

Fecha de recepción: diciembre 2023

Fecha de aceptación: enero 2024

Versión final: febrero 2024

Modelación basada en agentes autónomos: artefactos para pensar a la realidad

Adolfo Benito Narváez Tijerina ⁽¹⁾

Resumen: Las simulaciones computacionales a través de Modelos Basados en Agentes Autónomos (ABM) resultan ser eficaces para probar cómo se puede diseminar una forma de concebir el ambiente entre una población. La extensión de un hábito que pudiera tener un impacto decisivo en la formación de una manera de interpretar el ambiente, puede ser dependiente de una cierta masa crítica de personas que lo ejecutan y a través de esa ejecución lo elevan convirtiéndolo en una ejecución de un nivel superior (por su abstracción creciente y mayor jerarquía en cuanto a su capacidad para coordinar). De esta manera se podría explicar la forma en que la concepción de la forma del ambiente habitado se extiende en el grupo que es coordinado por el nivel superior. Este trabajo aborda los resultados de una simulación computacional usando ABM para emular la diseminación de la información entre los agentes autónomos de un ambiente computacional dado. Se hacen reflexiones sobre lo que podría implicar la coordinación y control que se hace visible al operar el simulador aún y cuando algunos de los agentes autónomos no han sido “infectados” por la información que se disemina en el sistema.

Palabras clave: Modelos Basados en Agentes Autónomos (ABM) - imaginarios urbanos - complejidad - metaagente

[Resúmenes en inglés y portugués en las páginas 32-33]

⁽¹⁾ **Adolfo Benito Narváez Tijerina.** Arquitecto y Maestro en Diseño Arquitectónico por la UANL, Doctor en Arquitectura por la UNAM, Profesor Titular C de la UANL, Investigador Nacional nivel 3 del SNI-CONAHCYT, Doctor Honoris Causa por OIICE.

En memoria de Adrián Mireles Brito

Introducción. De los autómatas celulares a los Modelos Basados en Agentes Autónomos

Los Modelos Basados en Agentes Autónomos (ABM) se remontan a la década de 1940, cuando John von Neumann (1966) y Stanislaw Ulam (1983) desarrollaron los autómatas celulares para explorar la posibilidad de la autorreproducción en las máquinas. Este concepto fue posteriormente adoptado por la biología y la arquitectura computacional, para después pasar a formar parte de un campo multidisciplinario que se conoce como “arte generativo” en el que artistas se han enfocado en desarrollar junto con ingenieros y científicos computacionales, artefactos que produzcan respuestas autónomas con respecto a las decisiones humanas para la generación de formas en diferentes medios (Soddu y Collabella, 2020), incluyendo, por supuesto al diseño de la arquitectura y los ambientes urbanos.

Los autómatas celulares representan modelos idealizados de sistemas complejos que han sido utilizados para observar el surgimiento de patrones espontáneos de orden; a la vez, a través de estos artefactos computacionales es que se han desarrollado las tecnologías pioneras para que el diseño arquitectónico sea posible de ser realizado mediante Inteligencia Artificial; este trabajo, lejos de explorar en este último fin, se concentra en el poder de modelación que permiten los ABM, pues resultan ser buenos artefactos para visualizar los comportamientos de grandes grupos de agentes actuando en un ambiente, algo muy parecido a lo que hacemos los seres humanos cuando nos enfrentamos a los diversos escenarios y problemas que nos presentan las ciudades.

Los ABM son simulaciones computacionales dinámicas de sistemas que se construyen a partir de la interacción entre distintos agentes del sistema. En iteraciones sucesivas en el tiempo, estos agentes interactúan entre sí, con el entorno o en un conjunto de combinaciones posibles entre estos dos grandes subsistemas, que desagregados constituyen un modelo de una alta complejidad que puede llegar a ser muy rico y variado en cuanto a sus componentes y relaciones, pero que para funcionar, los ABM realizan esas interacciones siguiendo reglas simples de comportamiento. El modelo debe de ser capaz de que cada agente pueda adaptar su comportamiento con respecto a los cambios del ambiente en el que se encuentra y también con respecto a otros agentes según las nuevas circunstancias en cada iteración, es decir, que actuando en un nivel muy simple, cada agente está afectando y siendo afectado por el conjunto del sistema permanentemente.

Para entender desde sus componentes más simples al ABM, debemos concebir que un agente se caracteriza como una entidad autónoma y heterogénea, con su propia identidad y separada de los demás agentes. Poseen la capacidad de interactuar con otros agentes y con el entorno, así como de aprender y recordar para adaptarse a las condiciones cambiantes en cada iteración.

Un ABM es diferente de un autómata celular justamente porque los Autómatas Celulares (AC) están compuestos por una red de componentes simples. Cada componente, que se considera como una célula, se conecta con sus vecinos más cercanos para formar la red.

Cada célula del sistema solo tiene comunicación con una fracción de todos los componentes, lo que implica una información limitada del sistema en su totalidad. Además, no hay un control centralizado; ninguna célula ejerce control sobre otra. A medida que los AC evolucionan en el entorno computacional, pueden desarrollar estructuras dinámicas muy complejas a partir de reglas extremadamente simples. Los AC poseen la capacidad de procesar información y pueden evolucionar hacia algoritmos genéticos.

En cambio los ABM son simulaciones dinámicas computacionales de sistemas que se desarrollan a través de la interacción entre diversos agentes que conforman el sistema. Estas interacciones ocurren en iteraciones sucesivas a lo largo del tiempo, donde los agentes interactúan entre sí y/o con el entorno, siguiendo reglas simples de comportamiento. Además, estos agentes tienen la capacidad de modificar su propio comportamiento y el de otros agentes del sistema en función de las nuevas circunstancias que se presentan en cada iteración. Cada agente se define como una entidad autónoma y heterogénea, que existe de manera aislada de los demás agentes y posee su propia identidad distintiva.

