

DOI: 10.32735/S0718-6568/2019-N53-1392

Recibido: 24.11.2017 | Aceptado: 28.06.2019

## Modelación y simulación basada en agentes en ciencias sociales: una aproximación al estado del arte

Álvaro Vélez Torres

Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México.

Email: aibem@hotmail.com

**Resumen:** La modelación y la simulación con agentes es una tercera vía de hacer ciencia, y su potencial no radica en la predicción, sino en la comprensión de procesos fundamentales de fenómenos complejos. ¿De qué forma la modelación y simulación computacional basada en agentes puede ayudar en ciencias sociales a estudiar fenómenos complejos? El supuesto es que permite estudiar mediante sociedades artificiales la emergencia de fenómenos, y establecer vínculos entre los supuestos teóricos y los hechos empíricos. Además, los modelos basados en agentes permiten estudiar comportamientos emergentes a nivel macro a partir de estudiar comportamientos micro –bottom up-. Al respecto, este documento tiene el objetivo de construir un inicial estado del arte en este tema. Los retos y problemas pendientes se ubican en la validación empírica, en este sentido la estimación estadística y el modelado acompañado son los principales enfoques.

**Palabras clave:** Validación empírica; simulación social; complejidad; ciencias sociales

### Modeling and simulation based on agents in social sciences: an approach to the state of the art

**Abstract:** Modeling and simulation with agents is a third way of doing science, and its potential lies not in prediction, but in the understanding of fundamental processes of complex phenomena. How can agent-based computational modeling and simulation help social sciences study complex phenomena? The assumption is that it allows artificial societies to study the emergence of phenomena, and to establish links between theoretical assumptions and empirical facts. Moreover, agent-based models make it possible to study emerging behaviors at the macro level by studying micro -bottom up- behaviors. In this respect, this document aims to construct an initial state of the art in this topic. The challenges and pending problems are located in the empirical validation, in this sense the statistical estimation and the accompanied modeling are the main approaches.

**Keywords:** Empirical validation; social simulation; complexity; social sciences

### Modelagem e simulação baseada em agentes em ciências sociais: uma abordagem ao estado da arte

**Resumo:** Modelar e simular com agentes é uma terceira maneira de fazer ciência, e seu potencial não está na previsão, mas na compreensão de processos fundamentais de fenômenos complexos. Como a modelagem e a simulação computacional baseadas em agentes podem ajudar as ciências sociais a estudar fenômenos complexos? O pressuposto é que permite estudar através de sociedades artificiais o surgimento de fenômenos sociais, e estabelecer ligações entre pressupostos teóricos e fatos empíricos. Além disso, modelos baseados em agentes permitem o estudo de comportamentos emergentes em nível macro, a partir de estudos dos comportamentos micro. Consequentemente, este documento visa construir um estado inicial da arte sobre este assunto. Os desafios e problemas pendentes estão localizados na validação empírica, neste sentido, a estimação estatística e a modelagem de acompanhamento são as principais abordagens

**Palavras-chave:** Validação empírica; simulação social; complexidade; ciências sociais

\* \* \*

## Introducción

¿Cómo existe el orden en un universo regido por el desorden? (Wiener, 1989), ¿Cómo emergen patrones macro sociales a partir de comportamientos micro sociales? (Epstein y Axtell, 1996; Epstein, 2007). La simulación basada en agentes en ciencias sociales ofrece alternativas para hacer frente a estos cuestionamientos. Según Axelrod (1997) la simulación basada en agentes en ciencias sociales es una tercera vía de hacer ciencia. Los componentes básicos de un modelo basado en agentes son un conjunto heterogéneo de agentes, un conjunto de reglas sencillas de decisión y un ambiente en el que interactúan dichos agentes (Epstein, 2007). La modelación y simulación basada en agentes en ciencias sociales es más adecuada para entender procesos esenciales de fenómenos complejos, que para la predicción de fenómenos (Axelrod, 1997).

Antecedentes, a partir del siglo XVII la filosofía mecanicista, entre los fundadores destacan Descartes y Newton, concibió que el mundo funcionaba como una gran máquina, cuyas piezas o componentes interactuaban con base en leyes deterministas (Ivarola, 2015). Por lo que bastaba conocer con precisión las condiciones iniciales de un fenómeno, así como las leyes que lo gobiernan para predecir su comportamiento futuro (Wiener, 1989). De esta manera, con el advenimiento del método de Descartes<sup>1</sup> el paradigma dominante de la ciencia<sup>2</sup> quedó establecido bajo el paradigma reduccionista. Se dejaron de lado las explicaciones teleológicas de la realidad que entrañaban a la filosofía (Asbhy, 1962), y en su lugar la cuantificación, la medición y la predicción tomaron el lugar central del que hacer científico. Pero es hasta la mitad del siglo XIX que el paradigma reduccionista comenzó a ser fuertemente cuestionado. En letras de Prigogine et al, (1984)

“nuestra visión de la naturaleza está experimentando un cambio radical hacia lo múltiple, lo temporal y lo complejo, por largo tiempo una visión mecanicista<sup>3</sup> del mundo dominó la Western Science”.

La forma de estudiar la realidad dio un cambio tan radical como la revolución copernicana. Primero, la realidad dejó de ser independiente del sujeto observador. En palabras de Kosik (2015) la realidad es concreta; existe. Sin embargo,

“ el conjunto de fenómenos que llenan el ambiente cotidiano y la atmósfera común de la vida humana, que con su regularidad, inmediatez y evidencia penetran en la conciencia de los individuos asumiendo un aspecto independiente y natural, formal el mundo de la pseudoconcreción, (...) El pensamiento que destruye la pseudoconcreción para alcanzar lo concreto es un proceso en el curso del cual bajo el mundo de la apariencia se revela el mundo real; tras la apariencia externa del fenómeno se descubre la ley del fenómeno, la esencia, (...) Dicha esencia, sin embargo, no es independiente, sino derivada de un proceso dialéctico entre el hombre – la praxis social- y el mundo real (Kosik, 2015, p.13).

La realidad está conformada por leyes, sin embargo dichas leyes son derivadas de una relación entre la praxis social y el mundo real. Después, los fenómenos de la realidad empezaron a estudiarse como sistemas complejos, y muchos de ellos mostraban comportamientos caóticos<sup>4</sup>.

Como fue señalado por Warrent (1948) el énfasis del avance científico ha sido el estudio de dos variables a la vez, pero los seres humanos son más propensos a fenómenos en los que intervienen un número demasiado grande de variables, además muchas de estas variables no son cuantitativas, consecuentemente el estudio de los fenómenos, en especial los sociales, implican un conjunto complejo organizado de variables (Warrent, 1948). En este sentido, la probabilidad y la estadística han tratado problemas que podemos llamar complejidad desorganizada (Warrent, 1948).

Debido a que se puede calcular la correlación entre variables, pero eso no explica el porqué de tales correlaciones. Por otro lado, el enfoque organicista, auxiliado de la teoría general de sistemas, implica tratar simultáneamente con números considerables de factores que están interaccionando en un todo orgánico, dicho en otras palabras son problemas de una complejidad organizada<sup>5</sup> (Warrent, 1948). Sin embargo, el estudio de la complejidad organizada entraña una característica insoslayable.

