

# autómatas celulares – cellular automata

Authored by  
**memjavad**

November 13, 2025

## RECOMMENDED CITATION

memjavad (2025). *autómatas celulares – cellular automata*. Spanish Psychological Databases. Retrieved from <https://spanish.arabpsychology.com/?p=4150>

## Autómatas Celulares

**Primary Disciplinary Field(s):** Matemáticas, Informática Teórica, Física Computacional, Biología Teórica

### 1. Definición Central

Los autómatas celulares (AC) constituyen modelos computacionales y matemáticos discretos que operan en un espacio y tiempo discretos. Formalmente, un autómata celular es una malla (o cuadrícula) regular de células, cada una en un número finito de estados posibles. La esencia de su funcionamiento radica en la aplicación de reglas locales uniformes que dictan la evolución del sistema a lo largo del tiempo. A diferencia de los modelos computacionales tradicionales que requieren una programación explícita para la gestión global, los AC exhiben un comportamiento complejo y a menudo impredecible a partir de interacciones extremadamente simples y localizadas, un fenómeno conocido como **emergencia**.

La evolución del sistema se produce en pasos de tiempo sincronizados (discretos). En cada paso, el estado futuro de una célula se determina exclusivamente por su propio estado actual y los estados de las células vecinas dentro de un radio definido, conocido como su **vecindario**. Esta estricta dependencia local es la característica definitoria que otorga a los AC su poder y simplicidad conceptual. La misma regla de transición se aplica simultáneamente a todas las células del sistema, asegurando la uniformidad y el paralelismo inherente al modelo.

El estudio de los autómatas celulares no solo es relevante para la informática teórica, sino que también sirve como una poderosa herramienta para simular sistemas físicos y biológicos en los que las interacciones microscópicas dan lugar a patrones macroscópicos complejos. Desde la formación de cristales hasta la propagación de enfermedades o los patrones de crecimiento de organismos, los AC ofrecen un marco para comprender cómo la complejidad puede surgir de la simplicidad algorítmica. Su naturaleza discreta y paralela los hace particularmente adecuados para la modelización de fenómenos que operan sin una autoridad central de control.

### 2. Etimología y Desarrollo Histórico

El concepto de autómatas celulares se originó a finales de la década de 1940, impulsado por el matemático [Stanislaw Ulam](#) y el pionero de la computación [John von Neumann](#) en el Laboratorio Nacional de Los Álamos. Su motivación inicial no era la simulación de fenómenos naturales per se, sino la búsqueda de un modelo matemático que pudiera explicar la **autorreplicación**. Von Neumann buscaba diseñar una máquina que pudiera construirse a sí misma, un concepto fundamental para la biología y la teoría de la complejidad.

Inicialmente, von Neumann concibió un autómata autorreplicante basado en componentes físicos

y mecánicos, lo cual resultó ser excesivamente complejo. Fue Ulam quien sugirió simplificar el modelo utilizando un espacio discreto (una cuadrícula) y reglas locales, lo que llevó a la formulación del primer autómata celular. El diseño final de Von Neumann, publicado póstumamente, utilizaba un sistema bidimensional con 29 estados por célula y demostró matemáticamente la posibilidad de la autorreplicación compleja dentro de un sistema discreto. Este trabajo sentó las bases de la teoría de los autómatas y la complejidad computacional.

A pesar de la importancia teórica del trabajo de Von Neumann, los autómatas celulares no alcanzaron una amplia popularidad hasta 1970, con la invención del **Juego de la Vida** (Conway's Game of Life) por el matemático británico [John Horton Conway](#). El Juego de la Vida, un autómata celular bidimensional con solo dos estados (vivo o muerto) y reglas extremadamente sencillas, demostró ser capaz de generar patrones visualmente fascinantes y de complejidad computacional universal. La difusión de este juego a través de la columna de Martin Gardner en la revista *Scientific American* introdujo el concepto a una audiencia masiva y desencadenó una intensa investigación en el campo.

### 3. Características Clave y Formalismo

La formalización de un autómata celular requiere la especificación precisa de varios componentes esenciales. El primero es el **espacio celular** (o la rejilla), que puede ser unidimensional, bidimensional o tridimensional, aunque los modelos 2D son los más comunes. Este espacio suele ser infinito o, más comúnmente en simulaciones prácticas, finito con condiciones de contorno específicas (por ejemplo, periódicas o fijas).

El segundo componente crucial es el conjunto finito de **estados**  $S$  que cada célula puede adoptar. Por ejemplo, en el Juego de la Vida,  $S = \{0, 1\}$  (muerto, vivo). En modelos más complejos, los estados pueden representar propiedades físicas como temperatura, densidad de población, o la fase de un material. El estado global del autómata, que es la configuración de todos los estados de las células, define la información total del sistema en un momento dado.

El tercer componente es el **vecindario**  $N$ , que define el conjunto de células que influyen en el estado futuro de una célula central. Los vecindarios más comunes incluyen el vecindario de Von Neumann (las cuatro células adyacentes ortogonalmente en 2D) y el vecindario de Moore (las ocho células adyacentes, incluyendo las diagonales, en 2D). La elección del vecindario tiene un impacto significativo en la complejidad y el comportamiento resultante del autómata.