Estos agentes tienen a su vez una “libertad de acción” mayor que las células para relacionarse con otros agentes o con el entorno. Exhiben capacidad de aprender y recordar, lo que les lleva a adaptarse a las nuevas condiciones que surgen en estado sucesivo del sistema; como modelos para el estudio de sociedades complejas son quizás los ABM mejores y más poderosos que los AC debido a la incorporación de características intrínsecas para una toma de decisiones autónoma, lo que les confiere algo que puede ser equiparado a la capacidad de agencia, diferente de la simple y mecánica operación de los AC; la emergencia de patrones de autoorganización en los ABM suele presentarse en conjuntos comparativamente menores de componentes que en los AC, lo que es en sí una ventaja a la hora de correr estos programas por la enorme demanda de capacidad de cómputo que reclaman.

Metodología. ABM Elkin World como un laboratorio para el análisis de la complejidad

Desarrollamos un ABM desde mediados de la década pasada con el fin de contar con un laboratorio *in silico* que nos permitiera observar diversos fenómenos en los que una población agregada actuando en un ambiente, fuera uno de los componentes más relevantes para explicar la dinámica de un fenómeno y su forma, así como para poder observar la emergencia de patrones espontáneos de organización dinámica en sistemas complejos (Narváez Tijerina, Mireles Brito y Cruz Camino, 2016). Como en ese tiempo trabajábamos con el problema de la diseminación de la información cifrada en un objeto icónico presente en un entorno social dado, decidimos que cabría concebir a la adquisición de la información como una “lectura por contacto” donde cada agente captaba información relevante del objeto icónico a través de llevar a cabo un acercamiento y coincidir en la localización del borde de dicho objeto, lo que en sí agregaba una característica nueva al agente que nosotros decidimos que se visualizara como un cambio de color y que implicaba la adquisición de información de primer orden; para luego seguir deambulando por el espacio libremente y transmitir esa cualidad a otros agentes, lo que nosotros decidimos

confiriera un color diferente a los agentes “tocados” por el agente que había tocado el objeto icónico y que calificamos como agentes en posesión de información de segundo orden. Llamamos Elkin World a nuestro modelo en honor al destacado antropólogo australiano Adolphus Peter Elkin, pionero en la investigación del significado simbólico de los objetos rituales utilizados por las tribus aborígenes nómadas de Australia y su capacidad para influir en los comportamientos sociales; el ABM que desarrollamos nos permitió abordar las interacciones de las sociedades urbanas con objetos icónicos y los posibles patrones de comportamiento que podrían surgir en caso de cambios en las condiciones urbanas.

Nuestra propuesta se enfocó en explorar fenómenos que involucren la influencia de lo imaginario en la formación de patrones en el mundo físico, entendiendo que lo imaginario sería aquella información compartida socialmente (de alguna forma) que cohesiona a los comportamientos y los guía, haciendo posible la emergencia de patrones de comportamiento social altamente coherentes. La percepción, la imaginación, la intención, el cambio en las conductas sociales, la modificación de normas sociales y la identidad son áreas en las que Elkin World puede ser una herramienta de investigación útil. Además, con esta herramienta es posible desarrollar modelos en los que la espacialidad y el territorio condicionen el comportamiento del sistema; estas necesidades e intereses se convirtieron en aspectos fundamentales para el diseño de Elkin World.

El modelo representa una idealización de cómo un objeto icónico para una determinada sociedad genera comportamientos colectivos en una población heterogénea, y cómo la información sobre dicho objeto crea patrones socioespaciales en el territorio. Se estableció que el concepto de “interés” podría ser interpretado en Elkin World como la voluntad, el deseo o el anhelo de los agentes por entrar en contacto con el objeto icónico, se trata de una cualidad que es inherente a los agentes, que no depende del lugar en el que se encuentren. En cambio, el efecto de la proximidad a dicho objeto puede llegar a modificar el interés de los agentes hacia él, lo que a su vez denominamos “atracción”, es decir una cualidad que no depende por entero del agente, sino del medio, la “atracción”, así, la definimos como una cualidad geográficamente relevante.

El diseño del territorio de Elkin World se orientó de manera que las condiciones ambientales aumentarían la “atracción” del objeto icónico para cada agente de manera proporcional a su proximidad; lo que implica que cuanto más cerca esté un agente del objeto, mayor será la atracción ejercida sobre él, mientras que al alejarse, la atracción disminuirá. Dado que se trata de un sistema dinámico en el que los agentes pueden moverse aleatoriamente por el espacio, esta característica del territorio modifica el interés de los agentes en interactuar con el objeto icónico. Los agentes se desplazan de acuerdo con la relación matemática dinámica entre las variables de “interés” y “atracción” en cada momento del desarrollo del sistema, lo que motiva su movimiento y despliega patrones en el espacio que llegan a facilitar o a impedir el flujo de la información en el conjunto social.

El motivo del movimiento de los agentes está determinado por la relación matemática entre el “interés” y la “atracción” con respecto al objeto icónico. Cuando los agentes entran en contacto con el objeto icónico, se produce un cambio cualitativo en ellos que interpretamos como una transferencia de información desde el objeto icónico hacia los agentes (aprendizaje). Como apuntábamos, esto se refleja en la representación visual mediante

un cambio de color en los agentes. En las primeras versiones de Elkin World, esta característica permanecería constante para cada agente a lo largo de todas las iteraciones. En versiones posteriores, hemos considerado la posibilidad de programar rangos variables de olvido en los agentes que vayan haciendo desaparecer el color, volviéndolos a su estado (color) original.

En Elkin World se incorporó el concepto de “contagio”, que implica que si un agente ha visitado previamente el objeto icónico (es decir, tiene información de primer orden sobre él incorporada), puede contagiar a otros agentes (transmisión de información de segundo orden) y aumentar su “interés” en dicho objeto. Los agentes contagiados pueden a su vez contagiar a otros agentes al encontrarse en el entorno de manera aleatoria, elevando así el nivel de interés sobre el objeto.

