

Modelos basados en agentes: aportes epistemológicos y teóricos para la investigación social

Agent-Based Models: Epistemological and Theoretical Contributions to Social Research

Leonardo Gabriel Rodríguez Zoya*
Pascal Roggero¹**

Recibido el 5 de noviembre de 2014
Aceptado el 23 de marzo de 2015

RESUMEN

Los modelos basados en agentes (MBA) constituyen una nueva generación de métodos computacionales que permiten modelar la estructura de un sistema complejo y simular su evolución dinámica a lo largo del tiempo. El uso de los MBA constituye una tendencia metodológica en expansión en las ciencias sociales contemporáneas; sin embargo, continúan siendo

ABSTRACT

Agent-based models (ABM) constitute a new generation of computer based methods that allow the modeling of the structure of a complex system and simulation of its dynamic evolution over time. The use of ABM constitutes a methodological tendency expanding in contemporary social sciences; however, these models remain quite unknown and not fre-

* Doctor en sociología (Universidad de Toulouse) y doctor en ciencias sociales (Universidad de Buenos Aires). Docente e investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET); Instituto de Investigaciones Gino Germani, Universidad de Buenos Aires (Argentina). Sus líneas de investigación son: pensamiento y sistemas complejos; investigación interdisciplinaria; simulación social; epistemología; metodología de la investigación. Entre sus últimas publicaciones destacan: “El espacio controversial de los sistemas complejos”, en coautoría con Paula Rodríguez Zoya (2014); “Epistemología y política de la metodología interdisciplinaria” (2014) y “La modelización y simulación computacional como metodología de investigación social”, en coautoría con Pascal Roggero (2014). Correo electrónico: leonardo.rzoya@gmail.com

** Doctor en sociología. Docente e investigador del Institut du Droit de l'Espace, des Territoires et de la Communication (IDETCOM), Universidad de Toulouse1-Capitole (Francia). Sus líneas de investigación son: pensamiento y sistemas complejos; simulación social; sociología de las organizaciones; administración pública. Entre sus últimas publicaciones destacan: “Statistical Exploratory Analysis of Agent-based Simulations in a Social Context”, en coautoría con Villa-Vialaneix y Sibertin-Blanc (2014); “SocLab: A Framework for the Modeling, Simulation and Analysis of Power in Social Organizations”, en coautoría con Sibertin-Blanc, Adreit, Baldet, Chapron, El-Gemayel, Mailliard y Sandri (2013) y “Using Soclab for a Rigorous Assessment of the Social Feasibility of Agricultural Policies”, en coautoría con Adreit, Sibertin-Blanc y Vautier (2011). Correo electrónico: Pascal.Roggero@ut-capitole.fr

¹ Los autores del trabajo agradecen los comentarios y sugerencias realizadas por los evaluadores anónimos que permitieron enriquecer y mejorar el artículo.

poco conocidos y enseñados en el campo sociológico, de modo que constituyen una alternativa metodológica minoritaria entre los investigadores sociales. El propósito de este trabajo es introducir a los científicos sociales en las ideas centrales de los modelos basados en agentes a partir de su articulación con ciertos problemas teóricos y metodológicos cruciales de las ciencias sociales. La primera sección problematiza la relación entre los modelos basados en agentes y los sistemas complejos en una perspectiva epistemológica crítica. Posteriormente, se analizan los aportes de los MBA a la investigación social, y en la tercera sección se evalúa críticamente su aplicación en el marco de una disciplina particular: la ciencia política. Finalmente, se desarrolla un ejemplo práctico de una simulación basada en agentes a partir del trabajo clásico de Thomas Schelling sobre segregación racial.

Palabras clave: modelo basado en agentes; sistemas complejos; simulación social; complejidad social; epistemología; sociología computacional.

quently taught in the field of sociology. They therefore represent a minor methodological alternative among social researchers. The purpose of this work is to introduce social scientists to the main ideas of the agent-based models as they are articulated with certain theoretical and methodological problems of the social sciences. The first section puts into question the relationship between agent-based models and complex systems in a critical epistemological perspective. Subsequently, the contributions of ABM to social research are analyzed, and in the third section, their application in the framework of a specific discipline, political science, is assessed. Finally, a practical example of a simulation based on agents from the classic work of Thomas Schelling about racial segregation is developed.

Keywords: agent-based model; complex systems; social simulation; social complexity; epistemology; computational sociology.

Introducción

En los albores del empleo de métodos de simulación computacional en ciencias sociales, los modelos basados en agentes (MBA) constituyen un enfoque protagónico de esta primavera metodológica. Gestados al calor del desarrollo de las ciencias de los sistemas complejos –verdadero campo interdisciplinario de la ciencia contemporánea– los MBA encarnan la promesa de constituirse en una metodología empíricamente operativa para estudiar la complejidad social. Su fecundidad radica, principalmente, en la capacidad técnica que brindan para modelar fenómenos sociales complejos y simular su evolución dinámica a lo largo del tiempo. Ciertamente, los MBA no vienen a reemplazar las metodologías clásicas en sociología, sino a potenciar su uso en un nuevo plano analítico.

El empleo de métodos computacionales de sistemas complejos, en particular los MBA, se ha desarrollado con gran vigor en las últimas dos décadas, impulsando así una tenden-

cia metodológica en expansión en las ciencias sociales contemporáneas. A pesar de este pujante crecimiento, los MBA continúan siendo poco conocidos y enseñados en el campo sociológico y constituyen una alternativa metodológica minoritaria entre los investigadores sociales. Este hecho justifica la pertinencia de este trabajo cuyo propósito es introducir a los científicos sociales en las ideas centrales de los modelos basados en agentes a partir de su articulación con ciertos problemas teóricos y metodológicos cruciales de las ciencias sociales. El alcance del artículo se orienta a exponer algunas potencialidades y aportes de los MBA para la investigación social; sin embargo la discusión sobre las limitaciones de esta metodología excede los desarrollos del presente artículo.²

Con base en estas coordenadas, el objetivo de este trabajo es realizar una reflexión crítica sobre algunos aspectos epistemológicos y teóricos del modelado basado en agentes en ciencias sociales. Para alcanzar este objetivo, la estrategia argumentativa articula cuatro momentos reflexivos. La primera sección problematiza la relación entre los modelos basados en agentes y los sistemas complejos en una perspectiva epistemológica crítica. Posteriormente, en la segunda sección se analizan los aportes de los modelos basados en agentes a la investigación social, atendiendo a algunas cuestiones teóricas y metodológicas centrales de las ciencias sociales, y en la tercera sección se evalúa críticamente la aplicación de los MBA a una disciplina particular: la ciencia política. Finalmente, en la cuarta sección se desarrolla un ejemplo práctico de una simulación basada en agentes a partir del trabajo clásico de Thomas Schelling sobre segregación racial. El artículo concluye con una síntesis y una reflexión de los autores.

Sistemas complejos y modelos basados en agentes en el campo de las ciencias sociales

El concepto de sistema complejo designa simultáneamente un campo científico interdisciplinario conocido como ciencias de los sistemas complejos o, simplemente, ciencias de la complejidad, y constituye, al mismo tiempo, el objeto de estudio de las mismas. Como objeto de estudio, los sistemas complejos comprenden el comportamiento adaptativo, autoorganizado, emergente y no lineal de fenómenos y procesos del mundo físico, biológico y social (Miller y Page, 2007). Un amplio número de fenómenos pueden ser descritos y caracterizados como sistemas complejos, por ejemplo, las colonias de hormigas, las redes neuronales del cerebro, las ciudades, las congestiones de tráfico, las redes sociales y los patrones de citación de los

² Para una discusión sobre las críticas y limitaciones de los MBA, véanse: Waldherr y Wijermans (2013). Dos problemas centrales en la metodología de MBA son la validación y verificación de los modelos. Sobre esta cuestión véanse: David (2009); Izquierdo, Galán Ordax, Santos y del Olmo Martínez (2008); Ormerod y Rosewell (2009); Squazzoni (2012). Sobre la estrategia de replicación como solución al problema de la verificación, véanse: Edmonds y Hales (2003).

investigadores de un campo científico, entre otros fenómenos.³ En términos específicos, un sistema complejo es un conjunto organizado de elementos y procesos interrelacionados cuya interacción dinámica en el tiempo produce comportamientos y regularidades macroscópicas –denominadas propiedades emergentes– que no pueden ser deducidos linealmente del conocimiento analítico de sus partes.

En uno de los textos fundadores del enfoque de los sistemas complejos, Warren Weaver (1948) afirma que la característica decisiva de este tipo de fenómeno no reside principalmente en un criterio cuantitativo, ligado al número de elementos y relaciones, sino en el modo en que un conjunto de elementos se interrelacionan de forma no trivial en un todo orgánico y conforman un sistema organizado. Para Weaver, estos problemas de complejidad organizada no pueden ser abordados por modelos mecánicos ni estadísticos, sino que requieren de modelos sistémicos.

Otra cualidad de los sistemas complejos guarda relación con lo que Herbert Simon (1973) conceptualizó como “sistemas no-descomponibles o casi-descomponibles”. Mientras en un sistema descomponible las partes y relaciones pueden ser separadas y tratadas aisladamente sin comprometer la organización del sistema, esto no es posible en un sistema complejo. En efecto, los sistemas complejos son cuasi o no descomponibles, puesto que “el comportamiento de cada uno de los componentes depende, en forma conjunta, del comportamiento de los componentes restantes” (Simon, 1973: 145). En esta línea de reflexión, Rolando García afirma que los elementos de un sistema complejo son interdefinibles, es decir, que “los distintos componentes sólo pueden ser definidos en función del resto” (García, 2000: 68). En la medida en que los elementos y procesos de un sistema complejo son interdefinibles, entonces no pueden ser separados para ser estudiados de modo independiente (García, 2006: 21). Así, el correlato de la interdefinición es la imposibilidad de aislar las partes de un sistema complejo. Para expresarlo sintéticamente, los elementos interdefinibles no son separables y, por lo tanto, los sistemas complejos son sistemas no descomponibles.

En este marco, los modelos basados en agentes (MBA) constituyen un método de modelado y simulación computacional para el estudio de la organización y la dinámica de sistemas complejos. Un MBA constituye una sociedad artificial integrada por agentes autónomos y heterogéneos que interactúan de modo no trivial entre sí y con el entorno, de acuerdo con ciertas reglas. La simulación computacional permite explorar en tiempo real la interacción dinámica entre los agentes y simular el proceso por el cual emergen patrones y estructuras en el entorno macro que no son reductibles a las propiedades de los agentes en el micro.

En términos histórico críticos se destaca que los sistemas complejos emergen como problema científico en los años 40 y 50 del siglo pasado, cuando surgen las primeras teorías,

³ Al respecto, véanse: Johnson (2001); Lewin (1995).

métodos y conceptos para abordarlos.⁴ No obstante, su consolidación como campo sistemático de investigaciones y cuerpo teórico metodológico organizado tiene lugar durante la década de los 80 del siglo pasado y es durante los últimos veinte años (1990-2010) cuando se constata una notable expansión del campo. La construcción socio histórica y científica de los sistemas complejos y la simulación computacional como campo de conocimiento se han desarrollado con escasos y débiles puntos de contacto con las ciencias sociales y las humanidades. Sin embargo, en las últimas dos décadas se evidencia un progresivo acercamiento entre ambos campos a través de un doble proceso. Por un lado, las ciencias de los sistemas complejos han comenzado a interesarse gradual y sistemáticamente por el estudio de los fenómenos y procesos sociales (Roggero y Sibertin-Blanc, 2008: 45), mediante la aplicación de los algoritmos y métodos formales de los sistemas complejos; por otro lado, el empleo de métodos computacionales de sistemas complejos para el modelado y la simulación de fenómenos y procesos sociales, políticos y económicos constituye una tendencia metodológica en expansión en las ciencias sociales contemporáneas del mundo anglosajón y europeo continental.

En el marco de este doble proceso se ha consolidado un activo campo de investigación conocido como *ciencias sociales computacionales*, que promueven “el empleo intensivo (y sistemático) de métodos computacionales para modelar fenómenos sociales” (Squazzoni, 2012: 1), para la construcción y operacionalización de teorías, así como para la generación y puesta a prueba de hipótesis sociológicas. Se registra amplia evidencia que testimonia el desarrollo vigoroso de este campo, como el florecimiento de centros de investigación especializados en la temática, la aparición de revistas especializadas –cerca de una docena en todo el mundo–,⁵ así como redes de investigación y sociedades académicas.⁶ Además, las revistas especializadas más influyentes a nivel internacional le han dedicado números especiales a la temática.⁷

A pesar de este notable desarrollo, las corrientes principales del enfoque de los sistemas complejos y de la simulación computacional en el campo científico social –tal como se desarrolla actualmente en el mundo anglosajón y europeo continental– son pasibles de una

⁴ Véanse: Hayek (1964); Simon (1973); Weaver (1948).