Por un lado, los fenómenos sociales pueden llegar a ser no lineales, impredecibles y evolutivos. Opuesto a lo anterior, los fenómenos pueden presentar patrones de comportamiento. La cibernética ha tratado con estos problemas asumiendo que tanto los seres humanos como las máquinas comparten la peculiaridad de mantener el orden para reducir la entropía (Wiener, 1989) en este proceso el ambiente a través del feedback promueve comportamientos adaptativos y evolutivos (Wiener, 1989). Si bien, no se puede evitar el caos, se puede controlar (Asbhy, 1957; Wiener, 1989; Maturana y Varela, 1994), pero ¿los estados de desorden y orden son estados de la realidad descubiertos o inventados?. Para Asbhy (1962) y para Foerster (1996) son inventados, apelan a una visión filosófica constructivista de la realidad. De esta manera, el conocimiento de la realidad es un proceso activo entre el hombre y la realidad (Piaget y García, 1982; Glasersfeld, 1974). Regresando al tema central de éste trabajo. La evidencia de que casi cualquier elemento de nuestro ambiente es hecho por el hombre, o ha sido modificado por él, nos revela que la realidad social es cada vez más artificial<sup>6</sup> (Simon, 1996). Las leyes que gobiernan los elementos – símbolos- dependen de nuestra actividad colectiva (Simon, 1996). Entonces ¿Cómo estudiar dichas sociedades artificiales? Una respuesta es imitar la realidad –empírica-, en otras palabras haciendo uso de la simulación (Simon, 1996). La simulación computacional es un enfoque metodológico cuando un fenómeno social no es accesible, debido a las estructuras complejas el observador no puede claramente dibujar lo que está pasando. La simulación se basa en un modelo construido por investigadores que es más observable que el fenómeno de estudio (Nigel y Conte, 1995). En este sentido, las dificultades más abundantes para el estudio de la realidad social han sido la dificultad de llevar a cabo cierto tipo de experimentos controlados, el supuesto clásico del actor racional y la falta de metodologías para sistemas dinámicos en ciencias sociales (Epstein y Axtell, 1996). Es sólo en las década recientes, a partir de 1980, que los avances en la computación han hecho posible la modelación basada en agentes de manera práctica (Epstein y Axtell, 1996). En este enfoque, las estructuras sociales fundamentales y los comportamientos grupales emergen de la interacción de operadores individuales en un ambiente artificial bajo reglas sencillas de decisión – racionalidad limitada- (Epstein y Axtell, 1996). Las sociedades artificiales son vistas como laboratorios, donde crecen ciertas estructuras para descubrir mecanismos locales o micro que son suficientes para generar estructuras macro sociales y comportamientos colectivos de interés (Epstein y Axtell, 1996). A la fecha, uno de los retos de la simulación social basada en agentes es el de la validación empírica de los modelos propuestos, en este sentido las principales propuestas pueden clasificarse en dos enfoques. El primer enfoque, la validación empírica con métodos estadísticos, el segundo enfoque el moldeamiento acompañado que consiste en que los actores involucrados en la construcción del modelo sean los validadores del desempeño. ¿De qué forma la simulación computacional basada en agentes puede ayudar en ciencias sociales a estudiar fenómenos complejos? El supuesto es que la modelación y simulación computacional con agentes permite estudiar mediante sociedades artificiales la emergencia de fenómenos sociales, y establecer vínculos entre los supuestos teóricos y los hechos empíricos. En éste sentido, la validación empírica de un modelo basado en agentes debe incluir a los actores involucrados en el modelo. Estas serán guías para este documento que tiene el objetivo de construir un inicial estado del arte de la simulación basada en agentes en ciencias sociales para identificar los avances relevantes y los problemas aún no resueltos en este campo de investigación incipiente. En la segunda sección se desarrollan las características generales de los modelos basado en agentes, en la tercera sección se hace énfasis en la simulación de modelos basados en agentes, y en la última se estudia el problema de la validación empírica de los modelos basado en agentes.

## Modelos en las ciencias sociales

Construir un modelo es una forma de entender el mundo, un modelo es una simplificación menos detallada y menos compleja que la realidad (Nigel y Klaus, 2005). Casi todas las investigaciones en ciencias sociales operan mediante la simplificación de fenómenos, algunas veces dichas representaciones son solamente verbales (Nigel y Terna, 1999). En otros campos, por ejemplo en la economía, las representaciones son mucho más formales y frecuentemente en términos estadísticos o ecuaciones matemáticas (Nigel y Terna, 1999). Pero como señala Nigel y Terna (1999) estas representaciones son más consistentes y generalizables que las descripciones verbales. Sin embargo, los modelos estadísticos y matemáticos tienen algunas desventajas. Primero la gran cantidad de ecuaciones que se requiere para representar un fenómeno real son simplemente muy complicadas para ser analizadas. Esto se debe a que los fenómenos que pretenden ser modelados involucran relaciones no lineales. Así, la ventaja del formalismo matemático se esfuma. Una solución común al problema de la

formalización matemática es simplificar los supuestos hasta que las ecuaciones sean tratables y puedan ser resueltas, desafortunadamente esas suposiciones frecuentemente son poco probables y las teorías generadas muy engañosas (Nigel y Terna, 1999). Otra dificultad en las ciencias sociales es llevar a cabo ciertos tipos de experimentos controlados, en particular, probar las hipótesis mediante relacionar el comportamiento individual con el comportamiento macroscópico (Epstein y Axtell, 1996). Finalmente, en las ciencias sociales el uso de la teoría de juegos y la teoría del equilibrio han estado preocupadas por el equilibrio estático, han ignorado esencialmente los tiempos dinámicos, adicionalmente se asume que los individuos son homogéneos y que son racionales; poseen información infinita (Epstein y Axtell, 1996).

### Modelos basados en agentes en ciencias sociales

Es sólo en las décadas recientes, que los avances en la computación han hecho posible la modelación basada en agentes de manera práctica (Epstein y Axtell, 1996). Los modelos basados en agentes de procesos sociales asumen que las sociedades son sociedades artificiales, en este enfoque las estructuras sociales fundamentales y los comportamientos grupales emergen de la interacción de operadores individuales en un ambiente artificial bajo reglas de decisión sencillas; los agentes tienen racionalidad limitada (Epstein y Axtell, 1996). Las sociedades artificiales son vistas como laboratorios, donde crecen ciertas estructuras para descubrir mecanismos locales o micro que son suficientes para generar estructuras macro sociales y comportamientos colectivos de interés (Epstein y Axtell, 1996).

Los modelos computacionales basados en agentes permiten distinguir un enfoque de las ciencias sociales para el cual el término generativo<sup>7</sup> es adecuado. Al defender esta terminología el modelado basado en agentes se distingue del enfoque inductivo o deductivo (Epstein, 2007), no es inductivo porque el comportamiento de los agentes es aleatorio, no es deductivo porque la construcción del modelo es de abajo hacia arriba –bottom up-. El modelado computacional basado en agentes es una nueva herramienta para investigación empírica que permite someter a prueba teorías, con enfoques interdisciplinarios (Epstein, 2007). Nosotros aplicamos el término modelos “basado en agentes” para referirnos a las técnicas de modelación computacional para el estudio de fenómenos sociales, incluyendo el comercio, la migración, la formación de grupos, la interacción con el ambiente, la transmisión de la cultura, la propagación de enfermedades, y las dinámicas de población (Epstein y Axtell, 1996). Dichos modelos presentan comportamiento evolutivo, y para su estudio se requiere un enfoque trans disciplinar (Epstein y Axtell, 1996). Un modelo basado en agentes es una alternativa al pensamiento clásico donde la evolución de los sistemas se describe usando funciones, ecuaciones y algoritmos (Olaru et al, 2009). El modelo computacional basado en agentes – o sociedad artificial- es un nuevo instrumento científico (Epstein, 2007). Trata principalmente de ¿cómo pueden las interacciones locales descentralizadas de agentes heterogéneos y autónomos generar el surgimiento de regularidades a nivel macro? (Epstein, 2007). Las características de los modelos computacionales basados en agentes para Epstein (2007) son:

- a) Heterogeneidad; Las poblaciones de los agentes pueden ser diferentes en innumerables formas genéticamente, culturalmente, relaciones sociales, por preferencias- dichas diferencias pueden cambiar o adaptarse endógenamente en el tiempo.
- b) Autonomía; No hay un control central sobre el comportamiento en los agentes modelados, o control de arriba hacia abajo. Por supuesto, pueden haber retroalimentación de estructuras macro a micro estructuras. Además, los agentes están condicionados a normas o instituciones propias del lugar donde nacen. De hecho las estructura macro y micro evolucionan, sin embargo no se especifica una autoridad central o controlador central.
- c) Espacio explícito; todos los eventos ocurren en el espacio específico.
- d) Interacciones locales; típicamente los agentes interactúan con sus vecinos en un espacio definido.
- e) Racionalidad limitada; los agentes no tienen información global, los agentes no tienen poder computacional infinito. Por lo que siguen simples reglas.