El modelo ofrece la capacidad de simular diversas interacciones entre las variables, incluyendo la cantidad de población, el nivel de interés y los niveles de atracción, así como la ponderación entre ellas, con el fin de analizar los diferentes comportamientos colectivos del sistema a lo largo del tiempo. La relación entre el interés y la atracción puede ser ajustada mediante una barra deslizadora, lo que permite recrear escenarios donde el interés tenga un mayor peso que la atracción, estableciendo rangos decimales para obtener una unidad de medida.

Para determinar el movimiento de cada agente, se formuló una proposición booleana que posteriormente se tradujo a líneas de código. Esta proposición es:

$$SSI \leftrightarrow IA \geq CI = MV$$

Si y solo si la relación entre el interés y la atracción es igual o mayor que su condición inicial, el agente se moverá el número de cuadros (patches) determinado por esta proposición.

Esta relación se evalúa para cada agente y se recalcula en la siguiente iteración, dado que cada agente habrá cambiado su posición desde la iteración anterior.

Una vez que un agente alcanza el objeto, este cambia de color (a verde) y comienza a contagiar a otros agentes cada vez que se encuentra aleatoriamente con uno no contagiado. Este encuentro incrementa en cinco unidades el interés del agente contagiado. El modelo continúa este proceso hasta que todos los agentes hayan entrado en contacto con el objeto. En este punto, el modelo se detiene, lo que permite contar el número de iteraciones, es decir, el tiempo de desarrollo del sistema, necesario para que ocurra este proceso con el balance inicial del sistema. Cada ajuste en las variables implica la posibilidad de llevar a cabo una nueva observación en nuestro laboratorio virtual (Figura 1).

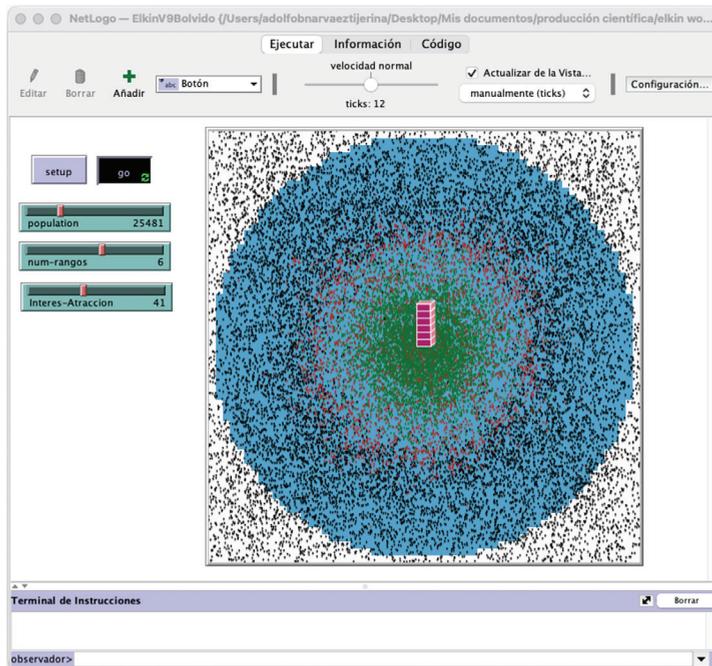


Figura 1. Elkin World durante las iteraciones iniciales corriendo en NetLogo 6.4.0. Fuente: captura de pantalla.

Puede experimentarse libremente con nuestro ABM, invitamos al lector que lo haga, en Narváez, Mireles y Cruz (2016) se publicó el código fuente de nuestro modelo que puede correr en NetLogo, prácticamente se trata de copiar el código que se encuentra en el apéndice del artículo y seguir las instrucciones que se detallan en el cuerpo del artículo referido.

Análisis de resultados. Experiencias *in silico*, evolución, masa crítica y transición de fase

Una proyección teórica sobre la disposición espacial que podríamos encontrar nos llevaba a prever un aumento concéntrico en la población de agentes verdes (con información de primer orden), que históricamente estaría vinculado a su proximidad al objeto icónico. A medida que avanzara la simulación, se esperaba que la población de agentes morados (poseyendo información de segundo orden) aumentara siguiendo un patrón

similar, rodeando a los verdes. Dado que los movimientos de los agentes y su interés por la información son aleatorios, esta dispersión proyectada surgiría como una tendencia estadística, especialmente evidente a medida que la población en el simulador creciera. Lo que se manifestó como un comportamiento imprevisto en el sistema fue la aparición de un orden geométrico que comenzó a regular el proceso de adquisición, notablemente distinto de la distribución teórica anticipada. Inicialmente, observamos una organización difusa en forma de cruz que rápidamente atrajo a una mayor densidad de agentes hacia su centro. Esta forma, surgida en un entorno de valores de atracción creciente en un patrón concéntrico con respecto al objeto central, que estaba presente como una condición inicial programada en el ABM, no parecía haber surgido como resultado de las condiciones ambientales previas. Más bien, actuaba como un mecanismo regulador del flujo de agentes, orientándolos hacia el objeto central o en otras direcciones. La figura 2 ilustra esta aparición en el ABM.

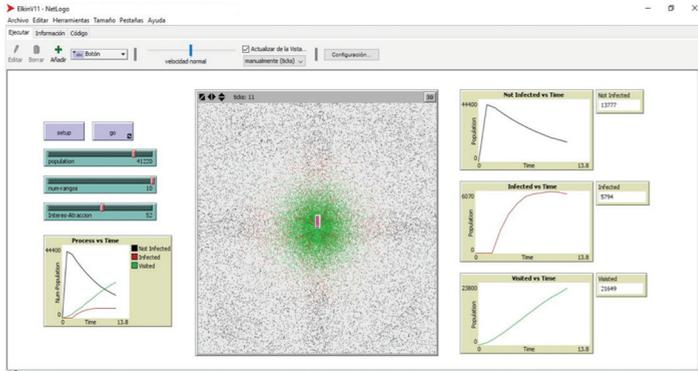


Figura 2. Emergencia de una organización con morfología reconocible y estadísticamente lejana a la aleatoriedad en el proceso de adquisición y transmisión de información entre agentes en Elkin World con una población de 41220 agentes; como puede apreciarse en los gráficos de análisis ya se había alcanzado el punto de clausura del sistema (el cambio abrupto de dirección de la línea). Fuente: captura de pantalla.