⁵ *Emergence: Complexity and Organization*, *Nonlinear phenomena in Complex Systems*, *Journal of Social Complexity*, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *Social Science Computer Review*, *Autonomous Agent and Multi-Agent Systems*, *Computational Economics*, *Computational Management Science*, entre otras.

⁶ Por ejemplo, la *Complex System Society* y la *European Social Simulation Association* en el ámbito europeo y la *Comunidad de Pensamiento Complejo* en América Latina.

⁷ Se documentan ediciones especiales en *American Behavioral Science* en 1999, *Journal of Economic Dynamics and Control* en 2001 y 2004, *Computational Economics* en 2001 y 2007, *Proceedings of the National Academy of Science* en 2002, *Journal of Economic Behavior and Organization* en 2004, *Journal of Public Economic Theory* en 2004, *American Journal of Sociology* en 2005, *Advances on Complex Systems* en 2008. También han aparecido artículos en revistas influyentes como: *Nature*, *Science*, *Physica A*, *Journal of Theoretical Biology*, *American Sociological Review*, *Annual Review of Sociology*, *Philosophy of the Social Sciences* y *Artificial Intelligence Review*.

profunda crítica epistémico-política. En primer lugar, estos enfoques “son incapaces de proveer un adecuado marco epistemológico que permita dar cuenta de su propia inscripción social e histórica y de las implicancias ético-políticas de sus prácticas y de los conocimientos generados” (Rodríguez Zoya, 2011: 22). Esto se evidencia en el predominio de abordajes técnico-instrumentales practicados con bajos niveles de reflexividad y centrados en los aspectos cuantificables y mesurables de los sistemas complejos. Así, el Premio Nobel de física Murray Gell-Mann sostiene que la medición de la complejidad está relacionada con “la longitud de la descripción más concisa del conjunto de regularidades de una entidad” (Gell-Mann, 1995: 2). De este modo, en el enfoque de los sistemas complejos parece operar una vocación práctica por reducir la complejidad a lo modelizable y formalizable, es decir, a lo que resulte tratable mediante algoritmos matemáticos o computacionales. Como observa con perspicacia el físico y epistemólogo Rolando García (2000: 67), “principalmente los grandes temas sociales, económicos y políticos (...) no son matematizables”. Por esta razón, cabe dejar planteado un interrogante crítico acerca de qué complejidad medimos cuando excluimos de dicha medición todo lo que no resulta modelizable y formalizable. Así, el enfoque de sistemas complejos puede asimilarse a lo que Edgar Morin denomina “complejidad restringida”, en la cual “la complejidad jamás es cuestionada ni pensada de manera epistemológica” (Morin, 2007: 35). En esta misma línea, Albert Einstein señalaba que “la ciencia sin epistemología es primitiva y confusa”.⁸ Además, se evidencia una tendencia a construir modelos de simulación al margen de la teoría social, “lo que conduce, demasiado a menudo, a modelizaciones cuyos fundamentos sociológicos son insuficientes” (Roggero y Sibertin-Blanc, 2008: 45). Un ejemplo paradigmático de esta cuestión se evidencia principalmente en las investigaciones en econofísica y sociofísica (Galam, 1996; 2004 y 2007). Sin embargo, hay algunas notables excepciones que articulan de modo sistemático y explícito teorías sustantivas, datos empíricos y modelos computacionales; por ejemplo, el desarrollo de la plataforma SocLab, realizada con base en la formalización de la sociología de la acción organizada de Michel Crozier y Erhard Friedberg.⁹

Finalmente, se evidencia la carencia de un marco epistemológico crítico que se interrogue sobre la dimensión política del conocimiento producido por el estudio de los sistemas complejos, así como de un cuestionamiento reflexivo sobre las posibilidades, límites e implicaciones epistémicas y ético-políticas del empleo de métodos de simulación computacional para la comprensión y explicación de fenómenos sociopolíticos. En esta línea crítico-reflexiva sobre la complejidad de los sistemas sociales y políticos se destacan las contribuciones de Immanuel Wallerstein (2006) y su propuesta de análisis de los sistemas mundo; los aportes de Edgar Morin (1990) en torno a los sistemas de complejidad organizada y la política de

⁸ Los autores del trabajo agradecen al evaluador anónimo que sugirió la incorporación de la cita de Einstein.

⁹ Véanse: Sibertin-Blanc, Roggero, Adreit, Baldet, Chapron, El-Gemayel, Mailliard y Sandri (2013).

la sociedad-mundo occidental, y la reflexión de Pablo González Casanova (2005) sobre las nuevas ciencias de la complejidad y las humanidades.

Es justamente en esta dirección donde cobra relevancia la construcción de un marco epistemológico crítico, empíricamente fundamentado, que permita incorporar las metodologías de modelado y simulación computacional en el repertorio teórico metodológico de las ciencias sociales. Uno de los mayores desafíos para las ciencias sociales consiste en superar las carencias teórico epistemológicas actuales de las ciencias de los sistemas complejos, y avanzar en el desarrollo de un programa de investigación orientado a construir modelos de simulación de problemas claves de la disciplina, fundamentados en teorías sustantivas de las ciencias sociales y en un marco epistemológico crítico y reflexivo.

Aportes teóricos de los modelos basados en agentes para la investigación social

Los MBA constituyen “un nuevo método analítico para las ciencias sociales” (Gilbert, 2007: 1); incluso, Axelrod (1997) afirma que constituyen un tercer modo de hacer ciencia, distinto y complementario a los dos métodos científicos estándar: la inducción y la deducción. Un MBA es un tipo particular de modelo científico que se implementa como un programa informático. Por esta razón, los MBA son un tipo de modelo computacional o, más precisamente, un modelo de simulación computacional.¹⁰ Los MBA son, por lo tanto, modelos formales que deben ser distinguidos tanto de los matemáticos (basados en ecuaciones diferenciales o de otro tipo) como de los estadísticos (orientados por variables y expresados como ecuaciones de regresión, estructurales, o de otro tipo). La diferencia sustantiva estriba en que los modelos computacionales permiten tratar modelos formales cuya resolución analítica es muy dificultosa, demanda mucho tiempo o sus resultados son realmente complicados de interpretar. En estos casos, la alternativa más eficiente es construir un modelo computacional y explorarlo a través de la simulación (Gilbert, 1998). Así, el modelado y la simulación computacional permiten “implementar y analizar rigurosamente el comportamiento de modelos formales de sistemas complejos –algo inviable hasta hace poco–” (Izquierdo, Galán Ordax, Santos y del Olmo Martínez, 2008: 92).

Los MBA pueden ser contruidos con distintos objetivos o finalidades. Algunos autores (Amblard y Phan, 2006) sostienen que los MBA pueden ser utilizados para predecir, describir, comprender e incluso para actuar, como es el caso de la modelización participativa (Étienne, 2010), que bien puede considerarse como una estrategia de investigación-acción. Sin embargo, otros autores destacan con claridad que los MBA son más adecuados para

¹⁰ Además de los MBA, existen diversos tipos de modelos computacionales. Para una introducción a los distintos métodos de modelado y simulación en ciencias sociales, véanse: Gilbert y Troitzsch (2005).

explicar que para predecir fenómenos sociales (García-Valdecasas Medina, 2014; Gilbert, 1996). En esta misma línea, algunos investigadores, como Edmonds (2014), enfatizan que los MBA deberían emplearse más bien para el análisis “posibilístico” que “probabilístico” –es decir, para desarrollar proyecciones e inferencias sobre lo que puede o no acontecer en un proceso social–, que para el cálculo de probabilidades de su ocurrencia, como lo hace, por ejemplo, un modelo estadístico.¹¹ Esto no implica, en absoluto, afirmar que los MBA no puedan ser utilizados con fines predictivos, como algunos autores lo han mostrado (Hassan, Arroyo, Galán, Antunes y Pavón, 2013), sino que los modelos estadísticos centrados en el análisis de la correlación entre variables pueden ser más adecuados para esta tarea (Gilbert, 1996).

La explicación y la predicción constituyen, sin duda, finalidades epistémicas centrales de la actividad científica; no obstante, ambos conceptos tienen que ser cuidadosamente diferenciados.¹² La divergencia principal estriba en que “es posible predecir un fenómeno de manera adecuada sin explicar nada de lo que está ocurriendo, y, del mismo modo, es posible explicar un fenómeno sin predecirlo correctamente” (García-Valdecasas Medina, 2014: 43). En estas coordenadas, resulta pertinente puntualizar el potencial explicativo de los MBA. Apoyado en el andamiaje teórico de la sociología analítica (Hedström y Bearman, 2009), García-Valdecasas Medina (2014) distingue con claridad y precisión tres tipos de explicación: las explicaciones por leyes (típica de los modelos nomológico-deductivos del positivismo lógico); las explicaciones basadas en variables (propia de los modelos estadísticos) y, finalmente, las explicaciones basadas en mecanismos (propuestas por la sociología analítica). Desde esta última perspectiva, explicar un fenómeno social implica identificar y detallar los mecanismos causales que son capaces de generarlo, tomando en consideración la acción de los actores sociales, la estructura de interacción y el entorno social donde se desarrolla el fenómeno. García-Valdecasas Medina (2014) plantea con solvencia que los MBA constituyen una vía metodológica para desarrollar explicaciones centradas en mecanismos. Así, mientras los modelos estadísticos pueden considerarse como modelos centrados en variables cuyo fin principal es la predicción; los MBA pueden caracterizarse como modelos orientados a procesos cuya fecundidad mayor radica en explicar los mecanismos generadores de un proceso social (Gilbert, 1996). Por esta razón, Epstein sostiene que “la contribución central [de los MBA] es facilitar la explicación generativa” (Epstein, 2006b: 1587). En efecto,

¹¹ Sobre la distinción entre la lógica probabilística y la lógica posibilista en la simulación social véanse los trabajos de Bruce Edmonds (1999). En el campo del pensamiento latinoamericano se destacan las contribuciones pioneras de Carlos Matus (1987) –en el ámbito de la planificación estratégica situacional– y de Oscar Varsavsky –en el terreno del análisis de viabilidad y el desarrollo del método de experimentación numérica– (Varsavsky, 1971; Varsavsky, Calcagno, Ibarra, de Barbieri, Naon, Nuñez del Prado, Sainz, La Fuente, Domingo, Sabato, Cornblit, Di Tella y Gallo, 1971).

¹² Es interesante notar que, incluso para los positivistas lógicos y para el racionalismo crítico popperiano, “no hay gran diferencia entre explicación y predicción [...] Es una diferencia, no de estructura lógica, sino de énfasis; depende de lo que consideremos como nuestro problema” (Popper, 1984: 148).

los MBA permiten representar explícitamente las interacciones entre agentes autónomos y heterogéneos en un entorno. Este modelo implementado en un programa informático constituye una sociedad artificial que, al ser ejecutada en la computadora, permite generar –“hacer crecer” a través de la simulación– estructuras y patrones sociales macroscópicos que emergen de la interacción dinámica entre los agentes en el tiempo. En síntesis, los MBA pueden constituir la infraestructura metodológica para el desarrollo de una ciencia social generativa (Epstein, 2006a).

Resulta pertinente preguntarse sobre cuáles son los aspectos teóricos y metodológicos diferenciales que los MBA pueden aportar para la investigación en ciencias sociales. A este respecto, cabe destacar cinco cuestiones relevantes: el vínculo micro-macro; el modelado de la complejidad social; la simulación de la temporalidad de los procesos sociales y políticos; el modelado del espacio y, finalmente, la experimentación virtual.

