar de la “estructura del mundo”, es decir, se constituye en el mundo donde la simulación tiene lugar. No obstante Simpson continúa afirmando que las simulaciones son consideradas *más propiamente* experimentos (que modelos científicos): “si comúnmente fueran consideradas modelos, entonces no sólo esperaríamos verlas

---

<sup>12</sup> Morrison (2009) ha argüido a favor de una identificación entre modelos científicos, simulaciones computacionales y experimentos tradicionales.

<sup>13</sup> Nótese que esto no es enteramente correcto. Existe gran cantidad de experimentación que hace uso de modelos con fines correctivos y de calibración de datos. Por ejemplo, las mediciones obtenidas mediante un péndulo real son usualmente corregidas con el modelo de un péndulo teórico.

usadas como modelos con más frecuencia, sino que deberíamos esperar verlas referidas con un nombre que capture su naturaleza como modelos” (Simpson 2006, p. 25).

Simpson se encuentra evidentemente encerrado en su propio argumento. No ha conseguido dar con una diferencia sustantiva entre simulaciones y modelos, o al menos no lo ha conseguido con la fuerza que inicialmente sugería. Tampoco ha dado con una identificación más o menos plausible de las simulaciones computacionales con los experimentos.

### Conclusión

En este trabajo me propuse mostrar los principales problemas que aparecen en tres definiciones filosóficas de lo que es una simulación computacional. Lejos de agotar la literatura en la materia, y lejos de hacer una crítica exhaustiva, lo que se desprende de este trabajo es que todavía queda mucho por hacer en esta área relativamente joven del conocimiento científico y filosófico.

Hasta aquí todos los filósofos que he considerado dan por sentado que las simulaciones computacionales son posibles *gracias a* uno o varios modelos computacionales. Aceptado este supuesto, la discusión discurre entonces entre aceptar las simulaciones como un nuevo tipo de modelo o diferenciarlas tratándolas como algo distinto, usualmente como un experimento al que le subyace un modelo.

Humphreys, en el comienzo del desarrollo de sus ideas, se inclinó por la primera interpretación la cual fue duramente criticada y posteriormente superada. Fue de hecho Hartmann quien le señaló a Humphreys que sus ideas era ‘cortas’ y ‘extensas’ al mismo tiempo. Sin embargo, y como espero haber mostrado, Hartmann tampoco consigue una caracterización aceptable de simulaciones computacionales. Sus ideas de simulaciones como “procesos que imitan otro proceso” son, en el fondo, un tratamiento de las simulaciones como ‘lupas’ para ver más allá, para ver el modelo o la teoría involucrada. Es por ello que para Hartmann la simulación no tiene ‘vida propia’ sino se trata, en última instancia, de un mecanismo viable para otra cosa, que tiene mayor importancia epistémica. Así, la propuesta de este autor da la sensación de que si las simulaciones computacionales fueran reemplazadas por un mecanismo que nos permita “ver” el modelo o la teoría involucrada en un fenómeno, entonces podríamos librarnos de las simulaciones sin mayores pesares.

Tanto Humphreys como Hartmann toman los modelos (científicos o computacionales) como aquello que constituye la base donde se asientan las

simulaciones computacionales. Pero nada nos compromete a aceptar esta caracterización. Simpson ha sido uno de los pocos filósofos que considera que existe una desvinculación funcional y ontológica entre las simulaciones computacionales y una concepción tradicional de modelo científico. Estas ideas de Simpson tienen, tal como he mostrado, diversos problemas técnicos como filosóficos. Pero lo interesante de sus ideas es que rompen con el eje tradicional ‘modelo científico-simulación computacional’ discutido previamente.

Todavía queda un largo camino por recorrer en materia filosófica. Evaluar las credenciales epistémicas en sus aspectos internos: programación, prueba, demostración, verificación, sintaxis, semántica, etc.; evaluar las credenciales epistémicas en sus aspectos externos: aportar una taxonomía de la diversidad de simulaciones computacionales que pueden encontrarse dentro de la ciencia contemporánea, avanzar en la dilucidación de la relación entre modelos y simulaciones computacionales en ciencia, explorar las relaciones entre las simulaciones computacionales en ciencia y los experimentos reales, etc. serán sólo algunos de los objetivos específicos que se deben abordar a fin de dar con una caracterización apropiada a la práctica contemporánea de simulaciones computacionales.

## **Bibliografía**

- Achinstein, P. *Concepts of Science*. Baltimore, Johns Hopkins Press, 1968.
- Durán, J. M. “A Brief Overview of the Philosophical Study of Computer Simulations” *APA Newsletter on Philosophy and Computers*, 13, 2013, 38-46.
- Durán, J. M. “The Use of the ‘Materiality Argument’ in the Literature on Computer Simulations” en Durán, J. M. y Arnold, E. *Computer Simulations and the Changing Face of Scientific Experimentation*. Cambridge Scholar Publishing, 2013, 76-98.
- Hartmann, S. “The World as a Process: Simulation in the Natural and Social Sciences” en *Simulation and Modelling in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View*. R. H. e. al. Dordrecht, Kluwer, 1996, 77-100.
- Humphreys, P. “Computer Simulations” *PSA* 2, 1990, 497-506.
- Mize, J. H. y J. G. Cox. *Essentials of Simulation*. New York, Prentice Hall, 1968.
- Morgan, M. “Experimenta without material intervention”. En Hans Radder (ed.) *The philosophy of scientific experimentation*. University of Pittsburgh Press, 2003, 216-235.

Morrison, M. "Models, measurement and computer simulation: the changing face of experimentation" *Philosophical studies* 143. 2009, 1:33.57

Rivadulla Rodríguez, A. "Ciencia computacional de la ciencia. Filosofía del descubrimiento automático". En Luis Fernández Moreno, Francisco J. Salguero Lamillar y Cristina Barés Gómez (eds.) *Ensayos sobre lógica, lenguaje, mente y ciencia*. Editorial Alfar, 2012, 399-414.

Simpson, J. "Simulations are *not* Models" *Proceedings (Models and Simulations, London 2006)*, 2006, 1-33.

Tanenbaum, A. y A. Woodhull *Operating Systems. Design and Implementation*. New Jersey, Prentice Hall, 1997.