Inicialmente, se ejecutó el ABM, ahora transformado en lo que se denominó “Modelo Geográficamente Relevante” (GRM) con una población baja y ponderando diferentes variables. A medida que se incrementaba la población, emergían ciertos patrones de configuración socioespacial. Conforme la población aumentaba, estos patrones se volvían más evidentes, dando lugar a formas reconocibles que surgían espontáneamente a medida que una masa crítica de agentes interactuaba en el espacio. Se observó que en ciertos balances de variables, una masa crítica de agentes era necesaria para que emergieran organizaciones reconocibles. Cuando esta masa crítica no se alcanzaba, no surgían tales formas, y el

modelo mostraba una evolución con formas dispersas y crecientes en patrones regulares concéntricos.

Esta forma emergente, que parecía regular el proceso de adquisición y transmisión de información en el sistema, no parecía depender de la calibración inicial del ABM. Para descartar la posibilidad de una percepción errónea, realizamos análisis estadísticos de la distribución, los cuales revelaron una desviación no aleatoria en el ABM, indicando así la presencia de una forma emergente genuina. Era plausible que esta aparición estuviera vinculada tanto a la densidad de agentes en el entorno como a las condiciones iniciales del mismo, como suele ser el caso en otros sistemas. Por lo tanto, decidimos explorar diferentes combinaciones de variables en el ABM, así como diversos rangos de población (ver Figura 3). Resultó evidente que existía un umbral mínimo de población para que la forma fuera discernible en la pantalla del simulador computacional. Sin embargo, esto no implicaba necesariamente que no hubiera una coordinación similar, aunque invisible, actuando sobre los agentes individuales incluso antes de la aparición de la forma. Este aspecto sería posteriormente revelado mediante el análisis del comportamiento estadístico del sistema.

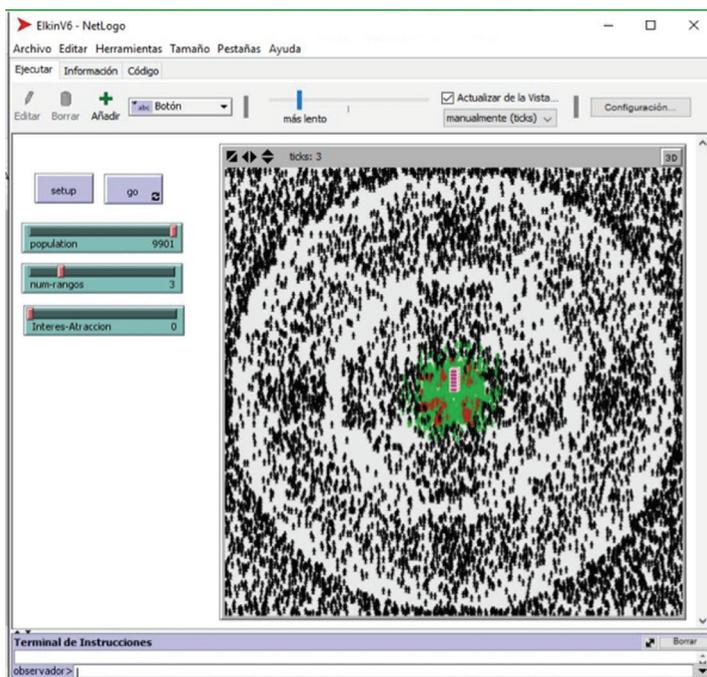


Figura 3. Emergencia de la organización en el proceso de adquisición y transmisión de información entre agentes en el ABM con una población de 9901. Fuente: captura de pantalla.

El surgimiento de esta estructura espontánea en el ABM resultó ser intrigante. En la Figura 3, se destaca aún más que en la Figura 2, posiblemente debido a los contrastes distintivos entre las figuras y el fondo generados por las variaciones de densidad poblacional en el simulador. Se puede observar una estructura cruciforme que se superpone a una serie de círculos concéntricos, algunos ocupados por agentes en movimiento y otros relativamente vacíos. Este surgimiento parece no estar asociado con la dispersión de la información de primer y segundo orden entre los agentes. Es notable que no parece surgir de este proceso de “infección”, sino que es un resultado previo a una dispersión generalizada de la información. La forma emerge como delimitada por agentes que aún no han sido infectados, lo que se evidencia porque solo hay agentes de color negro entre ellos, y sólo cerca del objeto con información hay agentes que ya están coloreados. Sin embargo, estos forman un núcleo pequeño en comparación con la masa total de agentes, y es precisamente en este punto donde se observa la distribución radio-concéntrica uniforme que se anticipaba inicialmente.

Este fenómeno nos llevó a reflexionar sobre cómo una masa crítica de agentes que ha adquirido información del objeto y ha comenzado a dispersarse en el entorno parece provocar una reacción en todo el sistema, generando una forma que contribuye a la coordinación y regulación. Es decir, ha surgido una metaentidad que se superpone a las individualidades, coordinando el flujo de información, reduciendo la dispersión de los comportamientos y otorgando una mayor durabilidad y orden a la dinámica del sistema. Con la aparición de esta forma, se han establecido condiciones de desequilibrio que parecen retrasar el tiempo que lleva al sistema a un estado de equilibrio.

A pesar del desorden inicial, surgió un orden aparentemente espontáneo como resultado de la dinámica entre los agentes a lo largo del tiempo. De este desorden surgió una estructura definida, formando círculos concéntricos y otras formas geométricas reconocibles, manifestándose desde lo improbable hacia lo probable.