Vínculo micro-macro

Los MBA abordan el vínculo micro-macro en una doble dirección. En primer lugar, permiten modelar y simular el vínculo *de lo micro a lo macro*, es decir, “cómo las interacciones locales y descentralizadas entre agentes autónomos y heterogéneos generan una determinada regularidad” macrosocial (Epstein, 2006a: 5), tales como instituciones, normas, comportamientos colectivos, estructuras sociales, estados. Se emplea el concepto de emergencia para referirse a la aparición de “cualidades o propiedades de un sistema que presentan un carácter de novedad con relación a las cualidades o propiedades de los elementos considerados aisladamente” (Morin, 1977: 129-130). La noción de emergencia comprende “los procesos a través de los cuales las conductas globales de un sistema resultan de la acción e interacción” entre sus componentes (Sawyer, 2005: 2). Los fenómenos emergentes son, en consecuencia, difíciles de explicar y predecir en la medida en que las cualidades nuevas a nivel macro de un sistema no pueden deducirse ni reducirse al conocimiento analítico de las partes a nivel micro. Por lo tanto, el concepto de emergencia tiene valor heurístico para abordar la complejidad de la relación entre el nivel micro y macro de un sistema social complejo. Adicionalmente, las estructuras o patrones sociales son el resultado del “proceso de interacción no lineal” entre los actores de un sistema social (Squazzoni, 2012: 15). El concepto de “no linealidad” alude a que “pequeñas (o grandes) variaciones de una variable (*sic*) pueden provocar grandes (o pequeñas) alteraciones de las demás” (Alemañ Berenguer y Pérez Selles, 2000: 143). En consecuencia, los sistemas sociales pueden caracterizarse como

sistemas emergentes y sistemas no lineales (Johnson, 2001; Sawyer, 2005).¹³ Por esta razón, el comportamiento macrosocial no es el resultado de la suma, agregación o yuxtaposición de los comportamientos individuales –es decir, de una combinación lineal de variables– sino, contrariamente, el resultado emergente de la interacción no lineal entre los actores de un sistema social. En este sentido, los patrones de acción colectiva, las instituciones o estructuras sociales constituyen fenómenos emergentes en relación con el nivel microsocial que los genera.

Basados en los argumentos precedentes, podemos afirmar que los MBA constituyen una estrategia de modelado emergente en la cual se estudian las dinámicas “de abajo hacia arriba”, de lo local a lo global, de lo micro a lo macro (*bottom-up modeling*), lo que contrasta con las técnicas de modelización tradicional que operan de modo descendente o *top-down*, es decir, “de arriba hacia abajo”.¹⁴ Mientras que en el modelado tradicional se parte de estructuras ya creadas, en la modelización basada en agentes se estudia el proceso de creación de nuevas estructuras. De este modo, el modelado interactivo de la emergencia social mediante MBA permite abordar lo que Pablo González Casanova (2005: 59) denomina “la creación de novedades históricas”, en un sentido análogo a una de las grandes preocupaciones de Jean Piaget: “la construcción de estructuras no preformadas, es decir, de estructuras que no obedecen a una tendencia” (García, 1997: 12). No cabe duda que el problema de la creación de nuevas estructuras sociales constituye uno de los temas cruciales del pensamiento crítico en las ciencias sociales, el cual podría encontrar algunas herramientas operativas en la metodología de MBA para expandir la frontera de su propio desarrollo teórico y conceptual.

En segundo lugar, los MBA contribuyen a comprender el vínculo *de lo macro a lo micro*, relativo al modo en que “las estructuras sociales constriñen e influyen las acciones futuras y las interacciones entre los actores individuales” (Sawyer, 2007: 323). El interés analítico de esta fase del modelado del vínculo micro-macro se centra en comprender cómo “los in-

¹³ A este respecto conviene precisar la distinción entre los conceptos de emergencia y no linealidad. En términos metafóricos, la noción de emergencia puede sintetizarse en la expresión “el todo es más que la suma de las partes”; mientras que la idea de no linealidad puede resumirse en la frase “pequeños cambios, grandes consecuencias”, expresada por el conocido “efecto mariposa”: “el aleteo de una mariposa en Brasil puede producir un tornado en Texas”. La metáfora del efecto mariposa, acuñada por el meteorólogo Edward Lorenz, ilustra uno de los conceptos centrales de la teoría del caos: la sensibilidad a las condiciones iniciales que presentan los sistemas dinámicos no lineales, es decir la no proporcionalidad de los cambios iniciales en un sistema y sus consecuencias (Briggs y Peat, 1989). Asimismo, es importante destacar que los fenómenos emergentes son resultado de procesos no lineales; sin embargo, la afirmación inversa no es correcta ya que puede haber procesos no lineales que no presenten propiedades emergentes (por ejemplo, el problema de los tres cuerpos tratado por Poincaré a fines del siglo XIX).

¹⁴ En este sentido, los MBA se distinguen de las simulaciones computacionales dominantes en los años 60 y 70 basadas en variables estructurales agregadas a nivel macro. Este tipo de modelado se conoce con el nombre de dinámica de sistemas y fue empleado en las simulaciones impulsadas por el Club de Roma (Forrester, 1971). Durante estas décadas también surgen las primeras simulaciones computacionales basadas en enfoques individualistas metodológicos, por ejemplo las contribuciones de James Coleman (1962, 1964) o el trabajo clásico de Raymond Boudon (Boudon y Davidovitch, 1964).

dividuos elaboran representaciones mentales de constructos sociales” (Conte, Gilbert y Simão Sichman, 1998: 5) que influyen en su propia conducta práctica. En otros términos, la acción social (nivel micro) no puede escindirse del modo en que los individuos piensan y razonan sobre el orden social (nivel macro). Squazzoni (2012: 13) destaca que algunos autores, como Archer y Sawyer, enfatizan que “las estructuras sociales emergentes a nivel macro ejercen poder causal sobre los individuos a nivel micro”. Esta problemática ha sido conceptualizada como emergencia de segundo orden para referirse, específicamente, a la aptitud reflexiva de los agentes sociales para razonar sobre las propiedades emergentes que la misma sociedad produce (emergencia de primer orden); por ejemplo, las instituciones y todo patrón de acción colectiva. La especificidad de la emergencia de segundo orden, también conceptualizada como “causalidad social” (Sawyer, 2007: 8) o “causalidad descendente” (Conte, 2009: 42), consiste en destacar la aparición de propiedades o cualidades nuevas en el nivel de la parte o componente de un sistema; en consecuencia, en el aspecto individual emergen propiedades nuevas en la medida en que dicho individuo está inserto en una estructura de relaciones de un sistema social concreto. Resulta acertado, entonces, comprender la emergencia de primer orden en términos de lo que Edgar Morin denomina una “macro emergencia o emergencia global”, y la emergencia de segundo orden como una “micro emergencia o emergencia local”; este doble concepto de emergencia permite apreciar que “no sólo el todo es más que la suma de las partes [macro emergencia], sino que la parte es en y por el todo, más que la parte” (Morin, 1977: 131).

En síntesis, los MBA ofrecen una metodología empíricamente operativa para abordar un problema central en las ciencias sociales: el vínculo dinámico o, mejor aún, dialéctico, entre la acción social y la estructura, entre el comportamiento político y las instituciones políticas; en suma, entre el nivel individual y el colectivo (Alexander, Giesen, Münch, y Smelser, 1994).

Modelado de la complejidad social

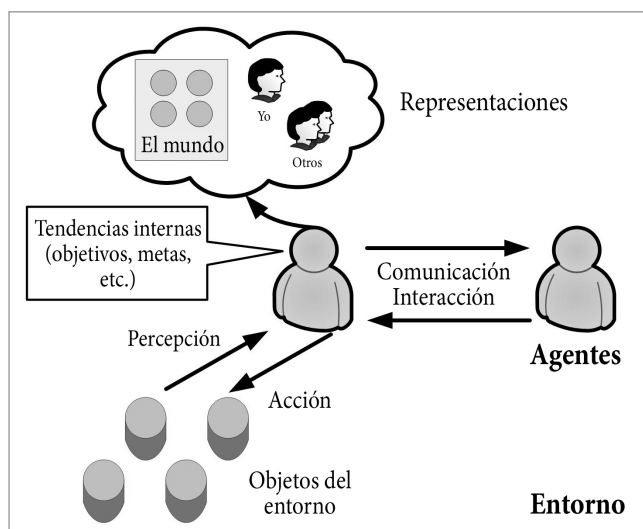
La metodología de MBA permite representar explícitamente tres elementos de interés central para las ciencias sociales: los agentes, el entorno y las reglas de comportamiento. Estas últimas se refieren, por lo menos, a tres cuestiones principales: (I) a lo que los agentes pueden hacer con los elementos que componen el entorno (reglas agente-entorno); (II) a la acción e interacción entre los agentes que componen el modelo (reglas agente-agente); y (III) al comportamiento de los elementos que componen el entorno (reglas entorno-entorno) (Epstein y Axtell, 1996; Treuil, Drogoul y Zucker, 2008). Por lo tanto, los MBA permiten no sólo modelizar agentes sociales sino además representar “la estructura de interacción entre los actores sociales como el entorno que los rodea” (García-Valdecasas Medina, 2014: 47). Dicho de otro modo, los MBA constituyen sociedades de agentes situados en un entorno, y

enmarcadas en estructuras de acción e interacción social (Conte, Gilbert y Sichman, 1998; Ferber, 2006). Mejor aún, los MBA son “modelos de interacción social entre agentes heterogéneos incrustados (*embedded*) en estructuras sociales” (Squazzoni, 2012: 2).

Para ilustrar las potencialidades de los MBA para la modelización de la complejidad social, resulta importante distinguir el concepto de agente tal como es empleado en las ciencias sociales de aquel utilizado en las ciencias computacionales. En estas últimas, la idea de agente constituye una construcción artificial, es decir, una pieza de *software* programada para representar cierta clase de objetos. Es por esta razón que no resulta conveniente equiparar inmediatamente la noción de agente de *software* con un individuo concreto, aunque bien podría emplearse un MBA para modelar ciertos individuos específicos. Los agentes de *software* de un MBA permiten representar tanto actores sociales individuales (ciudadanos, votantes, candidatos, consumidores), como actores colectivos (comunidades, familias, empresas, instituciones, estados, agencias de gobierno, naciones).

Dicho esto, es posible responder a la pertinente pregunta: ¿quién es un agente en un MBA? Ferber (1995) sugiere que un agente es alguien capaz de actuar en un entorno; percibir y representarse parcialmente el entorno y los otros; comunicarse de modo directo o indirecto con otros agentes; estar motivado por tendencias internas y, finalmente, conservarse y reproducirse. La figura 1 representa los elementos de una arquitectura típica de agentes.

Figura 1
Representación de la arquitectura de un MBA.



Fuente: Ferber, Jacques, (1995) *Les Systèmes multi-agents: Vers une intelligence collective*. París, InterEditions, pp. 15.

Por su parte, Macy y Flache (2009) destacan que los agentes de un MBA tienen una arquitectura social y cognitiva. El aspecto social alude a los aspectos de heterogeneidad, autonomía, interdependencia e “incrustamiento” social que caracteriza a los agentes; mientras que los aspectos cognitivos se refieren a sus capacidades heurísticas y adaptativas.

En primer lugar, los MBA permiten modelar la heterogeneidad real de los actores sociales y políticos, atendiendo a la diversidad de comportamientos, identidades, redes sociales de pertenencia, preferencias, y creencias sociales, políticas, culturales y económicas, entre otros. Un ejemplo simple y claro lo constituye el clásico modelo *Sugarscape*, propuesto por Epstein y Axtell (1996), en el cual los agentes tienen un conjunto de características constantes para toda la vida (sexo, ritmo metabólico, visión) y un conjunto de atributos variables que se modifican y evolucionan a partir de la interacción social (preferencias económicas individuales, riqueza, identidad cultural y salud). En consecuencia, los MBA permiten superar uno de los aspectos problemáticos del modelado matemático y estadístico de fenómenos sociales, el cual radica justamente en que este tipo de modelización elimina la heterogeneidad de los fenómenos reales y modela un “agente promedio”, “ideal” o “representativo”, como en la economía neoclásica y la teoría de los juegos en ciencias sociales. Contrariamente, “en el modelado basado en agentes no se emplean agentes representativos [...] sino poblaciones de agentes heterogéneos que varían en un sinnúmero de características” (Epstein, 2006a: 5-6). Por lo tanto, los MBA permiten operacionalizar la diversidad y heterogeneidad de estrategias, comportamientos e intereses de actores individuales y colectivos representados en una sociedad artificial. Por ejemplo, si se pretendiese desarrollar un sistema político artificial, podrían modelarse distintos comportamientos y preferencias de los votantes tomando en cuenta sus identidades políticas, posicionamiento ideológico y características socioeconómicas; asimismo, sería factible modelar diversidad de estrategias electorales de partidos y líderes políticos.

En segundo lugar, los agentes de un MBA son autónomos, es decir que no hay un control central, jerárquico o descendente sobre la conducta de los agentes individuales. En otros términos, los agentes de una sociedad artificial o MBA son autónomos porque “tienen el control sobre su propia conducta” (Sawyer, 2007: 8), lo que equivale a afirmar que pueden “operar sin que otros tengan control directo de sus acciones y su estado interno” (Gilbert y Troitzsch, 2005: 173).