De acuerdo con Epstein y Axtell (1996) los componentes de un modelo basado en agentes son:

- a) Agentes; los agentes son personas de la sociedad artificial. Cada agente tiene estados y reglas de comportamiento individual. Algunos estados son arreglados por la vida de los agentes mientras otros cambios ocurren en la interacción con otros agentes o con el medio externo.
- b) El ambiente; la vida en una sociedad artificial se desarrolla en un ambiente de algún tipo. Puede ser un paisaje, o más abstracto como redes. Sin embargo, el ambiente juega un papel fundamental en el modelo porque los agentes reciben señales del ambiente todo el tiempo, y esto modifica su conducta.
- c) Reglas; hay reglas para cada agente y para el ambiente.

De acuerdo a lo anterior, un modelo basado en agentes constituye una sociedad artificial integrada por agentes autónomos, y heterogéneos, que interactúan entre sí y con el ambiente bajo reglas sencillas de decisión (Rodríguez y Pascal, 2015). Además, un modelo basado en agentes es una representación de un sistema original o de referencia que es conceptualizado como un sistema de multi-agentes (Klügl y Bazzan, 2012) donde cada agente evalúa su situación y toma decisiones, además los agentes pueden evolucionar y presentar comportamiento emergente (Bonabeau, 2002). Así, una estructura emergente o comportamiento emergente es generado por interacciones entre entidades locales, a pesar de que dichos comportamientos emergentes sólo son observables a nivel macro (Klügl y Bazzan, 2012). Debido a esto, los modelos basados en agentes encaran la promesa de constituirse en una metodología empíricamente operativa para el estudio de la complejidad social a través del modelado y la simulación computacional en el estudio de la organización y la dinámica de sistemas complejos (Rodríguez y Pascal, 2015).

### **Emergencia y modelos basados en agentes**

Los modelos basados en agentes son especialmente útiles para estudiar la emergencia de fenómenos (Epstein y Axtell, 1996). En las ciencias de la complejidad, podemos llamar la emergencia como una distribución sesgada, un estado macroscópico o patrón de agregados inducido por la interacción de agentes y su ambiente, debido a que estos patrones emergen de abajo hacia arriba –bottom up–, la emergencia se considera un fenómeno de auto-organización (Epstein y Axtell, 1996). Lo cual es útil para explicar ¿cómo el comportamiento microscópico heterogéneo de comportamientos individuales genera regularidades macroscópicas en la sociedad? (Epstein y Axtell, 1996). Entender como simples reglas locales hacen surgir estructuras colectivas es el objetivo central de las ciencias de la complejidad (Epstein y Axtell, 1996).

### **Construcción de un modelo basado en agentes en ciencias sociales**

Nigel y Terna (1999) sugieren que un modelo basado en agentes se puede construir como un sistema de producción, la característica de este enfoque es que incluye mecanismos para recibir información del ambiente, dicha información es almacenada y sirve de insumo para futuras acciones. Un sistema de producción tiene tres componentes: a) un conjunto de reglas, b) una memoria de trabajo y c) un intérprete, dichos modelos basados en agentes son útiles para estudiar fenómenos evolutivos debido a que tienen el potencial de aprender de sus ambientes y de otros agentes, y guardar dicho conocimiento en su memoria de trabajo, sin embargo, las reglas de decisión siempre permanecen inalterables<sup>8</sup> (Nigel y Terna 1999). En éste sentido, una de las tareas más relevantes pero difíciles de llevar a cabo en el modelado basado en agentes es decidir cuáles son los aspectos principales de comportamiento e interacción en la sociedad artificial (Ribeiro et al, 2003). Para estudiar esto, se ha usado la noción de estructura social (la colectividad como un todo no es idéntico a la suma de los individuos que la conforman, pero la suma de las relaciones entre los individuos se comporta como un todo) (Ribeiro et al, 2003). Un ejemplo de tal idea fue encontrada en la teoría de pequeños grupos de Jean Piaget, dicha teoría permite el estudio de las estructuras sociales con base en el supuesto de que los sistemas de relaciones sociales son estructuras que permiten el intercambio social (Ribeiro et al, 2003).

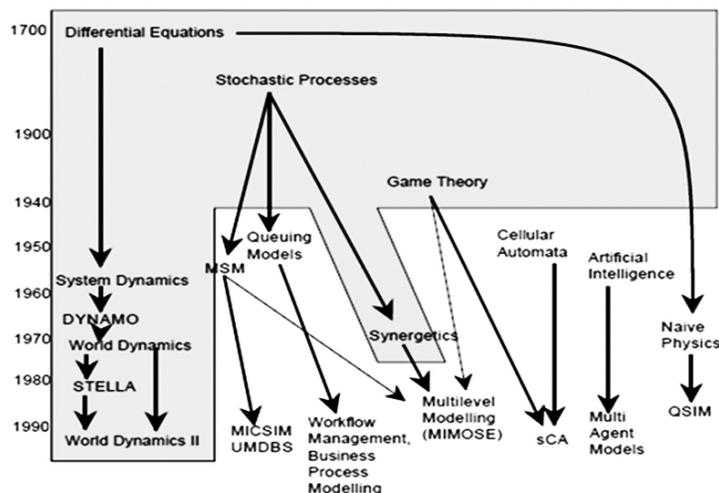
## Modelación y simulación

Al pasar tres siglos después de Newton estamos fuertemente familiarizados con el concepto de ciencia natural relacionada con la física y la biología, una ciencia natural es un cuerpo de conocimiento de alguna clase de cosas, objetos o fenómenos en el mundo (Simon, 1996). La tarea central de la ciencia de la naturaleza es [...] mostrar que la complejidad es sólo un máscara para la simplicidad; para encontrar patrones en el caos (Simon, 1996). Sin embargo, hoy día, el mundo en el que vivimos es mucho más hecho por el hombre, o artificial, casi cada elemento de nuestro ambiente muestra evidencia de ser hecho por el hombre (Simon, 1996). El ambiente que nos rodea está tapizado de cadenas de símbolos que nosotros recibimos a través de los ojos y oídos, escritura, lenguaje, y las leyes que gobiernan estas cadenas de símbolos [...] dependen de nuestra colectividad artificial (Simon, 1996). En éste sentido debemos de tener cuidado de no igualar lo biológico con lo natural, por ejemplo, un bosque puede ser un fenómeno de la naturaleza; una granja no [...] la variedad de especies de las que dependemos para comer, como nuestra comida, nuestro maíz, nuestro ganado son artefactos de nuestro ingenio, más aún un campo arado no es más natural que una calle pavimentada (Simon, 1996). Con estos supuestos es claramente comprensible que el estudio de sociedades humanas es una tarea para tratar con sistemas complejos artificiales. De tal manera, a través de un proceso de imitación artificial se pueden comprender fenómenos de sociedades. Generalmente, nosotros nombramos la imitación como “simulación”, tratamos de entender los sistemas imitados a través de la simulación, en este sentido la computadora ha extendido el rango de los sistemas que pueden ser imitados (Simon, 1996). La simulación es una técnica para lograr el entendimiento y la predicción del comportamiento de sistemas, otro enfoque concibe a la simulación como un recurso para generar nuevo conocimiento (Simon, 1996). Pese a sus virtudes, la simulación no es mejor que las suposiciones para construirla, una computadora solo puede hacer lo que ha sido programada para hacer (Simon, 1996). Entonces, bajo qué supuestos una simulación puede ayudar a construir nuevo conocimiento. Primero, cuando conocemos problemas y asumimos para su estudio leyes fundamentales de comportamiento mecánico. Segundo, cuando no conocemos mucho acerca de los problemas, ni de las leyes naturales que gobiernan el comportamiento interno de un sistema (Simon, 1996). Cuanto más estamos dispuestos a abstraer los detalles de un conjunto de fenómenos, más fácil será simular los fenómenos, no es necesario saber toda la estructura interna, sino solo esa parte que es crucial (Simon, 1996).