Análisis estadísticos adicionales realizados en el laboratorio por Mireles Brito (2018) revelaron que la restricción progresiva de la dispersión de los datos, evidenciada por el surgimiento espontáneo de reglas no programadas como condiciones iniciales del ABM, estaba vinculada a un punto crítico. Tras la emergencia de la coordinación y regulación en el sistema (lo que calificamos como una metaentidad que se encontraría “más allá” de los agentes), el sistema tendía a organizarse de manera cada vez más regular, limitando efectivamente las posibles acciones de los agentes y confinando su gama de comportamientos a un conjunto reducido. Este fenómeno era análogo al colapso de la función de onda que ocurre después de la medición de sistemas microscópicos altamente estocásticos.

Este momento crítico conducía inevitablemente al sistema hacia el orden de manera irreversible. El tiempo en el que se alcanzaba este punto de irreversibilidad, coincidente con la emergencia del control y la regulación, también este momento estaba estrechamente relacionado con el número de agentes en el sistema. A mayor número de agentes, menor era el tiempo requerido para que emergiera una coordinación y control efectivos y restrictivos de la forma. Sin embargo, esta relación era más precisa cuando existían más restricciones en el entorno como condiciones iniciales del ABM, como se ilustra en la Figura 4. Esto se asoció con una disminución en la desviación estándar del promedio de los movimientos de los agentes en el sistema a medida que aumentaba la población, como se muestra en la Figura 5.

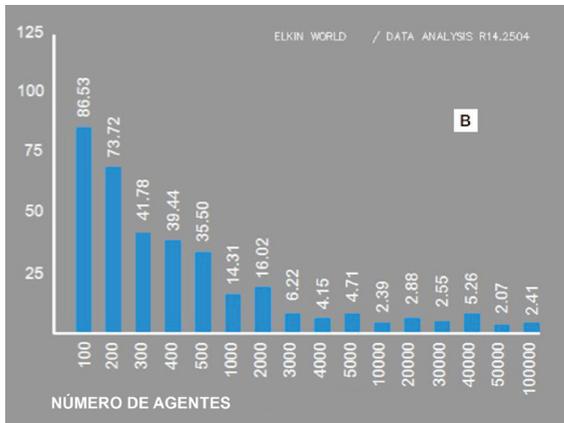
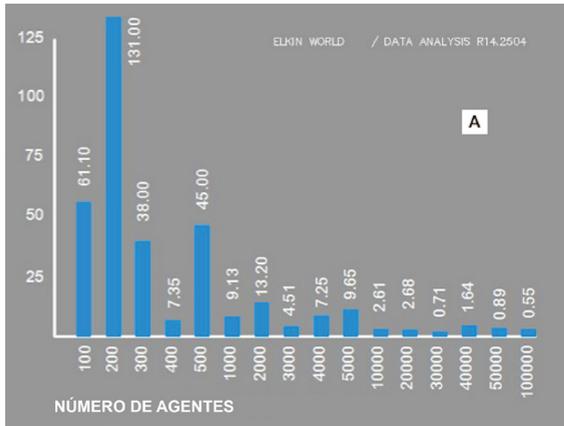


Figura 4. Tiempo total para que el ABM alcanzara el equilibrio en relación con el número de agentes en el sistema: con condiciones iguales de interés y atracción (A) y con mayores restricciones del ambiente hacia los agentes (B). Fuente: Mireles Brito (2018).



Figura 5. Desviación estándar de los datos de acuerdo al número de agentes en el ABM. Fuente: Mireles Brito (2018).

En el momento de la irreversibilidad, la coordinación y regulación aún no es perceptible, pero este momento marca el inicio de su existencia y transforma el comportamiento del sistema, dirigiéndolo hacia un desarrollo decididamente determinista.

Típicamente, el desarrollo de la simulación se puede resumir como un sistema que comienza con un funcionamiento altamente estocástico, alcanzando un punto de irreversibilidad que limita la aleatoriedad del sistema, lo que permite que surja espontáneamente la forma a través de la cual se empieza a expresar coordinación y regulación en el ABM. A partir de ese momento, la historia del sistema queda definida por las condiciones establecidas en ese momento de cambio crítico o de transición de fase. El sistema experimenta una desaceleración en su evolución, como si la aparición de la coordinación y el control estuvieran destinados a retrasar la llegada del equilibrio; hasta que inevitablemente este llega. Desde ese punto, toda evolución se detiene, cualquier estructura fuera de la aleatoriedad deja de ser visible y lo único que queda es un espacio lleno de agentes de un color uniforme moviéndose estocásticamente. Esto se asemeja a cómo se ve la nieve cuando cae en invierno y es movida por un viento suave. En este momento, el sistema alcanza una entropía máxima, aparentemente irreversible.

El surgimiento de la coordinación y el control cuando el sistema ha cruzado por la transición de fase parece imponer al ABM una dirección específica, limitando sus posibilidades de desarrollo. Aunque los agentes están programados para moverse aleatoriamente, esta forma emergente restringe esa aleatoriedad al coordinar a un gran número de agentes, creando “canales” para su movimiento y restringiendo otros. En cierto sentido, la coordinación y el control actuarían como si una metaentidad existiera más allá de los agentes; parece tomar decisiones en lugar de los agentes, como si fuera una mente colectiva dirigiéndose hacia un objetivo específico y utilizando a los agentes mismos como si fueran extensiones de su propio cuerpo en el espacio.

Discusión. Implicaciones de las observaciones *in silico*

En Elkin World, la mayor actividad observada en las etapas iniciales de desarrollo de cada modelación se concentra en la zona central, lo que ha dado lugar a reflexiones interesantes: es desde esta región donde surgen patrones que estimulan al desorden en las zonas exteriores, con más ruido, a unirse al proceso, fortaleciendo en cada iteración la estructura central del sistema. Esto implica un cierto determinismo sobre la estocacidad que predomina como condición inicial del modelo. A pesar de ser un sistema dinámico cerrado, las zonas exteriores con mayor ruido no permanecen en un comportamiento estocástico, sino que tienden hacia una dinámica determinista, a pesar de conservar un comportamiento aleatorio. Esto sustenta desde el exterior la formación de estructuras estables y rígidas formalmente hablando, en el centro del sistema.