En tercer lugar, la autonomía de los agentes no es ilimitada sino que se encuentra constreñida por las relaciones de interdependencia comportamental e interdependencia estratégica (Macy y Flache, 2009). Esta última se refiere a que el rendimiento de la estrategia de un actor se encuentra condicionado por las estrategias de los otros actores, mientras que la interdependencia comportamental comprende las relaciones de influencia recíproca entre los actores. Dicho en otros términos, todo agente influye y es influido por otros agentes sociales.

En cuarto lugar, los MBA no representan agentes individuales aislados, sino agentes que se encuentran “incrustados” (*embedded*) en estructuras sociales. Esto quiere decir que la acción social no acontece en el vacío, sino que se encuentra posibilitada y constreñida por estructuras de redes sociales dinámicas y complejas. De este modo, los MBA permiten flexibilizar ciertos supuestos restrictivos de la teoría de los juegos, por ejemplo, el análisis estático del equilibrio de Nash (Macy y Flache, 2009).

En cuanto a la arquitectura cognitiva, los agentes operan con modos de razonamiento heurístico basados en reglas de conducta sencillas; más aún, la metodología de MBA permite construir modelos de racionalidad limitada (Simon, 1982) en los cuales los agentes tienen capacidades cognitivas restringidas e información limitada basada en la percepción y el conocimiento local del entorno y de otros agentes. Estas características permiten superar dos supuestos restrictivos de la teoría económica ortodoxa: la información perfecta y la racionalidad perfecta (Arthur, 1994), es decir, la idea que los agentes sociales tienen información ilimitada del mundo social y una capacidad de cálculo deductiva para procesar dicha información.

Adicionalmente, los agentes son adaptativos en tanto que son capaces de modificar sus conductas basadas en el aprendizaje de experiencias previas (Gilbert, 2007; Macy y Flache, 2009). Los agentes tienen, por lo tanto, alguna capacidad limitada de memoria para recordar la historia de sus interacciones y los resultados de sus acciones y estrategias que les permiten evaluar y decidir los futuros cursos de acción a emprender (Arthur, 1994; Ferber, 2006).

Otro aspecto importante a señalar es que los MBA brindan la oportunidad de modelar cierta clase de habilidad social como es el lenguaje y la comunicación, lo que posibilita la interacción social en el seno de la sociedad artificial. Los agentes pueden desplegar tanto conductas reactivas como proactivas. En el primer caso, los agentes responden al entorno a partir de la percepción y representación que tienen el mismo; por su parte, las conductas proactivas aluden a la capacidad de los agentes de tomar la iniciativa en función de sus propios estados internos (Gilbert y Troitzsch, 2005).

En síntesis, los elementos examinados permiten afirmar que la metodología de MBA admite modelar la complejidad social en un sentido que resulta fundamental para la investigación en ciencias sociales. La idea central a destacar es la siguiente: el modelado computacional con MBA puede construir (programar) agentes de *software* con características análogas a las que la teoría social atribuye a los actores sociales y, por lo tanto, construir modelos del mundo social con mayor grado de realismo que otros métodos de modelización formal.

Simulación de la temporalidad de los procesos sociales y políticos

El estudio de la continuidad y del cambio de las instituciones y las estructuras sociales, políticas y económicas ha sido una preocupación histórica del conjunto de las ciencias sociales;

sin embargo, existen fuertes restricciones metodológicas para desarrollar teorías dinámicas de los procesos sociopolíticos. Una de las tragedias de la sociología se cierne entre “el profundo interés en estudiar procesos sociales [...] y la dificultad de investigar empíricamente tales procesos” (Sawyer, 2007: 316). La metodología de MBA representa un aporte fundamental a esta problemática ya que “permite modelar la estabilidad a través del tiempo (el ‘problema del orden’) y el cambio social” (Sawyer, 2007: 321). De este modo, los MBA “constituyen un medio fundamental para colocar el estudio de procesos, el cambio y dinámicas de largo plazo en el corazón de la sociología [...], ya que permiten pensar los patrones sociales o estructuras en términos de procesos que emergen del cambio y la interacción no lineal entre agentes en el tiempo” (Squazzoni, 2012: 15). En este sentido, los MBA constituyen una metodología complementaria al método histórico-comparado y a los estudios diacrónicos. Así, la simulación basada en agentes permite abordar “la problemática del tiempo y la secuencia de eventos en el desarrollo de procesos históricos” (Pierson y Skocpol, 2002: 8). Los MBA aparecen como herramientas adecuadas y operativas para explicar “la formación de instituciones a través de procesos temporales concretos en los cuales se encuentran embebidas” (Thelen, 1999: 369) y, en particular, para el análisis de la dependencia de camino (*path dependence*) donde los resultados de eventos singulares en una coyuntura crítica, inducen y atraen eventos en la misma dirección produciendo una “lógica de retroalimentación positiva y auto-reforzamiento (*self-reinforcing*) del proceso” (Pierson, 2000: 252), lo que induce a un incremento de los costos para alejarse de la trayectoria original (*increasing returns*). De este modo, la idea teóricamente central según la cual el ordenamiento temporal de eventos singulares condiciona e influye en el resultado de un proceso histórico puede ser simulado computacionalmente mediante un MBA.

El sociólogo perspicaz habrá advertido ya la fecundidad de este planteamiento que no es otro sino la verdadera oportunidad de desarrollar una metodología rigurosa y operativa para articular el estudio de la compleja relación entre la estructura social y los acontecimientos sociales a lo largo de un proceso social dinámico. Visualizamos, pues, una ventana para escapar, por un lado, de la Escala del pensamiento estructuralista que “unifica abstractamente anulando la diversidad” (Morin, 1990: 30), produciendo una cosificación de lo social que excluye tanto el devenir histórico como la emergencia de eventos singulares e irreducibles; y, por el otro, de la Caribdis de las filosofías del acontecimiento que “yuxtaponen la diversidad sin concebir la unidad” (Morin, 1990: 30) y decretan la muerte teórica de la categoría de estructura para pensar la realidad social.

Frente a estos modos de pensamiento simplificador, la metodología de MBA constituye la infraestructura tecnológica para modelar la unidad compleja de la estructura y el acontecimiento en el devenir histórico, un problema teórico crucial que ha sido objeto de elaboraciones teórico-conceptuales en distintos campos, como la epistemología y la filosofía de la historia. Así, por ejemplo, la epistemología genética de Piaget señala que no hay

estructura sin historia, ni historia sin estructura, y plantea, en consecuencia, “la necesidad fundamental de una dialéctica de la génesis y de la estructura, correspondiente a sus interacciones efectivas y alternativas” (Piaget, 1979: 117). El campo historiográfico se hizo cargo de una controversia “que hizo saltar a la palestra el problema de la naturaleza del tiempo histórico, es decir, el problema de la “larga duración” y su relación con el acontecimiento histórico y el cambio social de manera general” (Naishtat, 2009: 54). Fue Braudel, eximio historiador de la escuela francesa de los *Annales*, quien elaboró esta controversia en términos de una “dialéctica de la duración entre el instante y el tiempo lento en su transcurrir” (Braudel, 1984: 88), es decir, entre la larga duración en la cual se construyen estructuras en la historia y la corta duración del acontecimiento. Insistamos una vez más en la potencialidad metodológica de los MBA al brindar sustento técnico y operativo para expresar en un modelo de simulación social los desarrollos teórico conceptuales acerca de la dialéctica de la duración entre estructura y acontecimiento. Podemos atrevernos a afirmar que los MBA expanden el horizonte de sentido de la investigación social al dotarla de herramientas metodológicas empíricamente operativas para la construcción efectiva de una ciencia de la complejidad social.

Modelado del espacio

Los MBA posibilitan una representación explícita del espacio geográfico, es decir, un “hábitat donde los agentes virtuales interaccionan entre sí” (García-Valdecasas Medina, 2011: 97). El modelado del espacio puede realizarse con distintos niveles de abstracción, desde una cuadrícula bidimensional, al estilo de un tablero, hasta entornos con alto grado de realismo. Este espacio virtual, en el cual los agentes se desplazan e interactúan entre sí y con el entorno, es el que permite observar la dinámica de la simulación y el proceso por el cual emergen las estructuras sociales macroscópicas. Más aún, los MBA pueden ser implementados a través de sistemas de información geográfica (*Geographic Information Systems*, habitualmente conocidos como GIS). Se trata de una tecnología de georreferencia a través de la cual la simulación se integra y desarrolla sobre un espacio geográfico real: rutas, ciudades, campos, países. El empleo conjunto de MBA y GIS se ha extendido con notable pujanza en distintos campos de las ciencias sociales computacionales, desde la geografía y los estudios urbanos (Koch y Mandl, 2011), hasta la sociología rural, la ecología y los estudios de desarrollo sustentable (Bousquet, Trébuil y Hardy, 2005) e, incluso, la arqueología computacional (White, 2005). Esta línea de investigación es más modesta y menos sistemática en disciplinas como la sociología y la ciencia política, aunque se evidencian algunos desarrollos de interés (Gulden, 2004). La posibilidad del modelado explícito del espacio geográfico, ofrecida por la tecnología GIS y los MBA, abre oportunidades inéditas para la investigación

social, especialmente en la medida en que permite integrar de modo robusto un nuevo nivel analítico e interpretativo en la simulación computacional: la dimensión espacial y geográfico-territorial de la dinámica sociopolítica.

Experimentación virtual

Los MBA permiten realizar experimentos virtuales en sociedades artificiales. A diferencia de la experimentación de laboratorio (*in-vitro*) o sobre sistemas reales (*in-vivo*) –a menudo indeseables o imposibles en las ciencias sociales–, los MBA permiten experimentar sobre un modelo de simulación computacional (*in-silico*). Por esta razón, “las sociedades artificiales pueden considerarse como *laboratorios*” (Epstein y Axtell, 1996: 4), en los cuales “un experimento puede ser configurado y repetido sucesivas veces, empleando un rango de parámetros o permitiendo que algunos factores varíen aleatoriamente” (Gilbert, 2007: 3). La idea de experimentación virtual deja planteado, no obstante, un problema epistemológico “en la medida en que el vínculo de inferencia realizado supone que el modelo es una representación fidedigna del sistema-objeto” (Treuil, Drogoul y Zucker, 2008: 7). En efecto, “mientras en un experimento se controla el objeto real de interés, en una simulación se experimenta con un modelo y un mundo social artificial, no con el fenómeno en sí” (Lozares, 2004: 183).

Para valorar las potencialidades abiertas por la idea de experimentación virtual, a continuación desarrollamos un breve ejemplo en el contexto de la ciencia política. A menudo se afirma que la experimentación es “impracticable para [el estudio de] los sistemas políticos [puesto que] no es posible reconstruir en un laboratorio las realidades políticas significativas, o bien disponer de experimentos políticos que, por ejemplo, tengan como objeto a los ciudadanos, las instituciones, las autoridades” (Pasquino, 2004: 31). Imaginemos, por ejemplo, que podríamos construir, gracias a las posibilidades que nos ofrecen los MBA, un sistema político computacional. Con ellos resulta posible modelar ciudadanos, instituciones y autoridades en un entorno computacional para “hacer crecer” o “generar” un sistema político artificial [*in-silico* –en la computadora–]. Por lo tanto, el desarrollo de un sistema político computacional constituye una especie de laboratorio virtual para la generación y control de hipótesis, para la operacionalización y el testeo de teorías, y para la construcción de teorías vía simulación computacional. En conclusión, se evidencia que la experimentación virtual con MBA permite potenciar, a través de la simulación computacional, el desarrollo de las metodologías clásicas en ciencias sociales.

Evaluación crítica de la aplicación de los MBA en ciencia política

El empleo de MBA en ciencia política presenta un desarrollo menor con respecto a otras disciplinas sociales como la sociología, la economía, e incluso la antropología y la arqueología. En el campo sociológico, los MBA se han consolidado como un enfoque teórico metodológico conocido como simulación social y, más recientemente, como sociología computacional basada en agentes. Asimismo, se han afianzado institucionalmente a través de revistas especializadas (JASSS¹⁵ es la más reputada) y de la formación de amplias redes académicas en Europa, Estados Unidos y Asia Pacífico.¹⁶ Ninguna de estas iniciativas se manifiesta análogamente en ciencia política, donde las técnicas de modelado y simulación se encuentran más próximas a los modelos matemáticos, vinculados a la teoría de juegos y a la elección racional, y a los modelos estadísticos, fuertemente relacionados con el análisis de redes sociales. En suma, los MBA son una perspectiva minoritaria en el campo politológico contemporáneo.