### La simulación basada en agentes

Uno de los primeros trabajos en aplicar la simulación basada en agentes fue el trabajo de Thomas Schelling (1971) en su modelo de la segregación espacial (Epstein y Axtell, 1996). La idea central de éste trabajo es explicar cómo emerge la segregación espacial en un vecindario, los supuestos son que hay dos tipos, o grupos, bien definidos de personas, las cuales siguen reglas sencillas para interactuar o no con un miembro de un grupo ajeno, en base a beneficios o coerción, el modelo se basa en el comportamiento individual que tiene un efecto en el comportamiento macro del vecindario, para éste trabajo se usó un ambiente de autómatas celulares (Schelling, 1971). La simulación computacional es un enfoque metodológico alternativo cuando un fenómeno social no es accesible, la simulación se basa en un modelo construido por investigadores que es más observable que el propio modelo del objetivo (Nigel y Conte, 1995). Debido a esto, en simulación social, todas las investigaciones deben ser teóricamente fundamentadas, metodológicamente sofisticadas y creativas, estas cualidades son especialmente necesarias porque el campo de la simulación en ciencias sociales, que tiene apenas 20 años de trayectoria, no hay tradiciones de investigación bien establecidas, y hay una variedad de enfoques en simulación de los que se puede escoger (Nigel y Klaus, 2005). Los científicos sociales pueden construir modelos simples de pequeños aspectos de la realidad y descubrir las consecuencias de sus supuestos teóricos en la sociedad artificial que han construido, un requisito para lograr esto son las teorías formalizadas<sup>9</sup> que puedan ser programadas (Nigel y Klaus, 2005). En éste sentido, las matemáticas han sido usadas, algunas veces, como medios de formalización en ciencias sociales, pero esto nunca ha llegado a ser ampliamente aceptado (Nigel y Troitzsh, 2005).

**Figura 1**  
**Desarrollo del enfoque contemporáneo de la simulación en ciencias sociales**



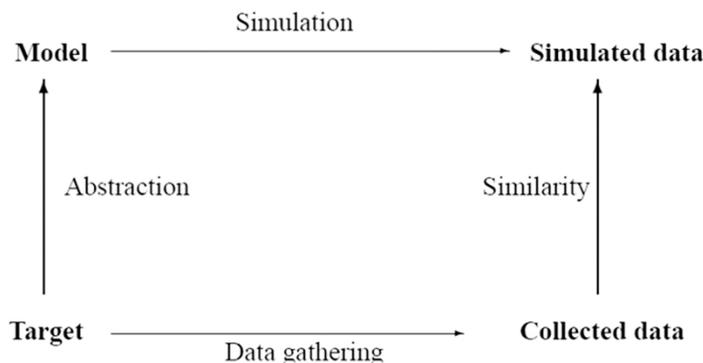
Fuente: (Nigel y Conte, 1995)

De 1945 a la fecha se ha pasado de un enfoque que enfatiza el uso de ecuaciones diferenciales, área en gris, al uso de teorías formalizadas, no precisamente de forma matemática, para el estudio de fenómenos sociales mediante la simulación basada en agentes, **ver figura 1**. Nigel y Conte, (1995) señalan algunas características relevantes del desarrollo de los modelos de simulación en éste período a) en los sistemas dinámicos usando ecuaciones diferenciales no hay comunicación entre agentes, la complejidad de los sistemas es baja y el número de agentes es uno, b) en la micro simulación no hay comunicación entre agentes, la complejidad es alta y el número de agentes es grande, c) en los modelos de teoría de colas no hay comunicación entre agentes, la complejidad es baja y el número de agentes es grande, d) en el uso de autómatas celulares la comunicación entre agentes es permitida, la complejidad es baja y el número de agentes es grande, y c) en los modelos basados en agentes la comunicación de los agentes es válida, la complejidad es alta y el número de agentes es reducido (Nigel y Conte, 1995).

### La lógica de la simulación en ciencias sociales

Asumimos que existe un fenómeno en el mundo real para investigar, el objetivo de crear un modelo es simplificar éste fenómeno, posteriormente el modelo se simula y se espera establecer conclusiones relevantes porque se asume que los modelos son bastante similares (Nigel y Conte, 1995). Sin embargo, en ciencias sociales, el objetivo es siempre dinámico, cambiante en el tiempo e interactúa con su ambiente (Nigel y Conte, 1995). El punto de partida para la simulación es establecer un objetivo, abstraer del mundo real las características relevantes del problema bajo estudio y construir un modelo, además debido a que la simulación computacional trata de establecer relaciones entre el fenómeno real y el fenómeno simulado es indispensable la recopilación de datos –de hechos empíricos– para determinar los parámetros y las condiciones iniciales del modelo (Nigel y Conte, 1995). De esta manera se tienen datos colectados –de hechos empíricos– y datos simulados, **ver figura 2**.

**Figura 2**  
**La lógica de la simulación como método**



Fuente: (Nigel y Conte, 1995)

El investigador desarrolla un modelo basado en un proceso social, en forma de programa computacional, éste modelo se corre y su comportamiento se mide (Nigel y Conte, 1995). De hecho, el modelo es usado para generar los datos simulados. “Estos datos simulados se pueden comparar con los datos recopilados de la forma habitual, v.gr. observación, para verificar si el modelo genera resultados que son similares a los producidos por los procesos reales que operan en el mundo social (Nigel y Conte, 1995). Al respecto, algunos modeladores estadísticos y de simulación enfatizan el deseo de comprensión y otros enfatizan la necesidad de hacer predicciones, todas las simulaciones tienen de hecho que satisfacer ambos requisitos: un modelo predictivo exitoso contribuirá a la comprensión, al menos hasta cierto punto, mientras que un modelo explicativo siempre será capaz de hacer algunas predicciones, incluso si no son muy precisas. (Nigel y Conte, 1995).

Una característica de modelos simulados basados en agentes es que se conciben para la tarea de entender los procesos de forma dinámica, por otro lado los modelos simulados estadísticamente se ocupan de explicar la correlación entre variables en un punto en el tiempo (Nigel y Conte, 1995). Por último, la simulación basada en agentes es parecida a una metodología experimental, “uno puede configurar un modelo de simulación y luego ejecutarlo muchas veces, variando las condiciones en las que se ejecuta y explorar los efectos de diferentes parámetros” (Nigel y Conte, 1995).

#### **Fases de la investigación en la simulación basada en agentes**

Según Nigel y Conte (1995) la investigación en la simulación empieza por identificar un rompecabezas, una cuestión cuya respuesta no es conocida, este puede ser el objetivo de la investigación, posteriormente se hacen observaciones en el mundo real, se adoptan supuestos teóricos y se propone un marco teórico, el siguiente paso es la verificación; en efecto es un paso de “depuración”. Desafortunadamente, éste proceso puede ser difícil de llevar a cabo con simulaciones complejas y, en particular, es difícil saber si se han erradicado todos los errores restantes, “la dificultad se ve agravada por el hecho de que la mayoría de las simulaciones de ciencias sociales dependen de procesos pseudoaleatorios [...] por lo que se espera que las ejecuciones repetidas produzcan resultados diferentes” (Nigel y Conte, 1995). En seguida, esta la validación que consiste en comparar el desempeño del modelo simulado con las pruebas empíricas. El siguiente paso es el análisis de sensibilidad; a cambios significativos en los parámetros o a las condiciones iniciales. Por último, la publicación de los resultados (Nigel y Conte, 1995).