Como se ha demostrado, la adición de masa en el sistema, o sea, acercarnos al horizonte crítico de la autoorganización (Bak, 1996), alimentó la formación de patrones y estructuras centrales, inhibiendo la posibilidad de que se originen estructuras autónomas en las zonas exteriores. Las estructuras emergen en el punto del acontecimiento, la fuente inicial

de información, y al sobrepasar el punto crítico, impiden la formación de otras conformaciones y patrones en el exterior del sistema, o sea, otros comportamientos, lo que podría ser comparado con el surgimiento de imaginarios hegemónicos, estructuras mentales compartidas por la sociedad que contribuirían a crear tal compacidad. Los imaginarios se originan en la zona primaria de información y se desplazan a través del sistema, lo que evidencia que bajo ciertas condiciones iniciales, el sistema durante su desarrollo entra en una especie de “determinismo” que reduce la aleatoriedad.

La masa crítica juega un papel fundamental en el devenir de este proceso, imponiendo una idea por encima de otras posibles emergencias, absorbiendo la energía del sistema entero para apuntalar la construcción del esquema hegemónico y central. Tal “absorción de energía” en sí lo que está provocando es retrasar la muerte por equilibrio del sistema, según observamos, la llegada de la transición de fase es equivalente a la creación de unos canales específicos que controlan, regulan y coordinan al sistema, justamente por la forma que emerge, y tras esta emergencia, el sistema experimenta un aquietamiento en cuanto a la posibilidad de la llegada del equilibrio; más aún, la forma, lejos de actuar como un canal que garantice el flujo efectivo de información entre el sistema y su exterioridad, actuaría como una barrera que obstaculiza al flujo, permitiendo la conservación de un *statu quo*.

Durante el proceso de experimentación, se observó una amplia gama de estructuras y patrones de comportamiento de los agentes en torno al objeto icónico, que emergieron de la interacción de los agentes en el espacio-tiempo del ABM. Al experimentar con diversos balances de las variables, se evidenció la aparición de macroestructuras, reconocibles como formas geométricas familiares, que inicialmente supusimos que surgieron desde abajo hacia arriba (*bottom-up*), a partir de las simples reglas del sistema. Estos patrones no carecen de sentido; corresponden a una lógica conductual colectiva que revela el surgimiento de una coherencia y coordinación que perdura en el tiempo y no depende de los agentes de manera individual, sino de sus acciones colectivas.

Este puede ser un camino para empezar a comprender la morfogénesis de las formas urbanas como dependientes de procesos de comunicación social que emergen de los micro-comportamientos colectivos y que revelan lo implicada que estaría la comprensión del ambiente en su evolución, de manera que es visible cómo lo imaginario (la información que yace en los elementos del ambiente y en las mentalidades de los habitantes) se infiltra en la construcción de las formas concretas.

La aparición de estructuras cruciformes durante las simulaciones nos llevó a revisar las reglas de programación que guiaron los estados iniciales del sistema. Nos dimos cuenta de que, a pesar de seguir las mismas reglas, las formas emergían sólo cuando se cruzaba un umbral de densidad de agentes en el espacio finito. Esto nos indicó la relación entre el comportamiento social, la emergencia de configuraciones y la cantidad de agentes por unidad de superficie necesarios para que este fenómeno se hiciera visible. Observamos que las reglas de la versión 4 de Elkin World, especialmente, motivaron la emergencia de esa configuración en condiciones específicas. Al revisar los parámetros iniciales del movimiento de los agentes, notamos una pauta en el movimiento que se asemejaba a situaciones sociales donde hay una importante coordinación de grandes masas de sujetos que realizan un movimiento ritual rítmico, como en muchas ceremonias religiosas.

A pesar de que un cierto movimiento ritual aprendido para una ceremonia implica la similitud en los movimientos de los agentes, solo una pauta de tiempo repetitivo podría coordinar el movimiento en una coreografía que podríamos reconocer como una configuración en el espacio. Probamos que esto fue una función de la densidad de agentes. Podemos especular que la exhibición de la coordinación en el movimiento fue una emergencia que se dio independientemente de las reglas de programación iniciales y que surgió como efecto de la adaptación espontánea de los agentes a través de un nivel más alto (que se encuentra más allá de los agentes) al que pudiéramos caracterizar como “metaagente” y que sólo se haría visible a través de ciertos comportamientos colectivos que darían lugar a formas estadísticamente alejadas de lo aleatorio.

El metaagente sería restrictivo, sería algo que regula, coordina y controla al sistema (que es en sí el cuerpo que lo constituye como una unidad diferente del entorno y de los agentes) y que asumiría esas tareas por autoconservación. Un metaagente, en un cierto sentido poético, se parecería a cualquier ser viviente luchando por su supervivencia. Eso nos hace cuestionarnos sobre si la autoorganización pudiera ser a cualquier nivel, aún aquella que existe en un ambiente computacional, equiparable a la vida misma; si la vida no será un proceso verdaderamente universal, dependiente de la complejidad o uno de sus resultados ineludibles, o aún más allá, si no será una regla general de lo real el constante surgimiento y la conservación de la vida, nos hace cuestionarnos sobre si nuestro universo –complejísimo y experimentando un cambio permanente– no será en sí mismo un inconmensurable objeto viviente.