Las líneas de investigación en sistemas complejos y MBA más avanzadas en el ámbito mundial han tendido a subestimar la especificidad de los fenómenos políticos y, en consecuencia, han prestado poca atención tanto a las variables político institucionales como a la dimensión de lo político, es decir, a los aspectos relacionados con el poder y el conflicto constitutivos de las relaciones humanas y de la vida en sociedad. Esta carencia se evidencia en dos niveles. En el nivel teórico, el modelo pionero de sociedades artificiales, denominado *Sugarscape* (Epstein y Axtell, 1996), incorporó aspectos sociológicos, económicos, demográficos, epidemiológicos y culturales, pero no ha considerado seriamente ningún factor propiamente político. En el nivel de la investigación empírica, uno de los proyectos sobre sistemas complejos y MBA más ambicioso a nivel mundial es FuturICT,¹⁷ cuyo objetivo es modelar y simular “sistemas tecno-socio-económico-ambientales” con la finalidad de construir opciones para un “futuro sustentable”. Aunque el interés y la utilidad política potencial del proyecto son innegables, se destaca que FuturICT no aborda de modo sistemático y explícito el modelado ni la simulación de los fenómenos y procesos políticos. La incorporación de la dimensión política en el trabajo de modelado y simulación computacional continúa siendo un área de vacancia en el campo de los sistemas complejos y de los

¹⁵ *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, fundado en 1998. Información disponible en: <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/JASSS.html>>.

¹⁶ En Europa, la *European Social Simulation Association*, fundada en 2003: <<http://www.essa.eu.org>>. En Estados Unidos, *The Computational Social Science Society of the Americas*, fundada en 2002 bajo el nombre de NAACSOS: <<http://computationsocialscience.org>>. En Asia Pacífico la *Pan-Asia Association for Agent-based Approach in Social Systems Sciences*: <<http://www.paaa.econ.kyoto-u.ac.jp>>.

¹⁷ FuturICT es una iniciativa paneuropea que se define como “un proyecto visionario que entregará la nueva ciencia y la tecnología para explorar, entender y gestionar nuestro mundo conectado”. Información disponible en: <<http://www.futurict.eu/>>.

MBA, y esto a pesar de los avances realizados recientemente en la materia (Kollman y Page, 2006; Marchi y Page, 2008).

En particular, es evidente una carencia en el desarrollo de una perspectiva comparada en el trabajo de modelado y simulación basada en agentes en ciencia política; es decir, en el desarrollo de modelos de alcance medio que permitan articular la teoría y los datos con la finalidad de comparar sistemáticamente fenómenos políticos concretos. Panebianco (1993) distinguió tres tipos de científicos políticos: los teóricos, los ideográficos y los comparatistas. Este diagnóstico continúa siendo válido en el campo de la ciencia política computacional, donde predominan los modelos abstractos (MBA teóricos sin aplicación empírica), seguidos de simulaciones aplicadas (MBA ideográficos que representan un fenómeno empírico singular, muchas veces contruados al margen de la teoría y de difícil comparación). Entre los modelos abstractos destacan los primeros trabajos del politólogo Robert Axelrod (1984; 2004) sobre la cooperación y el conflicto. También se han contruido MBA teóricos sobre la guerra, el cambio tecnológico y la formación de estados (Cederman, 2003); la violencia civil (Epstein, 2002); la formación y el cambio de identidades políticas (Lustick, 2000); la competencia partidaria (Laver y Sergenti, 2011) y la formación de normas e instituciones (Andrighetto, Campenni, Cecconi y Conte, 2010; Linares, 2012), entre otros. Mientras tanto, se han realizado simulaciones aplicadas (MBA ideográficos) sobre la competencia de partidos en las elecciones holandesas de 2002 (Muis, 2010); la detección de fraude electoral en las elecciones mexicanas de 2006 (Castañeda e Ibarra, 2010); la dinámica de la campaña electoral en EEUU en 2000 (Gulati, Hadlock y Gainsborough, 2011), entre otros. Los MBA teóricos e ideográficos no abordan el problema de la comparación entre modelos ni desarrollan enfoques sistémicos; es decir, que modelan fenómenos políticos aislados a nivel abstracto o empírico.

Un ejemplo práctico: el modelo de Schelling

Thomas Schelling (1969, 1971 y 1978) desarrolló uno de los primeros modelos de simulación en el campo de las ciencias sociales, el cual se conoce habitualmente con el nombre de “modelo de segregación racial” o, simplemente, “modelo de Schelling”. La preocupación fundamental de Schelling era la segregación racial en los Estados Unidos y se propuso esclarecer la relación entre las actitudes y las conductas individuales, y las consecuencias sociales de las mismas. En otros términos, el modelo de Schelling ataca la problemática de la relación entre el nivel micro y macrosocial, tratando de discernir cómo conductas sociales más o menos intolerantes conducen a la formación de guetos o barrios segregados. El modelo desarrollado por este autor se plasmó en un diseño de Autómatas Celulares (AC), concebidos originalmente por Von Neumann (1966) en los años 40 del siglo xx. Un AC es un tablero bidimensional (una especie de damero) donde cada “celda” representa un “agente”. El modelo

de Schelling puede expresarse como un modelo basado en agente y ser simulado en la computadora. A diferencia del AC, los agentes de un MBA pueden “desplazarse” en el entorno.

El diseño general del modelo de Schelling es simple: hay un mundo de agentes que habitan en una ciudad (el MBA en su conjunto); cada agente ocupa una celda que metafóricamente podemos entender como la casa o vivienda del agente. Hay dos clases de agentes que vamos a representar con los colores blanco y gris; asimismo, los agentes pueden ser más o menos tolerantes, es decir, pueden tener una mayor o menor disposición para convivir con agentes de un color distinto al suyo. La literatura especializada conviene en conceptualizar esta preferencia como “función umbral” (Bruch y Mare, 2006).¹⁸ Así, por ejemplo, un valor umbral bajo representa “agentes tolerantes” que están dispuestos a convivir con una gran cantidad de vecinos de un color distinto al propio. Los umbrales bajos expresan lo que algunos autores denominan “una preferencia por la diversidad” (Heymann, Kawamura, Perazzo, Zimmermann, 2009: 150); inversamente, valores umbral altos permiten modelizar “agentes intolerantes” cuya preferencia consiste en estar rodeados de una gran proporción de vecinos del mismo color.

Adicionalmente, cada agente tiene un “conjunto de vecinos”, representados por los otros agentes que ocupan las celdas adyacentes a su posición. El modelo parte de una “regla de comportamiento” muy sencilla: cada agente observa su entorno local y evalúa por qué tipos de vecinos está rodeado; un agente estará “contento” si está rodeado por un cierto número de agentes del mismo color en una cantidad mayor que el valor expresado en la función umbral. Contrariamente, diremos que un agente está “descontento” si la cantidad de agentes del mismo color que lo rodean –sus vecinos– son inferiores al límite establecido por la función umbral. En virtud de esta evaluación del entorno local, los agentes tienen que decidir: si el agente está “descontento”, entonces decide “mudarse”, es decir, desplazarse a otra celda adyacente del tablero. Si el agente está “contento”, permanece donde está. La simulación consiste en “ejecutar” el modelo en la computadora y observar el comportamiento dinámico de la población de agentes que constituyen el modelo.

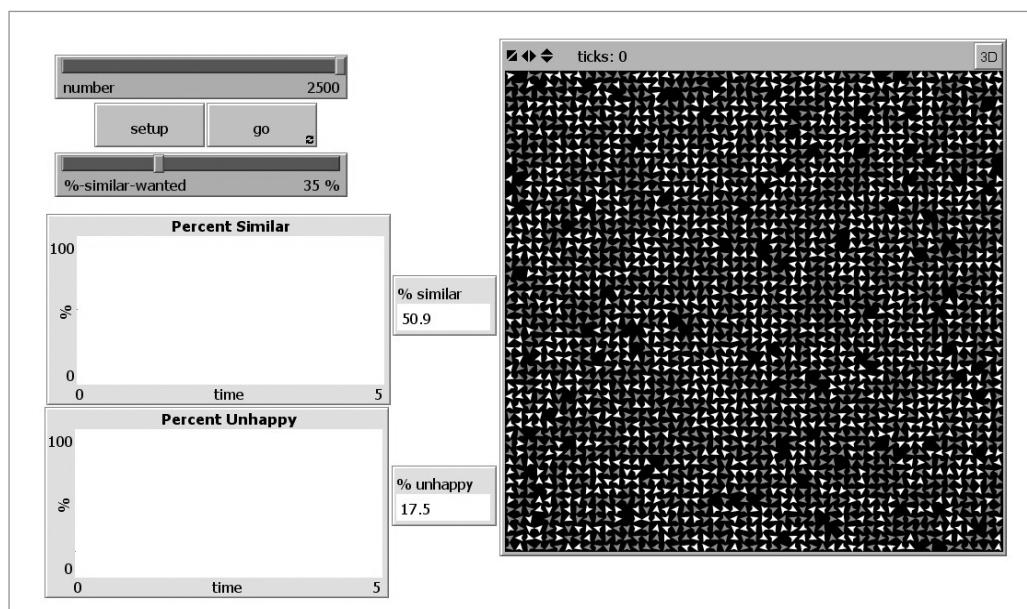
En la siguiente figura observamos la implementación del modelo de Schelling en la plataforma NetLogo¹⁹ (Wilensky, 1997 y 1999), el cual tiene dos variables de entrada: “number”

¹⁸ Para una discusión de los aportes de Schelling a los modelos con umbral, véase también el trabajo de Salazar (2007).

¹⁹ NetLogo es una plataforma informática para el desarrollo de modelos de simulación basados en agentes. Es desarrollada y mantenida por el Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling de la Universidad de Northwestern. NetLogo puede descargarse gratuitamente desde el siguiente enlace: <<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>>. El lector interesado puede instalar fácilmente NetLogo en su computadora y seguir el ejemplo pedagógico desarrollado en el artículo. Para abrir el modelo de segregación en NetLogo se deben seguir estos sencillos pasos: abrir NetLogo; ir al menú “Archivo”; elegir la opción “Biblioteca de modelos”; dentro de la carpeta “Social Science” buscar el modelo “Segregation” y dar clic en “Abrir”. En la pantalla del programa aparecerá la ventana para la calibración inicial del modelo, tal como se muestra en la figura 2. Para mayores referencias sobre NetLogo, véanse: Izquierdo (2012); Wilensky (2013).

que representa la cantidad de agentes y “%-similar-wanted” que expresa la función umbral, y que en este caso es el porcentaje de agentes del mismo color del que cada agente quiere estar rodeado.

Figura 2
Calibración inicial del modelo de simulación



Fuente: elaboración propia.

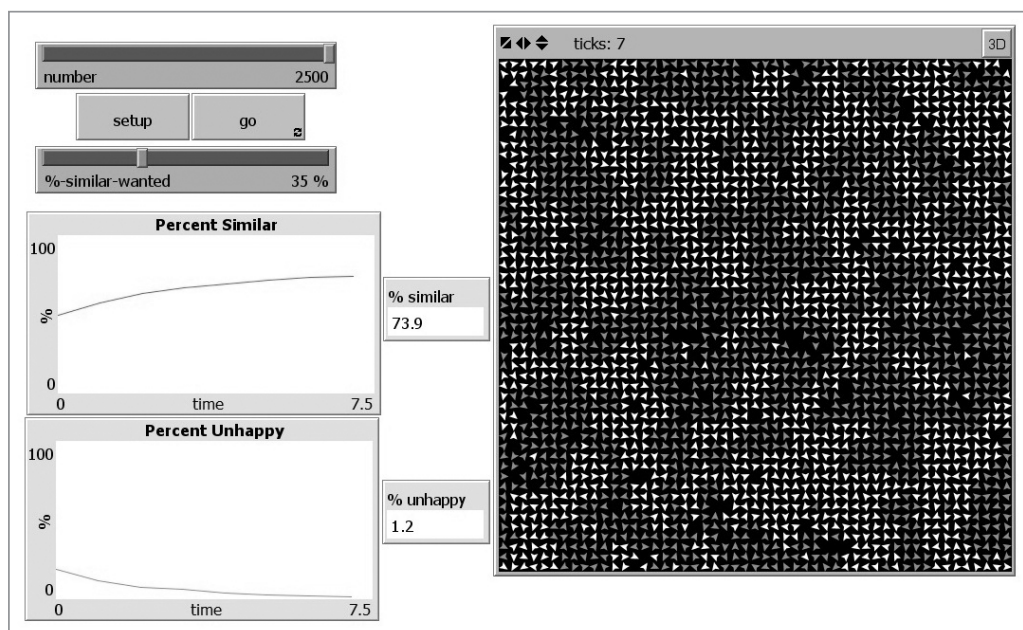
A modo de ejemplo, configuramos el valor del umbral en 35%. Esto quiere decir que cada agente estará “contento” si está rodeado, al menos, de 35% de agentes de su mismo color. Podemos decir que estamos representando un “agente tolerante” en la medida en que acepta convivir con 65% de agentes de distinto color. En otros términos, cada agente considerado individualmente no tiene una actitud racista ni discriminadora.