### La emergencia en la simulación social

La emergencia, auto organización, es uno de los fenómenos más interesantes, la idea central es que los sistemas de gran complejidad sobreviven y se reproducen gracias a la capacidad de ajuste, espontáneo y gradual, debido a presiones de su ambiente (Nigel y Conte, 1995). En particular, la pregunta de la emergencia<sup>10</sup> es central en el campo de la simulación social [...] la simulación computacional ha sido aplicada a diferentes procesos dinámicos sociales, o patrones de comportamiento para estudiar bajo qué condiciones esas estrategias o patrones se estabilizan (Nigel y Conte, 1995). Sin embargo, el estudio de la sociedad siempre ha estado plagado de dificultades metodológicas y empíricas por ejemplo: las teorías sociales fallan al no proporcionar modelos específicos, categorías de análisis e instrumentos conceptuales para explorar la sociedad real, como resultado hay una gran brecha entre la investigación empírica y la teoría<sup>11</sup> (Nigel y Conte, 1995). Además, la auto-organización en la simulación basada en agentes rompe con la dicotomía de la cooperación y el conflicto para explicar las dinámicas sociales. Según Nigel y Conte (1995) usualmente, la acción social es considerada entre la cooperación y el conflicto (la estructura del dilema del prisionero), sin embargo esta dicotomía es fallida por muchas razones:

- a) hay muchas formas de cooperación y conflicto; así como muchas formas de altruismo y egoísmo.
- b) las alternativas no son claras, hay formas en las cuales la cooperación puede generar el conflicto.
- c) el engaño se puede usar para ayudar y la cooperación para engañar.

Algunos trabajos como el de Orlan et al (2009) han empleado el uso de la lógica difusa para el estudio de procesos sociales que no son dicotómicos como la emergencia de redes de innovación. Debido a lo anterior, la idea de emergencia, es central para el campo de la simulación social y parece proporcionar un puente entre diferentes disciplinas y sub campos (Nigel y Conte, 1995). Resumiendo, la simulación computacional permite explorar dinámicamente la interacción entre agentes autónomos que siguen reglas sencillas y que interactúan entre ellos y con el ambiente para estudiar los procesos por los cuales emergen patrones y estructuras (Rodríguez y Pascal, 2015). La simulación basada en agentes puede ser definida como un experimento social. (Klügl y Bazzan, 2012). En la simulación basada en agentes el ambiente desempeña un papel clave porque tiene gran influencia en el comportamiento de los agentes (Klügl y Bazzan, 2012). La simulación basada en agentes es más una forma de pensar que una tecnología, la forma de pensar una simulación basada en agentes consiste en la descripción de un sistema desde la perspectiva de sus unidades constituyentes (Bonabeau, 2002). Se recomienda usar simulación basada en agentes cuando el comportamiento de los agentes no es lineal, y cuando el uso de ecuaciones diferenciales no es posible para describir dichos comportamientos (Bonabeau, 2002). La simulación por computadora se convertirá en un nuevo e importante método de construcción y evaluación de teorías en las ciencias sociales (Nigel y Terna, 1999). Al igual que todas las nuevas metodologías, tomará algún tiempo refinar las técnicas y codificarlas para que se necesite un mínimo de prueba y error. En la actualidad, experimentar con simulaciones por computadora sigue siendo un arte que se aprende mejor a través de la práctica y observando de cerca a los más experimentados (Nigel y Terna, 1999).

### Validación empírica

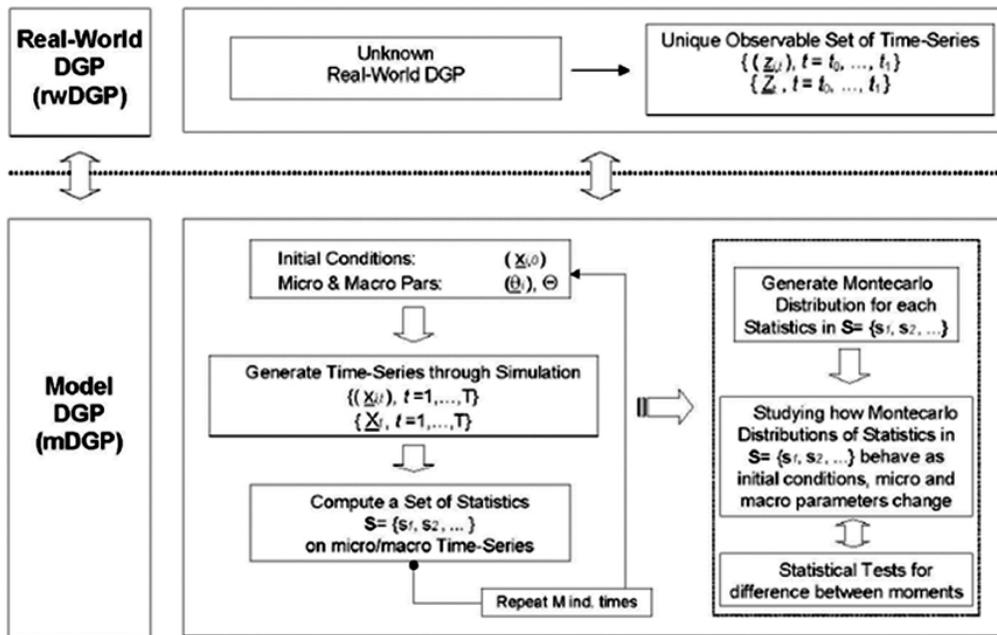
En las últimas décadas, el uso de los modelos basados en agentes en ciencias sociales ha estado orientado a contrastar datos simulados con datos empíricos, y a la validación de teorías (Liu, 2011). Sin embargo, el uso de modelos basados en agentes en ciencias sociales ha estado dirigido a cuestiones que no requieren rigurosos procesos de validación empírica (Liu, 2011). En general, el término validación quiere decir una buena correspondencia entre un sistema real y un modelo artificial (Liu, 2011). Un modelo basado en agentes debe ser validado interna y externamente, con la validación interna un investigador puede obtener conclusiones causales, así como la robustez del modelo- no sensibles a condiciones iniciales, por otro lado la validación externa es cuando las simulaciones hechas por un modelo son soportadas por evidencia empírica (Liu, 2011). Por consiguiente ¿Por qué la validación empírica es la base fundamental para aceptar o rechazar un modelo basado en agentes?, ¿Existen otras formas de validación de modelos basados en agentes más allá de la reproducción del

comportamiento de hechos- datos empíricos? (Windrum et al, 2007). Debido a que la idea detrás del modelado y la simulación es el uso de un sistema artificial en vez de un sistema del mundo real, la correspondencia entre el primero y el último es fundamental, por lo tanto la llave del éxito (Klügl and Bazzan, 2012). No obstante, probar que un modelo es correcto en general es difícil para los modelos basados en agentes porque los métodos de validación tradicional no siempre son aplicables (Wilensky and Rand, 2007 en Olaru et al, 2009). Las simulaciones de modelos basados en agentes son útiles; la pregunta es entender su utilidad (Olaru et al, 2009).

**Validación empírica de un modelo basado en agentes usando simulación estadística**

Siguiendo a Windrum et al (2007) para el estudio de un “proceso generador de datos del mundo real en adelante (rwDGP), se asume que el proceso se puede deducir de un conjunto de condiciones iniciales”. Supongamos que el modelador conoce que el sistema real es ergódico<sup>12</sup>, y que además el rwDGP muestra un comportamiento suficientemente estacionario durante un período de tiempo después de T para (casi) todo los puntos de parámetros y condiciones iniciales (Windrum et al, 2007). Para un conjunto particular de condiciones iniciales, parámetros micro y macro (ejemplo,  $\theta, \theta, x_0$  y  $X_0$ ), asumimos que el rwDGP corre hasta encontrar alguna forma de comportamiento estable (para al menos  $T > T+1$  veces) (Windrum et al, 2007). Ahora, suponemos que estamos interesados en un conjunto de estadísticas  $S = \{s_1, s_2, \dots\}$  y que pueden ser escritos en la simulación en el modelo simulado, en adelante (mDGP)  $\{x_t, t = 1, \dots, T\}$  que  $\{X_t, t = 1, \dots, T\}$  (Windrum et al, 2007). Para cualquier corrida de datos ( $m=1,2,\dots,M$ ) la simulación generará un valor para el estadístico  $s_j$  (debido a la naturaleza estocástica del proceso, cada corrida – y cada valor de  $s_j$  – debe ser diferente de los demás (Windrum et al, 2007). De esta manera, después de haber producido M independientes corridas, uno ha generado una distribución para  $s_j$  que contiene M observaciones, esta distribución puede ser resumida por computadora, por ejemplo su media  $E(s_j)$ , y su varianza  $V(s_j)$  (Windrum et al, 2007). Sin embargo, es importante recalcar que los momentos M van a depender de las condiciones iniciales que fueron escogidas para  $\theta, \theta, x_0$  y  $X_0$  (Windrum et al, 2007), ver figura 3.