Otra interrogante que ha surgido de estos experimentos tiene que ver con la capacidad de lo imaginario para regular, coordinar y controlar las conductas, y cómo esta regulación y coordinación puede devenir en formas que con el tiempo van dando lugar a marcas permanentes en los entornos; es atrayente también la idea de que los metaagentes que hemos advertido como posibilidad teórica, realmente comparten propiedades con lo imaginario más allá de lo que pudiéramos considerar como surgido de algo fortuito, por lo que es atrayente la idea de que lo imaginario pudiese ser un fenómeno asociado a la complejidad, en donde el rebasar ciertas masas críticas de agentes ejecutando comportamientos dirigidos a un cierto fin o cuando cierta masa de agentes comparten una información semejante o enraizada en principios comunes, emergería una forma que guiaría a las conductas posteriores. Podríamos especular que tal propiedad del sistema (lo imaginario) pudiera ser mucho más durable que los agentes e inclusive que los artefactos y otras producciones u objetos que la sociedad haya generado como respuesta a ese factor común que los une. Cabe otra especulación aquí, cuando podemos llegar a considerar a lo imaginario como algo que pudiera llegar a “descender” sobre el sistema, es decir que no surgiría, sino que pudiera llegar a ser un principio trascendente al sistema en sí que “tomaría posesión” del sistema para corporeizarse. Cualquiera de estas dos posibilidades, situadas en posiciones diametralmente opuestas según el marco epistémico que uno adopte como aquel que explique la naturaleza de lo real, pueden apreciarse como irreductibles, justamente porque no contamos con un sistema que abarque a los metaagentes y desde esta perspectiva superior pueda ayudar a entender su naturaleza (Hofstadter, 1970, 2007), no obstante, es importante al menos reflexionar sobre esto de cara al hecho de que hay elementos de prueba –y artefactos– que nos pueden llevar sobre la pista de estos fenómenos.

Conclusiones

Las simulaciones computacionales que podemos llevar a cabo con los ABM resultan eficaces para modelar algunos aspectos sobre el hábitat que luego se convierten en buenas imágenes para pensar en la naturaleza de lo real y de lo imaginario; a través de estas modelaciones se vuelve evidente que los sistemas complejos exhiben propiedades que suponen ser algo más que la simple suma de las propiedades de sus componentes.

La extensión de un hábito que pudiera tener un impacto decisivo en la formación de una manera de interpretar el ambiente, puede depender de una cierta masa crítica de personas que lo ejecutan y a través de esa ejecución lo elevan, convirtiéndolo en “algo” que se encuentra más allá de los actores sociales, sus pautas de comportamiento y comunicativas y del ambiente en donde todo el drama se desarrolla.

Ese “algo” puede ser interpretado como una propiedad emergente o como un nuevo agente que se encontraría situado más allá del ámbito en el que se desarrollan las acciones del grupo (como si se tratara de un “metaagente”), que se extiende coordinadamente en el grupo a pesar de que haya miembros de la sociedad que pudieran no haber desarrollado aún las pautas que la pequeña masa crítica de agentes ha adoptado merced a dirigir sus acciones hacia un objetivo común.

Ha sido evidente tras los análisis estadísticos que hemos realizado en modelaciones con diversas densidades de población en el espacio computacional de nuestro ABM, que hay un punto crítico en el que se alcanza cierta masa de agentes “alineados” en una dirección específica, que desencadena una transición de fase en el sistema. La posesión de la nueva propiedad en los agentes (la “infección” con la información que yace en el objeto icónico) no es necesario que se extienda más allá de cierta masa crítica para que emerjan evidencias de coordinación y regulación que van más allá de los agentes infectados y que se hace visible en formas de agrupamiento de los agentes en el espacio computacional y el surgimiento de canales que dejan ver con toda claridad formas de organización no fortuitas; los análisis estadísticos de tales formas revelan que no se trata de meras ilusiones surgidas de fenómenos psicológicos como la pareidolia, sino que es apreciable una desviación general de los agentes hacia una dirección determinada que se manifiesta como el surgimiento de una organización espacial no fortuita.

Todo el conjunto de agentes actuando en el espacio computacional de esta manera, se dirigen desde un proceso en el que lo azaroso domina la dinámica del sistema, hacia unos comportamientos deterministas. Es decir, que cuando una cierta masa de los agentes adquiere la nueva propiedad que hemos descrito, la incertidumbre del sistema en su conjunto disminuye notablemente; esto es importante porque cuando se ha alcanzado una cierta masa crítica, el conjunto de los agentes cambia, algo que hemos interpretado como el arribo de una transición de fase en el sistema entero.

Este fenómeno de transición de fase y el tiempo en el que se presenta es dependiente directo de la densidad de los agentes y del tamaño de su población total; más allá de los diversos balances que hemos probado, por ejemplo, cambiando el deseo en los agentes por obtener la nueva propiedad que ofrece el objeto icónico o modificando el efecto de atracción de las diversas localizaciones en que se encuentren los agentes, el volumen de la población

ha probado ser definitivo; un aumento de volumen retrasa el tiempo de aparición de la transición de fase.

La transición de fase representa el surgimiento de una nueva propiedad en el sistema; es notable que el tiempo de degradación del sistema hasta volverse de nuevo un conjunto en el que la indeterminación reina, baja notablemente, es decir, que el surgimiento de esa propiedad a la que hemos llamado “metaagente” en sí lo que provoca es retrasar la inevitable muerte entrópica del sistema. El efecto de la coordinación, la regulación y el control que logra esa propiedad emergente justamente es el de agregar más tiempo de vida a ese sistema que ya actúa como algo más que la suma de sus componentes.

Con independencia de que la nueva propiedad agregada a una masa de agentes no se encuentre uniformemente distribuida, la creación de unas pautas que restringen los comportamientos de los agentes “obligándoles” a reducir su grado de libertad para moverse, aumenta la duración del sistema en el tiempo (literalmente cambia el número de “tics” posibles desde un desorden inicial a un desorden final). Se trata de una nueva propiedad que es superior al conjunto de agentes, que les obligará a trabajar en un cierto sentido restrictivo y que tiene una finalidad de orden superior, es decir, que la restricción en la libertad de cada agente individual, su coordinación y su control a través de la emergencia de nuevas condiciones socioespaciales, realmente estaría operando como algo que beneficiará al conjunto a costa de la restricción de los individuos.

Y entonces la forma emerge. ¿O es exactamente un proceso contrario? ¿Podría ser que esa nueva propiedad tuviera una fuerza coordinadora sólo al cruzar cierto umbral crítico de ejecuciones, pero que la forma emergente existiera aún antes de que el comportamiento se manifestara materialmente en el sistema?