Es interesante notar que el modelo tiene dos variables de salida, una llamada “% SIMILAR”, que indica el porcentaje promedio de vecinos del mismo color que tiene cada agente; la otra, denominada “% UNHAPPY”, indica el porcentaje de agentes que tienen menos vecinos del mismo color de lo que preferirían. El modelo se inicia presionando el botón “*setup*” que distribuye de manera aleatoria los agentes en el vecindario. Es conveniente aclarar que 50% de los agentes es de color blanco y 50% gris. Con esta calibración aleatoria inicial, observamos que 50.1% de agentes tiene en promedio vecinos del mismo color, mientras que

17.5% de agentes se siente descontento porque tiene menos vecinos del color que quisiera y, por lo tanto, según las reglas del modelo, va a desplazarse (mudarse) en el próximo paso de simulación.

Para dar inicio a la simulación, presionamos el botón “go” y observamos el proceso de auto organización de los agentes en la ciudad o barrio simulado. Al volver a presionar el botón “go” pausamos la simulación y vemos qué sucede. En la siguiente figura observamos la distribución de los agentes al cabo de siete pasos de simulación.

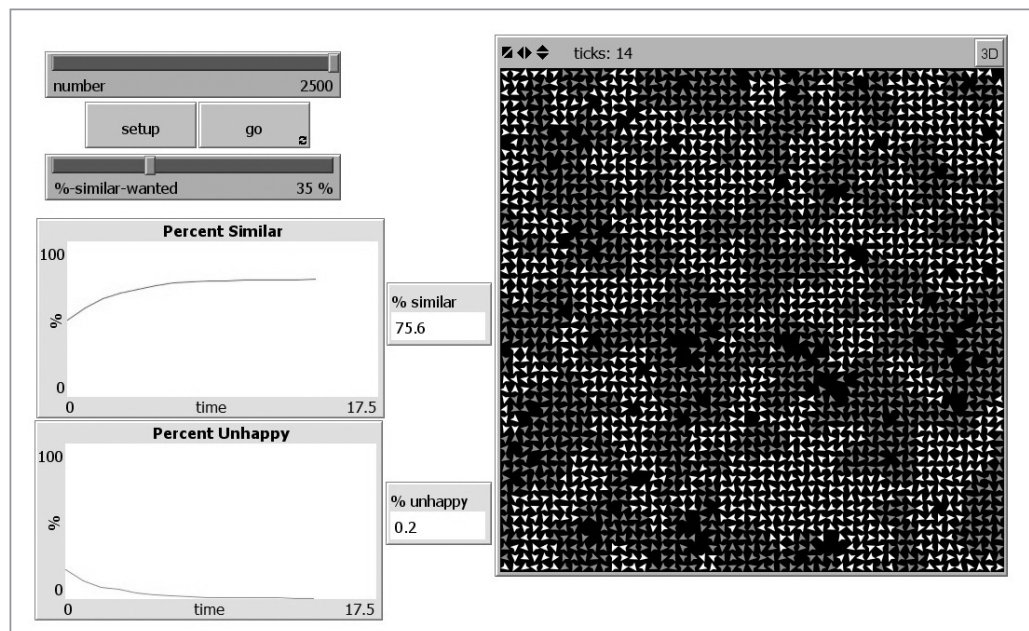
Figura 3
La evolución del modelo (7 pasos de simulación)



Fuente: elaboración propia.

Las variables de salida nos muestran que el porcentaje promedio de agentes con vecinos similares aumentó de 50.1% a 74.2% y que el nivel de “descontento” descendió de 17.5% a 1.6%. Volvemos a ejecutar la simulación y, al cabo de algunos pasos de iteración, la detenemos para observar su evolución, lo que representamos en la siguiente figura:

Figura 4
La evolución del modelo (13 pasos de simulación)



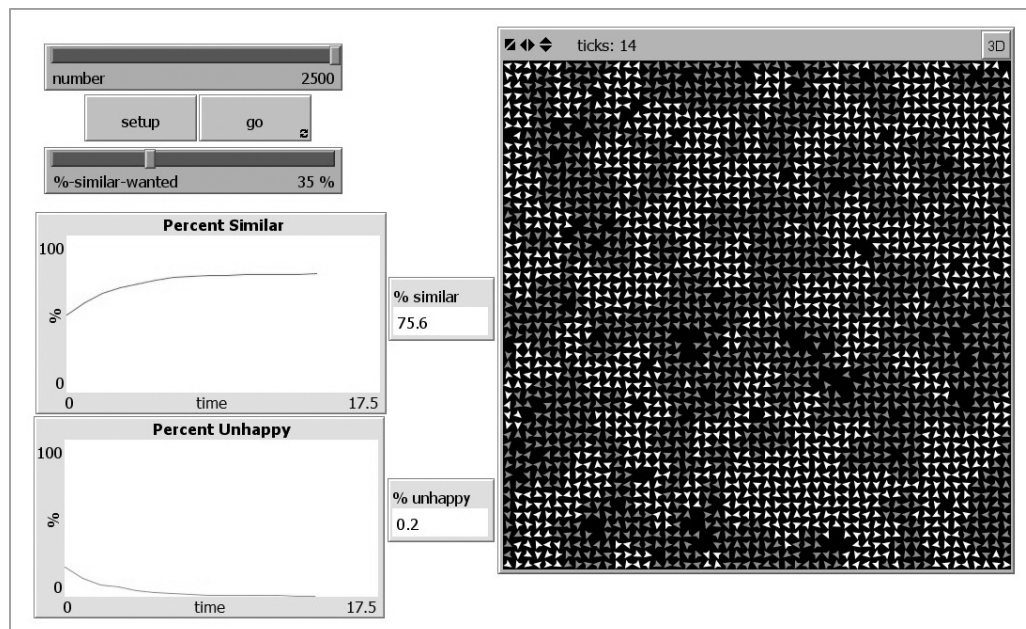
Fuente: elaboración propia.

Con esta configuración inicial, la simulación se detiene en el paso 20, tal como se muestra en la figura 5.

A simple vista podemos constatar la formación de guetos o barrios segregados, representados por los conjuntos de agentes agrupados en zonas blancas o grises. En otros términos, la simulación permite hacer “emerger” de abajo hacia arriba un patrón social macroscópico: la segregación racial. Aquí constatamos que los MBA son modelos generativos, es decir, cada agente actúa a partir de reglas locales e información parcial puesto que no tiene percepción de lo que sucede a nivel agregado del sistema. Reglas locales sencillas conducen a la formación de patrones sociales complejos.

Si comparamos el modelo inicial con el final, podemos observar claramente que en el modelo de la figura 2 las zonas blancas y grises resultan indistinguibles, mientras que, al concluir la simulación, se han formado áreas claramente distinguibles que agrupan a los vecinos blancos y grises. Si observamos las variables, 76.6% de los vecinos tiene en promedio vecinos de igual color y no hay ningún agente que se sienta descontento.

Figura 5
La evolución del modelo (20 pasos de simulación)



Fuente: elaboración propia.

El modelo de Schelling es útil como ejemplo pedagógico para ilustrar un comportamiento típico de los sistemas complejos; el comportamiento agregado y macroscópico del sistema no puede deducirse linealmente del conocimiento analítico de las partes que lo componen. En otros términos, no alcanza con analizar los elementos de un sistema social para comprender su funcionamiento dinámico global.

Además, y más importante aún, el modelo de Schelling permite ilustrar cómo pueden surgir “efectos” macrosociales contra intuitivos. El hecho de que cada agente, considerado individualmente, tenga una actitud tolerante (representado en un nivel bajo de la función umbral de 35%) no es suficiente para que la “tolerancia” sea una característica del conjunto social. Contrariamente, la simulación nos muestra que “conductas tolerantes” dan lugar a la formación de barrios segregados, es decir, patrones emergentes contra intuitivos y no predecibles.

Conclusiones

En este trabajo hemos realizado una presentación sintética de los modelos basados en agentes. Como conclusión queremos destacar que los MBA constituyen un desafío y una posibilidad para la investigación social. El conjunto de la comunidad de científicos sociales podría asumir una actitud crítica y reflexiva frente al enfoque de los sistemas complejos y las metodologías de modelado y simulación computacional, o permanecer en las aguas tranquilas de las teorías y los métodos conocidos. Más aún, afirmamos que los MBA constituyen una metodología de trabajo que permite integrar los métodos clásicos de investigación social en un nuevo plano –el de la simulación computacional– para explorar nuevas estrategias de construcción de conocimiento. En modo alguno, los MBA constituyen un reemplazo de las teorías y métodos existentes, pero claramente permiten integrar aquéllos en una lógica epistémica novedosa que expande los límites metodológicos de las ciencias sociales. Los MBA facilitan la integración de distintos tipos de evidencia empírica de tipo cualitativo, cuantitativo e incluso experimental.²⁰ La evidencia empírica juega dos papeles mayores en el proceso de modelado y simulación social: la calibración de los modelos y su validación (Boero y Squazzoni, 2005).

Por un lado, modelizar un fenómeno social implica plantear ciertas hipótesis razonables acerca de los agentes sociales involucrados en el fenómeno estudiado, sus formas de comportamiento y sus modos de interacción. De hecho, un MBA es la expresión en un programa informático de un conjunto de hipótesis acerca de un proceso social. La razonabilidad de las hipótesis en las que se sustenta el modelo implica que las mismas sean plausibles desde un punto de vista teórico o empírico. Por esta razón, es importante contar con datos empíricos del fenómeno modelizado para poder calibrar los parámetros y variables de entrada de un modelo de simulación, en lugar de utilizar distribuciones aleatorias abstractas (Hassan Collado, 2009). Tanto los métodos cuantitativos y experimentales, e incluso los métodos cualitativos, pueden ayudar a producir evidencia sobre el comportamiento de los actores. Además, “el análisis de redes sociales puede proporcionar información crucial sobre la estructura de interacción entre los actores reales, y, por consiguiente, sobre cómo debe ser la estructura de interacción entre los agentes” (García-Valdecasas Medina, 2014: 52).

Por otro, una de las mayores dificultades de la metodología de los MBA consiste en la validación de los modelos, la cual se refiere “al proceso de valorar el grado en el que un modelo es una representación adecuada del mundo real” (Ormerod y Rosewell, 2009: 131). Una estrategia de validación consiste en comparar los resultados de la simulación con el fenómeno observado en el mundo real, lo cual exige necesariamente construir datos del fenómeno en estudio por una vía distinta a la simulación (Amblard y Phan, 2006). Así, los métodos clásicos

²⁰ Véanse: García-Valdecasas Medina (2014); Phan y Varenne (2010); Rodríguez Zoya y Roggero (2014).

de investigación social pueden ayudar a producir evidencia empírica que permita comparar los resultados de la simulación con el fenómeno bajo estudio (Gilbert, 1995).

Los MBA brindan cinco aportes concretos de especial interés para las ciencias sociales: la simulación de la temporalidad de los procesos sociales; la representación explícita del espacio social; la posibilidad de desarrollar experimentaciones virtuales; el modelado de la complejidad social y, finalmente, una nueva metodología empíricamente operativa para estudiar el vínculo entre el nivel micro y macrosocial, y avanzar así en la construcción y la comprobación de teorías complejas de la realidad social. Estas cinco potencialidades constituyen líneas de trabajo cuya fecundidad tiene que ser probada. Asimismo, los MBA delinean un nuevo espacio de trabajo en ciencias sociales que reviste interés para la reflexión epistemológica, la elaboración teórica y la investigación empírica. Avanzar en la concreción de un programa de investigación en modelado y simulación de la complejidad social implica atreverse a pensar una nueva manera de practicar la investigación social, y requiere necesariamente de un trabajo colectivo fuertemente interdisciplinario en el cual la cooperación entre sociólogos y científicos computacionales es un requisito fundamental. Más aún, los MBA constituyen una estrategia para favorecer la comunicación y fortalecer el diálogo entre distintas ciencias y disciplinas puesto que un MBA permite integrar fenómenos sociales, cognitivos, ecológicos, normativos, naturales y geográficos, entre otros (Le Page, Becu, Bommel, Bousquet, 2012; Müller y Aubert, 2011).