**Figura 3**  
Procedimiento de validación empírica



Fuente: (Windrum et al, 2007)

Dentro de éste proceso, la calibración y la validación son los retos para el diseño de modelos basados en agentes (Ten et al, 2014). El análisis de sensibilidad es una herramienta estadística para analizar el efecto de variaciones e incertidumbre en la entrada y salida de los resultados del modelado (Ten et al, 2014). El análisis de sensibilidad puede ser útil para la calibración y validación del modelo, pero debido a que las metodologías disponibles para análisis de sensibilidad no son particularmente adecuadas para modelos no lineales, el análisis de sensibilidad en modelos basados en agentes es poco factible (Ten et al, 2014). Es adecuado pensar en una combinación de métodos para el análisis de sensibilidad que ofrezcan una mejor comprensión de la sensibilidad de los modelos (Ten et al, 2014). En la práctica, sin embargo, muchos modelos basados en agentes tienen una complejidad bastante alta, por lo que resulta ser muy difícil realizar el análisis de sensibilidad, hasta el punto de ser prácticamente imposible (Ten et al, 2014). Por lo que una alternativa es construir modelos basados en agentes de baja complejidad.

En este sentido los niveles de rendimiento y análisis de modelos basados en agentes pueden ayudar a tipificar los modelos basados en agentes y con base en ello determinar el tipo de validación necesaria, según Axtell y Epstein (1994) dichos niveles son:

- a) Nivel cero: El modelo es una caricatura de la realidad.
- b) Nivel 1: El modelo es cualitativamente consistente con las macro estructuras empíricas. Ejemplo la distribución de los agentes.
- c) Nivel 2: El modelo produce consistencia cuantitativa con las estructuras empíricas macro. Estimaciones estadísticas.
- d) Nivel 3. El modelo exhibe consistencia cuantitativa con las estructuras empíricas micro.

Sin embargo, algunos investigadores de modelos basados en agentes en economía, comprometidos con el moldeamiento cuantitativo, son críticos a la sugerencia de que una completa validación empírica es posible (Windrum et al, 2007). Ellos sugieren que hay dificultades insuperables para desarrollar una ciencia social empírica al modo de las ciencias naturales (Windrum et al, 2007). Una vía alterna para tratar con el problema de la validación empírica de los modelos basados en agentes en ciencias sociales es el uso de la computadora como un laboratorio artificial en el cual, las relaciones causales – entre variables- puede ser probado para incrementar el conocimiento de una estructura causal subyacente del fenómeno de mundo real bajo estudio (Windrum et al, 2007). En otras palabras, en vez de insistir en la validación empírica buscar en la sociedad artificial el entendimiento de procesos clave en el fenómeno de estudio de la realidad social. Los riesgos de este enfoque, sin embargo, son que se construyen formalizaciones, supuestos de referencia, que no tienen ningún vínculo con la realidad (Edmonds y Moss 2005 en Windrum et al, 2007).

### **Problemas metodológicos de la validación empírica**

Como señala (Windrum et al, 2007) los problemas metodológicos centrales de la validación empírica son:

- 1) Concreción versus simplificación; para tratar con la complejidad del mundo real los científicos (no sólo los economistas) modelan procesos por simplificación y se centran en la relación entre un limitado número de variables. Sin embargo, ¿es posible modelar todos los elementos de un fenómeno de la realidad?, ¿cómo podemos conocer todos los elementos diferentes de dicho fenómeno? Los economistas generalmente están de acuerdo en aislar – concreción- un mecanismo causal, mediante la abstracción de ciertas entidades que pueden tener un impacto en los fenómenos estudiados.
- 2) Las teorías instrumentalistas; en este enfoque las teorías son entidades para predecir, no intentan ser una descripción del mundo real.
- 3) Fuerte versus débil apriorismo: Las teorías son desarrolladas a priori para la colección de datos, y los datos colectados son interpretados usando dichas teorías.

### Alternativas para la validación empírica de modelos basados en agentes

El punto de partida para el diseño e implementación de un modelo debe ser caracterizado por un balance entre teoría y evidencia (Moss, 2008). Los modelos económicos computacionales son extremos en este sentido, ya que incorporan teoría utilitaria, teoría económica de la producción y distribución, teoría general del equilibrio y teoría de juego. En el extremo opuesto está el modelado acompañado<sup>13</sup>. En dicho enfoque al inicio los modelos incorporan poca evidencia, no hay teorías adoptadas. Posteriormente los modelos son redefinidos en todo el proceso. Por último se requiere de una validación por un experto (Moss, 2008). La característica del moldeamiento acompañado es que se usa el juego – Rol Played Game-, dicho juego consiste en que los actores involucrados intercambien papeles y evalúen de esta manera el modelo simulado. Este enfoque ha sido usado, principalmente, para la gestión y manejo de recursos naturales y pertenece a la escuela Francesa (Torri, et al, 2005). En muchos casos, el método de analizar datos de un RPG – Rol Played Game- simulado es comparado con expertos, y usando análisis estadístico (Torri, et al, 2005). Otra herramienta para el fin de estandarizar un método para el diseño de modelos basados en agentes es el ODD protocolo para el diseño de modelos basados en agentes, a pesar de haber sido creado para modelos en ecología y manejo de recursos naturales, puede ser usado para el diseño de modelos basados en agentes de sistemas sociales (Polhill et al, 2008), ver **tabla 1**.

**Tabla 1**  
**Protocolo ODD**

<b>Visión de conjunto</b>	<b>Objetivo</b>
Objetivo	Estados de las variables y escalas de análisis Visión general del proceso y programación: supuestos.
Diseño de conceptos	Diseño de conceptos
Detalles	Inicialización: valores iniciales de las variables Entradas Submodelos

Fuente: (Polhill et al, 2008)

Resumidamente, la validación de un modelo basado en agentes depende de los elementos teóricos del modelo simulado (Liu, 2011). En particular, cuando el objetivo de la investigación no es hacer predicciones empíricas, o cuando los datos externos de validación no son disponibles, en este caso los investigadores escogerán cuidadosamente los parámetros de la teoría, y si la teoría no explica algunas suposiciones o parámetros, los supuestos deben basarse en hallazgos empíricos (Liu, 2011). “Para ser específico, no está claro para los modeladores qué parámetros se deben usar cuando una teoría proporciona pocas hipótesis para probar, qué tan seguros estamos de que un modelo basado en agentes es leal a una teoría (...) sigue siendo una tarea desafiante para los académicos de los modelos basados en agentes que buscan llevar a cabo la validación empírica” (Liu, 2011). Hasta la fecha no hay un consenso científico de cómo y en qué casos realizar una validación empírica de los modelos basados en agentes.