Podríamos especular a partir de nuestros experimentos *in silico* que la naturaleza del metaagente trascendería a la realidad física; siendo una forma previa a la existencia material, tal forma previa podría entonces dirigir al sistema solamente a partir de que se presentara la transición de fase, o quizás sería ese momento justo el que cabría intuir como el de la emergencia espontánea del metaagente surgiendo literalmente de la nada; algo que es interesante es que a partir de que surgió por primera vez la configuración cruciforme tras la transición de fase en nuestro ABM, esta forma empezó a repetirse como la configuración de control, regulación y coordinación en experimentos subsecuentes. Revisamos detalladamente nuestra programación y no encontramos razones para el surgimiento de esa forma específica que estuviera condicionado por los parámetros de nuestro programa, lo que nos ha inducido a especular si pudiese haber algo parecido a un hábito que guiaría a las modelaciones posteriores cuando en modelaciones anteriores ya se hubiese alcanzado una organización específica que pudiese representar una ventaja sobre otras organizaciones del espacio computacional que pudiese guiar al sistema en su conjunto a adoptar cierta configuración y no otras. Pero persiste la interrogante sobre el medio o la manera en la que podría estarse generando tal “hábito” en el ABM.

Es muy conocido que en cuanto se ha logrado una cierta organización y crecimiento de un cristal en laboratorio nunca alcanzado antes (quizás solamente proyectado teóricamente) en una sustancia dada, estas nuevas formas de cristalización empiezan a surgir “espontáneamente” en la naturaleza, no antes. Quizás aquí estemos frente a un fenómeno similar;

una cierta organización que maximiza la duración del sistema surge y después se convertiría en una ruta habitual que el sistema “seguiría” como si repitiera un hábito que le diera una ventaja en cuanto a su duración con respecto a otras formas posibles.

Si esto se aplicara a las formas que adoptan las interacciones sociales que se despliegan en el ambiente, diremos que esos metaagentes establecerían una poderosa pauta para la coordinación de los agentes individuales, estableciendo así las condiciones para que las conductas se transformaran en hábitos y éstos en objetos físicos que en su configuración contuvieran aquellos principios yacentes en los comportamientos socialmente asumidos que reflejarían a la forma primaria que adoptara el metaagente, con lo que cabría apreciar un mecanismo de reforzamiento del hábito que en sí tiene una forma circular.

De acuerdo con esta idea, cabría intuir unos principios de organización social que no deberían de ser buscados en el ámbito material, sino que deberían de buscarse en lo que se encuentra situado más allá de lo físico concreto. La investigación sobre lo imaginario, que puede intuirse como cercano al ámbito de la teoría de la información y la comunicación, ofrece perspectivas de trabajo prometedoras.

Referencias

- Bak, Per (1996). *How nature Works the science of self-organized*. New York: Oxford University Press.
- Hofstadter, Douglas (1970). *Gödel, Escher, Bach: Una eterna trenza dorada*. México: CONACYT.
- Hofstadter, Douglas (2007). *Yo soy un extraño bucle*. Barcelona: Tusquets.
- Mireles Brito, Adrián (2018). *La conformación socio espacial ante los iconos urbanos una aproximación desde los imaginarios urbanos y complejidad*. Monterrey: UANL.
- Narváez Tijerina, Adolfo; Mireles Brito, Adrián; Cruz Camino, Javier (2016). La complejidad y la ciudad: el uso de modelos basados en agentes autónomos (ABM) para la simulación de procesos en los imaginarios urbanos. En: *Revista Electrónica Nova Scientia*, ISSN 2007 - 0705, No 17 Vol. 8 (2), 2016 (Noviembre). pp: 515-554.
- Soddu, Celestino y Collabella, Enrica (2020). *Generative art & Design. Theory, Methodology and Projects. Environmental Design of Morphogenesis Genetic Codes of Artificial*. Milán: Domus Argenia Pub.
- Ulam, Stanislaw (1983). *Adventures of a Mathematician*. New York: Charles Scribner's Sons.
- Von Neumann, John (1966). *Theory of self reproduction automata*. Urbana and London: University of Illinois Press.

Abstract: Computational simulations through Autonomous Agent-Based Models (ABM) prove to be effective in testing how a way of conceiving the environment can be disseminated among a population. The extension of a habit that could have a decisive impact on the formation of a way to interpret the environment may depend on a certain critical mass

of people who execute it, and through that execution, elevate it to a higher level (due to its increasing abstraction and greater hierarchy in terms of its capacity to coordinate). In this way, it could be explained how the conception of the shape of the inhabited environment spreads in the group that is coordinated by the higher level. This work addresses the results of a computational simulation using ABM to emulate the dissemination of information among autonomous agents in a given computational environment. Reflections are made on what the coordination and control might imply that becomes visible when operating the simulator, even when some of the autonomous agents have not been “infected” by the information disseminated in the system.

Keywords: Autonomous Agent-Based Models (ABM) - urban imaginaries - complexity - meta-agent

Resumo: Tipicamente, a narrativa do ABM pode ser resumida como um sistema que começa com um comportamento altamente estocástico, atingindo um ponto de irreversibilidade que limita a aleatoriedade do sistema, permitindo que surja espontaneamente a forma através da qual a metaentidade expressa coordenação e regulação. A partir desse momento, a história do sistema é definida pelas condições estabelecidas pela metaentidade. O sistema experimenta uma desaceleração em sua evolução, como se o surgimento da metaentidade e sua função estivessem destinados a atrasar a chegada do equilíbrio; até que inevitavelmente isso aconteça. A partir desse ponto, toda evolução para, a metaentidade deixa de ser visível e tudo o que resta é um espaço cheio de agentes de cor uniforme movendo-se aleatoriamente. Isso se assemelha a como a neve parece quando cai no inverno e é movida por um vento suave. Neste momento, o sistema atinge a entropia máxima, aparentemente irreversível.

Palavras-chave: Modelos Baseados em Agentes Autônomos (ABM) - imaginários urbanos - complexidade - metaagente

[Las traducciones de los abstracts fueron supervisadas por el autor de cada artículo.]