Hay dos riesgos que deben ser evitados, uno consiste en creer que el desarrollo de nuevos instrumentos de conocimiento, tecnológicamente avanzados e instrumentalmente sofisticados como lo son los MBA, permitirá el progreso científico de nuestras disciplinas sociales y humanísticas. Esta celebración poco crítica de las tecnologías de simulación puede estimular una racionalidad instrumental de la era informática, lo que podría redundar en la colonización metodológica de las ciencias sociales por los instrumentos formales de los sistemas complejos. A este respecto, es preciso recordar las lecciones de la epistemología y la historia de la ciencia. Ningún avance revolucionario en la historia del conocimiento se produjo por el desarrollo de nuevos métodos y técnicas, ni por el acceso a nuevos datos ni tampoco por encontrar nuevas respuestas a preguntas conocidas (Koyré, 1999). Contrariamente, las reorganizaciones más importantes de los sistemas de pensamiento consistieron en “formular nuevas preguntas para los viejos problemas” (García, 2000: 71), es decir, en cambiar el punto de partida de los razonamientos. En este sentido, los métodos de modelado y simulación sólo pueden ser un auxilio a la intuición, un estímulo al razonamiento abductivo y creativo que todo proceso de construcción de conocimiento requiere.

El segundo riesgo consiste en ignorar los progresos actuales de las ciencias de los sistemas complejos y los de las ciencias sociales computacionales desarrollados de la mano de la simulación basada en agentes. Evidentemente, atrevernos a descubrir el mundo de la simulación computacional en ciencias sociales implica un desafío para nosotros mismos;

supone, en efecto, trascender los límites de nuestra cultura disciplinar y proponernos dialogar –por lo menos– con investigadores de las ciencias computacionales. Indudablemente, no se trata de que el sociólogo aprenda a programar ni que el informático aprenda teoría social: implica construir un nuevo diálogo donde la interdisciplinariedad deje de ser un eufemismo políticamente correcto.

Por lo anterior, el uso de la simulación computacional en el repertorio metodológico de las ciencias sociales constituye un bello desafío. El desarrollo de una reflexión epistemológica crítica sobre las posibilidades y límites de la simulación en ciencias sociales, así como la significación social y política de una ciencia social computacional, constituye una línea de reflexión que tiene que ser profundizada y problematizada. El reto de la simulación en ciencias sociales está planteado. El desafío es de quien quiera asumirlo.

Referencias bibliográficas

- Alemañ Berenguer, Rafael Andrés y J. F. Pérez Selles, (2000) “Una introducción a la dinámica no lineal en enseñanza Secundaria” en *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*. Vol. 18, núm. 1, pp. 141-145.
- Alexander, Jeffrey; Giesen, Bernhard; Münch, Richard y Neil Smelser, (1994) *El vínculo micro-macro*. Guadalajara, México, Universidad de Guadalajara, Gamma Editorial.
- Amblard, Frédéric y Denis Phan, (2006) *Modélisation et simulation multi-agents applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*. París, Lavoisier.
- Andrighetto, Giulia; Campenni, Marco; Cecconi, Federico y Rosaria Conte, (2010) “The Complex Loop of Norm Emergence: A Simulation Model” en Takadama, Keiki; Cioffi Revilla, Claudio y Guillaume Deffuant (eds.), *Simulating Interacting Agents and Social Phenomena: The Second World Congress, Agent-Based Social Systems*. Vol. 7, pp. 19-35. Tokio, Springer.
- Arthur, Brian, (1994) “Inductive Reasoning and Bounded Rationality” en *American Economic Review*. Vol. 84, núm. 2, pp. 406-411. Nueva York, Asociación Estadounidense de Economía.
- Axelrod, Robert, (1984) *The Evolution of Cooperation*. Nueva York, Basic Books.
- Axelrod, Robert, (1997) “Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences” en Conte, Rosaria; Hegselmann, Rainer y Pietro Terna (eds.), *Simulating Social Phenomena*. Berlín, Springer-Verlag, pp. 21-40.
- Axelrod, Robert, (2004) *La complejidad de la cooperación. Modelos de cooperación y la colaboración basada en los agentes*. Buenos Aires, Fondo de Cultura Económica.
- Boero, Riccardo y Flaminio Squazzoni, (2005) “Does Empirical Embeddedness Matter? Methodological Issues on Agent-Based Models for Analytical Social Science” en *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. Vol. 8, núm. 4, pp. 1-31.
- Boudon, Raymond y André Davidovitch, (1964) “Les mécanismes sociaux des abandons de poursuite” en *L'Année Sociologique*. Vol. 3, pp. 111-244.
- Bousquet, François; Trébuil, Guy y Bill Hardy, (2005) *Companion Modeling and Multi-Agent Systems for Integrated Natural Resource Management in Asia*. Metro Manila, Filipinas, International Rice Research Institute.
- Braudel, Fernand, (1984) *La historia y las ciencias sociales*. Madrid, Alianza Editorial.
- Briggs, John y David Peat, (1989) *Espejo y reflejo: del caos al orden*. Barcelona, Gedisa.
- Bruch, Elizabeth Eve y Robert D. Mare, (2006) “Neighborhood Choice and Neighborhood Change” en *American Journal of Sociology*. Vol. 112, núm. 3, pp. 667-709. Chicago, University of Chicago Press.

- Castañeda, Gonzalo e Ignacio Ibarra, (2010) “Detección de fraude con modelos basados en agentes: las elecciones mexicanas de 2006” en *Perfiles Latinoamericanos*. Vol. 18, núm. 36, pp. 43-69. México, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cederman, Lars-Erik, (2003) “Modeling the Size of Wars” en *American Political Science Review*. Vol. 97, núm. 1, pp. 135-150. Cambridge, Cambridge University Press.
- Coleman, James Samuel, (1962) “Analysis of Social Structures and Simulation of Social Processes with Electronic Computers” en Harold Steere, Guetzkow (ed.), *Simulation in Social Science*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, pp. 63-69.
- Coleman, James Samuel, (1964) “Mathematical Models and Computer Simulation” en Faris, Robert (ed.), *Handbook of Modern Sociology*. Chicago, Rand McNally and Company, pp. 1027-1062.
- Conte, Rosaria, (2009) “From Simulation to Theory (and Backward)” en Squazzoni, Flaminio (ed.), *Epistemological Aspects of Computer Simulation in the Social Sciences*. Berlín, Springer, pp. 29-47.
- Conte, Rosaria; Gilbert, Nigel y Jaime Simão Sichman, (1998) “MAS and Social Simulation: A Suitable Commitment” en Conte, Rosaria; Gilbert, Nigel y Jaime Simão Sichman (eds.), *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation Lecture Notes in Computer Science*. Berlín, Springer, pp. 1-9.
- David, Nuno, (2009) “Validation and Verification in Social Simulation: Patterns and Clarification of Terminology” en Squazzoni, Flaminio (ed.), *Epistemological Aspects of Computer Simulation in the Social Sciences*. Berlín, Springer, pp. 117-129.
- Edmonds, Bruce, (1999) *Syntactic Measures of Complexity*. Manchester, Manchester Metropolitan University, tesis de doctorado.
- Edmonds, Bruce, (2014) *Towards Integrating Everything*. Ponencia presentada en el taller de trabajo: *Joining Complexity Science and Social Simulation for Policy*, Budapest.
- Edmonds, Bruce y David Hales, (2003) “Replication, Replication and Replication: Some Hard Lessons from Model Alignment” en *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. Vol. 6, núm. 4, pp. 1-22. Surrey, Reino Unido, University of Surrey.
- Epstein, Joshua M., (2002) “Modeling Civil Violence: An Agent-Based Computational Approach” en *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Vol. 99, pp. 7243-7250. Washington, PNAS.
- Epstein, Joshua M., (2006a) *Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling*. Princeton, Princeton Studies in Complexity.
- Epstein, Joshua M., (2006b) “Remarks on the Foundations of Agent-Based Generative Social Science” en Tesfatsion, Leigh y Kenneth Judd (eds.), *Handbook of Computational Economics*. Vol. 2, pp. 1585-1604. Agent-Based Computational Economics. Países Bajos, Holanda del Norte.

- Epstein, Joshua M. y Robert Axtell, (1996) *Growing Artificial Societies. Social Science from the Bottom Up*. Washington D.C., MIT Press.
- Étienne, Michel, (2010) *La modélisation d'accompagnement. Une démarche participative en appui au développement durable*. Versailles, Quae.
- Ferber, Jacques, (1995) *Les Systèmes multi-agents: Vers une intelligence collective*. París, InterEditions.
- Ferber, Jacques, (2006) "Concepts et méthodologies multi-agents" en Amblard, Frédéric y Denis Phan (eds.), *Modélisation et simulation multi-agents*. París, Hermes - Lavoisier, pp. 23-48.
- Forrester, Jay Wright, (1971) *World's Dynamics*. Cambridge, MA, Wright-Allen Press.
- Galam, Serge, (1996) "When Humans Interact Like Atoms" en Witte, Erich y James Davis (eds.), *Understanding Group Behavior: Consensual Action by Small Groups*. New Jersey, Lawrence Erlbaum Ass, pp. 293-312.
- Galam, Serge, (2004) "Sociophysics: a Personal Testimony" en *Physica A: Statistical and Theoretical Physics*. Vol. 336, núm. 1-2, pp. 49-55.
- Galam, Serge, (2007) "From 2000 Bush-Gore to 2006 Italian Elections: Voting at Fifty-fifty and the Contrarian Effect" en *Quality and Quantity Journal*. Vol. 41, pp. 579-589. Nueva York, Springer.
- García-Valdecasas Medina, José Ignacio, (2011) "La simulación basada en agentes: una nueva forma de explorar los fenómenos sociales" en *Revista Española de Investigaciones Sociológicas*. núm. 136, pp. 91-110. Madrid, Centro de Investigaciones Sociológicas.
- García-Valdecasas Medina, José Ignacio, (2014) "Explicación, mecanismo y simulación: otra manera de hacer sociología" en *EMPIRIA. Revista de Metodología de Ciencias Sociales*. Vol. 28, pp. 35-58.
- García, Rolando, (1997) *La epistemología genética y la ciencia contemporánea*. Barcelona, Gedisa.
- García, Rolando, (2000) *El conocimiento en construcción. De las formulaciones de Jean Piaget a la teoría de los sistemas complejos*. Barcelona, Gedisa.
- García, Rolando, (2006) *Sistemas complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*. Barcelona, Gedisa.
- Gell-Mann, Murray, (1995) "What is Complexity?" en *Complexity*. Vol. 1, núm. 1, pp. 16-19. Disponible en: <http://tuvalu.santafe.edu/~mgm/Site/Publications_files/MGM%20116.pdf> [Consultado el 7 de marzo de 2015].
- Gilbert, Nigel, (1995) "Using Computer Simulation to Study Social Phenomena" en *Bulletin de Méthodologie Sociologique*. Vol. 47, pp. 99-111. París, Francia, International Association of Sociological Methodology.

- Gilbert, Nigel, (1996) "Simulation as a Research Strategy" en Troitzsch, Klaus; Mueller, Ulrich; Gilbert, Nigel y James Doran (ed.), *Social Science Microsimulation*. Berlín, Springer, pp. 448-454.
- Gilbert, Nigel, (1998) "Simulation: An Introduction to the Idea" en Ahrweiler, Petra y Nigel Gilbert (eds.), *Computer Simulations in Science and Technology Studies*. Berlín, Springer, pp. 1-13.
- Gilbert, Nigel, (2007) *Agent-Based Models. Quantitative Applications in the Social Sciences*. Londres, SAGE Publications.
- Gilbert, Nigel y Klaus G. Troitzsch, (2005) *Simulación para las Ciencias Sociales*. Madrid, McGraw Hill.
- González Casanova, Pablo, (2005) *Las nuevas ciencias y las humanidades. De la academia a la política*. Barcelona, Anthropos.
- Gulati, Girish J.; Hadlock, Charles y Juliet Gainsborough, (2011) "VODYS: An Agent-Based Model for Exploring Campaign Dynamics" en *Social Science Computer Review*. Vol. 29, núm. 2, pp. 250-272. Londres, sage Publications.
- Gulden, Timothy, (2004) *Adaptive Agent Modeling In a Policy Context*. Maryland, University of Maryland, tesis de doctorado.
- Hassan Collado, Samer, (2009) *Towards a Data-driven Approach for Agent-Based Modelling: Simulating Spanish Postmodernisation*. Madrid, Universidad Complutense de Madrid, tesis de doctorado.
- Hassan, Samer; Arroyo, Javier; Galán, José Manuel; Antunes, Luis y Juan Pavón, (2013) "Asking the Oracle: Introducing Forecasting Principles into Agent-Based Modelling" en *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. Vol. 16, núm. 3, pp. 1-20. Surrey, Reino Unido, University of Surrey.
- Hayek, Friedrich A., (1964) "The Theory of Complex Phenomena" en Bunge, Mario (ed.), *The Critical Approach to Science and Philosophy. Essays in Honor of K. R. Popper*. Londres, MacMillan Publishing Co. Inc., pp. 332-349.
- Hedström, Peter y Peter Bearman, (2009) *The Oxford Handbook of Analytical Sociology*. Nueva York, Oxford University Press.
- Heymann, Daniel; Kawamura, Enrique; Perazzo, Roberto y Martín Zimmermann, (2009) "Modelos de Múltiples Agentes" en Chisari, Omar (ed.), *Progresos en economía computacional*. Buenos Aires, Temas Grupo Editorial, pp. 145-178.
- Izquierdo, Luis, (2012) *NetLogo 5.0 Quick guide*. Disponible en: <<http://www.luis.izqui.org/resources/NetLogo-5-0-QuickGuide.pdf>> [Consultado el 5 de abril de 2015].
- Izquierdo, Luis; Galán Ordax, José Manuel; Santos, José y Ricardo del Olmo Martínez, (2008) "Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas" en *EMPÍRIA. Revista de Metodología de Ciencias Sociales*. Vol. 16, pp. 85-112. Disponible en: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=297124024004>> [Consultado el 5 de abril de 2015].