### Resultados y discusiones

La simulación basada en agentes es útil para el estudio de sociedades artificiales en donde las interacciones entre agentes locales y su ambiente ocurre bajo reglas sencillas de decisión, lo que provocan que emerjan comportamientos observables a nivel macro (Nigel y Conte, 1995). En los modelos basados en agentes el

ambiente interactúa y evoluciona directamente con los agentes, lo que tiene incidencia directa en la emergencia de dichos fenómenos. Sin embargo, si consideramos que los fenómenos de la realidad son inaccesibles para ser representados y modelados de una manera completa, y adicionalmente, hoy día no hay teorías del comportamiento emergente que se salgan del supuesto de la racionalidad y del dilema conflicto-cooperación ¿cómo podemos entonces pensar otra realidad? Si nuestros cuadros de pensamiento están condicionados a estos supuestos. La respuesta no es clara, ni definitiva, ni general, mucho menos estática pero lo que los pioneros en la modelación y simulación basada en agentes aceptan es que los experimentos con sociedades artificiales pueden ayudar a entender procesos fundamentales de fenómenos complejos. Esta es la virtud principal de los modelos basados en agentes que ayudan a estudiar la complejidad social con base en modelos simples. No obstante, como sugieren Axtell y Epstein (1994) “si no podemos entender los sistemas artificiales complejos mejor de lo que entendemos los sistemas reales, entonces como podemos haber hecho progreso” en el entendimiento de los fenómenos sociales (Axtell y Epstein, 1994) lo cual nos lleva al problema de la programación computacional y los programas disponibles, dicho tema no fue abordado en este trabajo pero será recuperado en otra contribución. Sin embargo, el programa Netlogo ha tenido gran impacto por su versatilidad en el estudio de sociedades artificiales, ver por ejemplo Wilensky and Rand (2013).

Por otro lado, la validación empírica es el reto principal de la modelación y simulación basada en agentes. Principalmente, porque depende de la postura filosófica, epistemológica y teórica adoptada para el desarrollo del modelo. En las últimas décadas el uso de los modelos basados en agentes en ciencias sociales ha estado orientado a contrastar datos simulados con datos empíricos, y a la validación de teorías (Liu, 2011). Sin embargo, el uso de modelos basados en agentes en ciencias sociales ha estado dirigido a cuestiones que no requieren rigurosos procesos de validación empírica (Liu, 2011). Lo cual no deja fuera la posibilidad de desarrollar enfoques de modelación y simulación que involucren aspectos relevantes de los fenómenos bajo estudio, dichos hallazgos pueden servir de insumo para genera modelos más mecánicos de procesos sociales. En general, la validación de un modelo basado en agentes depende de evaluar cuidadosamente los elementos teóricos del modelo simulado (Liu, 2011), en particular cuando el objetivo de la investigación no es hacer predicciones empíricas, o cuando los datos externos de validación no son disponibles (Liu, 2011). En este sentido, el enfoque del modelado acompañado, pese a ser aplicado principalmente para el manejo colectivo de recursos naturales, puede ayudar a validar los resultados de la modelación y simulación a través de un consenso participativo que involucre a los actores principales del modelo.

## Conclusiones

La modelación y simulación de modelos basados en agentes bajo la tradición de Epstein, Axelrod y Axtell son útiles para estudiar fenómenos complejos en ciencias sociales debido a que permiten llevar a cabo experimentos en sociedades artificiales con gran heterogeneidad de agentes autónomos que interactúan entre ellos y su ambiente bajo reglas sencillas de comportamiento. Esto permite estudiar la emergencia de estructuras macro sociales a partir de estudiar comportamientos micro –bottom up-. Por otro lado, la simulación basada en agentes es útil para establecer vínculos entre el desarrollo de teorías y las pruebas empíricas porque se centra en la abstracción de los procesos fundamentales de un fenómeno, y aunque se puede llevar a cabo la predicción de fenómenos no es su objetivo principal. La validación empírica es la cuestión fundamental para el desarrollo de la modelación y simulación usando agentes, en éste sentido el modelado acompañado y lógica difusa son alternativas que deben ser exploradas.

## Notas

<sup>1</sup> Discurso del Método, Traducción de García, 2010.

<sup>2</sup> La ciencia busca un conocimiento ordenado de la naturaleza, el conocimiento se genera entre las relaciones sujeto - objeto, sin embargo su estudio por separado ha establecido una controversia irreconciliable sobre la percepción de la naturaleza, en éste sentido “las principales teorías del conocimiento son el idealismo, el empirismo, el realismo, el positivismo, el pragmatismo y el materialismo” (Cesarman, 1986, p. 5), y cada uno aborda la realidad de diferentes puntos de vista.

<sup>3</sup> La filosofía mecanicista tiene sus orígenes en el siglo XVII, y ha permanecido como paradigma dominante hasta los albores del siglo XIX. Entre los fundadores encontramos a Descartes, Galileo, Boyle, Newton [...] la concepción del mundo bajo este paradigma el mundo funcionaba como una gran máquina, cuyas piezas interactuaban sobre las leyes deterministas (Ivarola, 2015).

<sup>4</sup> Edward Lorenz (1969) mientras trabajaba con modelos atmosféricos en un ordenador, realizaba pruebas rutinarias (...) alimentó un modelo construido con la ecuación logística, pero por accidente varió mínimamente las condiciones iniciales del modelo (0,506127 a 0,506) los resultados fueron totalmente diferentes, eran no lineales, aperiódicos (...) por lo que “cualquier sistema físico de comportamiento aperiódico sería impredecible” surgió el caos. Sin embargo, dicho comportamiento caótico presentaba un patrón recurrente organizado alrededor de un atractor (Gleick, 1987).

<sup>5</sup> Pero este nuevo enfoque de asumir la ciencia debe de considerar un uso moral de los descubrimientos científicos. Además, implica el uso del poder sabiamente para mejorar las condiciones de vida en lo individual y colectivo. Este uso del poder debe sacrificar los intereses egoístas a corto plazo – personales o nacionales- con el fin de lograr un mejoramiento para todos (Warrent, 1948).

<sup>6</sup> Debemos de tener cuidado de no igualar lo biológico con lo natural. Un bosque puede ser un fenómeno de la naturaleza, pero una granja no (Simon, 1996).

<sup>7</sup> Generativo versus inductivo y deductivo. Desde un punto de vista epistemológico, la ciencia social generativa, si bien es empírica, no es inductiva. Su relación con lo deductivo es más sutil. Esta conexión es interesante porque hay una tradición intelectual en la cual. [...] lo generativo implica deducción, pero no al revés (Epstein, 2007).

<sup>8</sup> Esta es una debilidad porque a menudo las reglas de decisión cambian, por ejemplo al ocurrir un evento impredecible. En el mundo real los agentes cambian continuamente sus reglas de decisión, existen las excepciones.

<sup>9</sup> El problema de si la actividad humana puede ser interpretada de acuerdo a leyes científicas ha sido muy discutido, en éste sentido, las formalizaciones son proposiciones generales sobre la sociedad que pueden expresarse en diferentes niveles de abstracción usando diverso tipo de variables, así el nivel más bajo es el que se mantiene cerca de los hechos concretos, generalizaciones empíricas (Di Tella, 1992). Se trata de constataciones acerca de regularidades que se observan en las relaciones entre fenómenos, en este nivel no se intenta deducir (Di Tella, 1992). Un nivel superior, o paso siguiente, es la generalización científica que intenta formular leyes, o relaciones entre variables, que deberían tener validez universal, o dentro de límites específicos. Dichas leyes, es mejor llamarlas hipótesis (Di Tella, 1992).

<sup>10</sup>

<sup>11</sup> Hoy día, los sociólogos insatisfechos con la pobre predicción, y con el poder explicativo de las teorías, se han refugiado en el reclamo de que la realidad social no puede ser descrita científicamente porque es construida a través de las mentes de agentes heterogéneos (Nigel y Conte, 1995). Desprendido de lo anterior, los investigadores sociales tienen el derecho a interpretar sus auto-reportes, y a elaborar sus interpretaciones de la realidad (Nigel y Conte, 1995). Como medio para tratar esta dificultad, los estudios de simulación social basados en agentes brindan la oportunidad de llenar la brecha entre la investigación empírica y el trabajo teórico (Nigel y Conte, 1995).

<sup>12</sup> Ergódico: es un proceso estocástico donde se pueden deducir las propiedades estadísticas a partir de una sola muestra del proceso, suficientemente larga y aleatoria. El supuesto es que cualquier colección de muestras aleatorias de un proceso debe representar las propiedades estadísticas promedio de todo el proceso. Teoría ergódica. (2017, 20 de agosto). *Wikipedia, La enciclopedia libre*. Fecha de consulta: 15:52, noviembre 15, 2017 desde [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Teor%C3%ADa\\_erg%C3%B3dica&oldid=101245755](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Teor%C3%ADa_erg%C3%B3dica&oldid=101245755).