- Johnson, Steven, (2001) *Sistemas emergentes. O qué tienen en común hormigas, neuronas, ciudades y software*. Madrid, Fondo de Cultura Económica.
- Koch, Andreas y Peter Mandl, (2011) *Modeling and Simulating Urban Processes*. Viena, Lit Verlag.
- Kollman, Ken y Scott E. Page, (2006) "Computational Methods and Models of Politics" en Tesfatsion, Leigh y Kenneth L. Judd (eds.), *Handbook of Computational Economics*, Vol. 2, pp. 1433-1463. Agent-Based Computational Economics. Amsterdam, Elsevier.
- Koyré, Alexandre, (1999) *Del mundo cerrado al universo infinito*. Madrid, Siglo XXI.
- Laver, Michael y Ernest Sergenti, (2011) *Party Competition: An Agent-Based Model*. Nueva Jersey, Princeton University Press.
- Le Page, Christophe; Becu, Nicolas; Bommel, Pierre y François Bousquet, (2012) "Participatory Agent-Based Simulation for Renewable Resource Management: The Role of the Cormas Simulation Platform to Nurture a Community of Practice" en *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. Vol. 15, núm. 1. Disponible en: <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/15/1/10.html>> [Consultado el 5 de abril de 2015]. Surrey, Reino Unido, University of Surrey.
- Lewin, Roger, (1995) *Complejidad. El caos como generador de orden*. Barcelona, España, Tusquets.
- Linares, Francisco, (2012) "Una simulación multi-agente del mecanismo de generalización de una norma social" en *Revista Española de Investigaciones Sociológicas*. Núm. 138, pp. 19-40. Madrid, Centro de Investigaciones Sociológicas.
- Lozares, Carlos, (2004) "La simulación social, ¿una nueva manera de investigar en ciencia social?" en *Papers*. núm. 72, pp. 165-188. Barcelona, Universidad Autónoma de Barcelona.
- Lustick, Ian S., (2000) "Agent-Based Modeling of Collective Identity: Testing Constructivist Theory" en *Journal of Artificial Societies and Social Simulations*. Vol. 3, núm. 1. Surrey, Reino Unido, University of Surrey.
- Macy, Michael y Andreas Flache, (2009) "Social Dynamics from the Bottom Up: Agent-Based Model of Social Interaction" en Hedström, Peter y Peter Bearman (eds.), *The Oxford Handbook of Analytical Sociology*. Nueva York, Oxford University Press, pp. 245-268.
- Marchi, Scott de y Scott E. Page, (2008) "Agent-based Modelling" en Box-Steffensmeier, Janet M.; Brady, Henry y David Collier (eds.), *The Oxford Handbook of Political Methodology*. Nueva York, Oxford University Press, pp. 71-94.
- Matus, Carlos, (1987) *Política, planificación y gobierno*. Washington D.C., Fundación ALTADIR.
- Miller, John H. y Scott E. Page, (2007) *Complex Adaptive Systems: An Introduction to Computational Models of Social Life*. Princeton, Princeton Studies in Complexity.
- Morin, Edgar, (1977) *El Método I. La naturaleza de la naturaleza*. Madrid, Cátedra.
- Morin, Edgar, (1990) *Introducción al pensamiento complejo*. Barcelona, Gedisa.

- Morin, Edgar, (2007) “Complexité restreinte et complexité générale” en Morin, Edgar y Jean-Louis Le Moigne (eds.), *Intelligence de la complexité: épistémologie et pragmatique, Colloque de Cerisy*, 2005. La Tour d'Aigues, Éditions de l'Aube, pp. 28-50.
- Muis, Jasper, (2010) “Simulating Political Stability and Change in the Netherlands (1998-2002): an Agent-Based Model of Party Competition with Media Effects Empirically Tested” en *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* Vol. 13, núm. 2, Disponible en: <<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/13/2/4.html>> [Consultado el 5 de abril de 2015]. Surrey, Reino Unido, University of Surrey.
- Müller, Jean-Pierre y Sigrid Aubert, (2011) *L'ontologie pour construire une représentation multi-niveau de et par les systèmes sociaux*. Ponencia presentada en las 18as. Jornadas de Rochebrune: Taller Interdisciplinario sobre sistemas complejos naturales y artificiales, 19-23 enero, Rochebrune, France.
- Naishtat, Francisco, (2009) “Refocalización historiográfica y cambio de régimen de historicidad. La controversia de la representación del pasado y las catástrofes históricas contemporáneas” en Nudler, Oscar, (ed.) *Espacios controversiales. Hacia un modelo de cambio filosófico y científico*. Buenos Aires, Miño y Dávila, pp. 51-84.
- Neumann, John Von, (1966) *Theory of Self-Reproducing Automata*. Urbana, Univeristy of Illinois Press.
- Ormerod, Paul y Bridget Rosewell, (2009) “Validation and Verification of Agent-Based Models in the Social Sciences” en Squazzoni, Flaminio (ed.), *Epistemological Aspects of Computer Simulation in the Social Sciences*. Berlín, Springer, pp. 130-140.
- Panebianco, Angelo, (1993) “Comparación y explicación” en Sartori, Giovanni y Leonardo Morlino (eds.), *La comparación en ciencias sociales*. Madrid, Alianza, pp. 81-104.
- Pasquino, Gianfranco, (2004) *Sistemas políticos comparados. Francia, Alemania, Gran Bretaña, Italia y Estados Unidos*. Buenos Aires, Prometeo.
- Phan, Denis y Franck Varenne, (2010) “Agent-Based Models and Simulations in Economics and Social Sciences: From Conceptual Exploration to Distinct Ways of Experimenting” en *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. Vol. 13, núm. 1, pp. 1-13. Surrey, Reino Unido, University of Surrey.
- Piaget, Jean, (1979) *Tratado de lógica y conocimiento científico. I. Naturaleza y métodos de la epistemología*. Buenos Aires, Paidós.
- Pierson, Paul, (2000) “Increasing Returns, Path Dependence, and the Study of Politics” en *American Political Science Review*. Vol. 94, núm. 2, pp. 251-267.
- Pierson, Paul y Theda Skocpol, (2002) “Historical Institutionalism in Contemporary Political Science” en Milner, Helen y Ira Katznelson (eds.), *Political Science: The State of the Discipline*. Nueva York, Norton,
- Popper, Karl, (1984) *La miseria del historicismo*. Madrid, Taurus.

- Rodríguez Zoya, Leonardo, (2011) *Exploraciones de la complejidad. Aproximación introductoria al pensamiento complejo y a la teoría de los sistemas complejos*. Buenos Aires, Universidad Nacional de Lomas de Zamora.
- Rodríguez Zoya, Leonardo y Pascal Roggero, (2014) “La modelización y simulación computacional como metodología de investigación social” en *Polis* [en línea]. Núm. 39, diciembre. Disponible en: <<http://polis.revues.org/10568>> [Consultado el 5 de abril de 2015].
- Roggero, Pascal y Christophe Sibertin-Blanc, (2008) “Quand des sociologues rencontrent des informaticiens : essai de formalisation des systèmes d’action concrets” en *Nouvelles Perspectives en Sciences Sociales*. Vol. 3, núm. 2, pp. 41-81.
- Salazar, Boris, (2007) “Thomas C. Schelling: la paradoja de un economista errante” en *Revista de Economía Institucional*. Vol. 9, núm. 17, pp. 131-152. Bogotá, Universidad Externado de Colombia
- Sawyer, Keith, (2005) *Social Emergence: Societies as Complex Systems*. Nueva York, Cambridge.
- Sawyer, Keith, (2007) “Simulating Complexity” en Outhwaite, William y Stephen Turner (eds.), *The SAGE Handbook of Social Science Methodology*, pp. 316-332. Londres, SAGE.
- Schelling, Thomas, (1969) “Models of Segregation” en *American Economic Review, Papers and Proceedings*. Vol. 59, núm. 2, pp. 488-493. Pittsburgh, American Economic Association.
- Schelling, Thomas, (1971) “Dynamic Models of Segregation” en *Journal of Mathematical Sociology*. Vol. 1, pp. 143-186. Londres, Routledge.
- Schelling, Thomas, (1978) *Micromotives and Macrobehavior*. Nueva York, Norton.
- Sibertin-Blanc, Christophe; Roggero, Pascal; Adreit, Françoise; Baldet, Bertrand; Chapron, Paul; El-Gemayel, Joseph; Mailliard, Matthias y Sandra Sandri, (2013) “SocLab: A Framework for the Modeling, Simulation and Analysis of Power in Social Organizations” en *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. Vol. 16, núm. 4, pp. 1-8. Surrey, Reino Unido, University of Surrey.
- Simon, Herbert, (1973) *Las ciencias de lo artificial*. Barcelona, A.T.E.
- Simon, Herbert, (1982) *Models of Bounded Rationality*. Cambridge, MIT Press.
- Squazzoni, Flaminio, (2012) *Agent-Based Computational Sociology*. Singapur, Wiley.
- Thelen, Kathleen, (1999) “Historical Institutionalism in Comparative Politics” en *Annual Review of Political Science*. Vol. 2, pp. 369-404.
- Treuil, Jean-Pierre; Drogoul, Alexis y Jean-Daniel Zucker, (2008) *Modélisation et simulation à base d’agents*. París, Dunod.
- Varsavsky, Oscar, (1971) *Proyectos nacionales. Planteo y estudios de viabilidad*. Buenos Aires, Ediciones Periferia.
- Varsavsky, Oscar; Calcagno, Alfredo Eric; Ibarra, José; de Barbieri, Juan; Naon, Eduardo; Núñez del Prado, Arturo; Sáinz, Pedro; La Fuente, Mario; Bianciotto, José; Leal, Luis; Marzulli, Luis; Leiva, David; Pérez, Juan; Yero, Lourdes; Domingo, Carlos; Sabato, Jorge;

- Cornblit, Oscar; Di Tella, Torcuato y Ezequiel Gallo, (1971) *América Latina. Modelos Matemáticos*. Santiago de Chile, Editorial Universitaria.
- Von Neumann, John, (1966) *Theory of Self-Reproducing Automata*. Londres, University of Illinois Press.
- Waldherr, Annie y Nanda Wijermans, (2013) “Communicating Social Simulation Models to Sceptical Minds” en *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. Vol. 16, núm. 4, pp. 1-8. Surrey, Reino Unido, University of Surrey.
- Wallerstein, Immanuel, (2006) *Análisis de sistemas-mundo. Una introducción*. México, Siglo XXI.
- Weaver, Warren, (1948) “Science and Complexity” en *American Scientist*. Núm. 36, pp. 536-544.
- White, Andrew M. (2005). *Multi-Agent Simulation for Migration Studies in Archaeology*. Ponencia presentada en las 38as reuniones anuales de la Asociación Arqueológica Canadiense, Nanaimo.
- Wilensky, Ulrich, (1997) *NetLogo Segregation model*. Northwestern University, Evanston, IL, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. Disponible en: <<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Segregation>> [Consultado el 5 de abril de 2015].
- Wilensky, Ulrich, (1999) *NetLogo*. Northwestern University, Evanston, IL., Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. Disponible en: <<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>> [Consultado el 5 de abril de 2015].
- Wilensky, Ulrich, (2013) *NetLogo User Manual. Versión 5.0.5*. Evanston, Illinois, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University.