<sup>13</sup> No intentan predecir el estado futuro de un sistema. Es más parecido a entender la organización en la cual este se encuentra, para imaginar la organización buscada, para monitorias y representar continuamente los cambios observados en el sistema, para hacer posible sugerir adaptaciones y aprendizaje continuo por la observación de los efectos. b) cada tomador de decisiones en un sistema social tiene su propio punto de vista de la realidad del sistema. (Bousquet, 2014).

## Bibliografía

Asbhy, W. (1957). *An introduction to Cybernetics*. London, England: Chapman & Hall.

Asbhy, R.W. (1962). Principles of the self organizing system. *Co Special Double Issue*, 6. Recuperado de <http://csis.pace.edu/~marchese/CS396x/Computing/Ashby.pdf>.

Axelrod, R. (1997). *The complexity of cooperation agent based models of competition and collaboration*. London, England: Ed. Princeton studies in complexity.

- Axtell, R., Axelrod, R., Epstein, J. y Michael C. (1995). *Aligning Simulation Models: A case Study and Results*. Michigan, US: Computational and Mathematical Organization. Recuperado de [http://www-personal.umich.edu/~axe/research/Aligning\\_Sim.pdf](http://www-personal.umich.edu/~axe/research/Aligning_Sim.pdf).
- Axtell, R. Y Epstein, J. (1994). *Agent-Based Modeling: Understanding our creations*. *The bulletin of Santa Fe Institute*, 9(4) 28-32 Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/17d3/21793b9f55864c90ba0e4f094a0474edd1e5.pdf>.
- Bonabeau, E. (2002). *Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems*. *PNAS* 99(3). DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.082080899>.
- Bousquet F. (2014). *Companion Modelling. A participatory Approach to Support Sustainable Development*. France: Ed. Springer.
- Cesarman E. (1986). *Orden y caos*. Ciudad de México, México: Ed. Gernika.
- Di Tella, T. (1992). *La formalización teórica en ciencias sociales*. Disponible en <http://www.educ.ar>.
- Epstein, J. (2007). *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Epstein, J. (2005). *Remarks on the foundation of agent-Based generative social science*. *The Brooking Institute, CSED Working Paper* (41)
- Epstein, J. y Axtell, R.(1996). *Growing artificial societies. Social Science from the Bottom up*. Washington, DC, US: The Brookings Institution.
- Foerster, H. von.(1996). *Cibernética de la cibernética*. En H. von Foerster, *Las semillas de la cibernética*. (pp. 89-93), Barcelona, España: Ed. Gedisa.
- García, M. (2010). *Traducción del El discurso del método de René Descartes (1637)*. Madrid, España: Espasa Calpe
- Glaserfeld, E. Von.(1974). *Piaget and the Radical Constructivist Epistemology*. In Smock C. D. & Glaserfeld E. von (eds.) *Epistemology and education*. (pp. 1- 24), Athens GA: Follow Through Publications.
- Gleick, J. (1987). *Chaos Making a New Science*. New York, United States: Viking Books.
- Ilya, P., Norbert, W., y Stengers, I. (1984). *Order out fo chaos: Man´s new dialogue with nature*. New York, United States, Bantam Books.
- Ivarola, L. (2015). *La nueva filosofía mecanicista: sus principales aportes dentro de la filosofía de la ciencia*. *Eikasía. Revista de filosofía*. Recuperado de <http://www.revistadefilosofia.org/61-12.pdf>.
- Kosik, K. (2015). *Dialéctica de lo concreto*. *Marxismo crítico*. *Word press*. Recuperado de <https://marxismocritico.files.wordpress.com/2012/05/dialecticadeloconcreto.pdf>
- Klügl, F., y Bazzan, A. (2012). *Agent-Based Modeling and Simulation*. *Artificial Intelligence Magazine*. 33(3) DOI: <https://doi.org/10.1609/aimag.v33i3.2425>.
- Liu, F. (2011). *Validation and Agent-based modeling: a practice of contrasting simulation results with empirical data*. *New Mathematics and Natural Computation*, 7(3) 515-542. DOI: <https://doi.org/10.1142/S1793005711002050>.

- Maturana H., y Varela, F. (1994). *De Máquinas y Seres Vivos. Autopoiesis: La organización de lo vivo*. Buenos Aires, Argentina: Ed. Lumen.
- Moss, S. (2008). Alternative Approaches to the Empirical Validation of Agent-Based Models. *Journal of Artificial Societies and social simulation* 11 (15). DOI : <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/1/5.html>.
- Nigel, G., y Conte, R. (eds). (1995). *Artificial Societies. The computer simulation of social life*. Guildford, Inglaterra: UCL Press.
- Nigel, G. y Klaus G. T. (2005). *Simulation for the social scientist*. London, UK: Mc Graw Hill Educatio.
- Nigel, G., y Terna, P. (1999). How to build and use agent-based models in social science. *Mind & Society* (1). DOI : <https://doi.org/10.1007/BF02512229>.
- Olaru, D., Sharon, P., y Denize, S. (2009). Alternative ways of verification and validation of computational models: A case of replication in the innovation networks. Published at the *25th IMP-conference in Marseille*, France in 2009. Recuperado de [https://www.impgroup.org/paper\\_view.php?viewPaper=7200](https://www.impgroup.org/paper_view.php?viewPaper=7200).
- Polhill, J., Gary, P., Brown, D., y Grimm, V. (2008). 'Using the ODD Protocol for Describing Three Agent-Based Social Simulation Models of Land-Use Change'. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 11(2) DOI : <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/2/3.html>.
- Piaget, J., y García, R. (1982). *Psicogénesis e Historia de la Ciencia*. Madrid, España: Ed. XXI.
- Ribeiro, M., da Rocha, A.C. y Bordini, R. (2003). A system of Exchange Values to support social interaction in Artificial Societies. *Proceedings of the Interantional Conference on Autonomous Agents*. 2. 81-88. DOI : 10.1145/860575.860589.
- Rodríguez Zoya, L., & Roggero, P. (2015). Modelos basados en agentes: aportes epistemológicos y teóricos para la investigación social. *Revista Mexicana de Ciencias Políticas y Sociales*, LX (225), 233-266.
- Schelling, T. (1979) *Micromotives and Macrobehavior*. New York, United States: W.W. Norton & Company.
- Schelling, T. (1971). Dynamic models of segregation. *Journal of Mathematical Sociology* 1, 143-186.
- Simon, H. (1996). *The Sciences of the artificial*. Third edition. Massachusetts, United States: The MIT Press.
- Ten, G., George, v., Arend, L. 2014. Sensitivity analysis for agent-based models: a low complexity test-case. En Miguel, Amblard, Barceló & Madella (eds) *Advances in Computational Science and Social Simulation*. Barcelona, España: Autónoma University of Barcelona, DDD repository.
- Torri, D., Francois B., Toru I. Guy T., y Vejpas, C. (2005). Using Classification Learning in Computation Modeling. In Lukose D., Shiz (eds) *Multi-Agent Systems for Society. PRIMA 2005. Lecture Notes in Computer Science*, vol 4078. Berlin, Alemania: Springer.
- Teoría ergódica. (2017, 20 de agosto). *Wikipedia, La enciclopedia libre*. 15. Recuperado de [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Teor%C3%ADa\\_erg%C3%B3dica&oldid=101245755](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Teor%C3%ADa_erg%C3%B3dica&oldid=101245755).
- Windrum, P., Giorgio F., y Moneta, A. (2007). Empirical Validation of Agent-Based Models: Alternatives and Prospects. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 10 (28). DOI: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/10/2/8.html>.
- Wiener, N. (1989). *Cybernetics and society*. London, Inglaterra: Free Association Books.

Wilensky, U. y Rand, W. (2015). *An introduction to Agent-Based Modeling*. Modeling Natural, Social and Engineered complex systems with Netlogo. MIT Press.