Finalmente, la **función de transición**  $\delta$  (o conjunto de reglas) es el corazón del AC. Esta función es un mapeo que determina el nuevo estado de una célula basándose en el estado actual de su vecindario. Matemáticamente,  $\delta: S^{|N|} \rightarrow S$ . La clave es que esta función es **uniforme** (la misma para todas las células) y **sincronizada** (aplicada simultáneamente en cada paso de tiempo), lo que garantiza que el comportamiento global emerge únicamente de estas

interacciones locales.

## 4. Clasificación y Universalidad

Una de las contribuciones más importantes al entendimiento de los autómatas celulares provino del físico [Stephen Wolfram](#), quien en la década de 1980 llevó a cabo un estudio exhaustivo de los autómatas celulares unidimensionales más simples (reglas elementales). Basándose en la complejidad de sus patrones evolutivos, Wolfram propuso una clasificación en cuatro clases generales, que vinculan la simplicidad de la regla inicial con la complejidad del comportamiento a largo plazo.

La **Clase I** incluye autómatas que evolucionan rápidamente hacia un estado uniforme y fijo, independientemente de la configuración inicial. La **Clase II** se caracteriza por evoluciones que resultan en estructuras periódicas o estables. Estos autómatas actúan como filtros de ruido, eliminando la aleatoriedad inicial para producir patrones repetitivos. Ambos tipos exhiben un comportamiento predecible y tienen una capacidad computacional limitada.

La **Clase III** abarca autómatas que generan patrones caóticos y aperiódicos. El comportamiento a largo plazo es intrínsecamente aleatorio, y cualquier cambio local en la configuración inicial tiende a propagarse rápidamente por todo el sistema. Aunque parecen aleatorios, estos autómatas pueden exhibir propiedades fractales. Finalmente, la **Clase IV** es la más interesante desde una perspectiva computacional. Estos autómatas producen estructuras localizadas complejas que interactúan entre sí (análogas a los "gliders" en el Juego de la Vida). Los autómatas de Clase IV son capaces de realizar **computación universal**, lo que significa que, en principio, pueden simular cualquier máquina de Turing. El Juego de la Vida es un ejemplo canónico de un autómata de Clase IV.

## 5. El Juego de la Vida: Un Ejemplo Canónico

El Juego de la Vida, inventado por John Horton Conway, es quizás el autómata celular más famoso y estudiado. Se define en una cuadrícula bidimensional infinita, donde cada célula tiene dos estados (vivo o muerto) y utiliza el vecindario de Moore (8 vecinos). Sus reglas son notablemente sencillas, basadas en la densidad de población:

**Supervivencia:** Una célula viva con 2 o 3 vecinas vivas sobrevive a la siguiente generación.

**Muerte (por Subpoblación o Sobrepoblación):** Una célula viva con menos de 2 o más de 3 vecinas vivas muere.

**Nacimiento:** Una célula muerta con exactamente 3 vecinas vivas se convierte en célula viva.

A pesar de estas tres reglas minimalistas, el sistema genera una asombrosa variedad de estructuras dinámicas. Se han identificado configuraciones estables (bloques, colmenas),

osciladores (parpadeadores, sapos) y, crucialmente, estructuras móviles conocidas como **naves espaciales** y **gliders**. Los gliders son patrones que se desplazan periódicamente a través de la cuadrícula, llevando información.

La relevancia del Juego de la Vida radica en su demostración de la **universalidad de Turing**. Se ha probado que, utilizando configuraciones iniciales complejas (como "cañones de gliders" y "reflectores"), el Juego de la Vida puede emular cualquier circuito lógico y, por lo tanto, puede realizar cualquier cálculo que una computadora moderna pueda realizar. Esto subraya la profunda conexión entre la dinámica local simple y la capacidad computacional global ilimitada.

## 6. Aplicaciones en Ciencia e Ingeniería

Debido a su capacidad para modelar sistemas descentralizados y paralelos, los autómatas celulares han encontrado numerosas aplicaciones prácticas en diversas disciplinas científicas, sirviendo como una alternativa poderosa a las ecuaciones diferenciales parciales tradicionales, especialmente cuando se trata de modelar fronteras complejas o no linealidades extremas.

En la **Física Computacional**, los AC se utilizan para simular la dinámica de fluidos (por ejemplo, los modelos de gas de celosía), la propagación de incendios forestales, la formación de patrones en la cristalización y el crecimiento de materiales. Su naturaleza discreta facilita la paralelización masiva de los cálculos, haciéndolos eficientes para grandes simulaciones. En **Biología Teórica y Modelado Ecológico**, los AC son fundamentales para simular la dinámica poblacional, la competencia entre especies, la formación de patrones biológicos (morfogénesis, como las rayas de los peces), y la propagación de epidemias. Los estados de las células pueden representar la susceptibilidad, infección o recuperación de individuos en una población.

Además, en la **Ingeniería de Tráfico y Sistemas de Transporte**, los modelos de autómatas celulares unidimensionales y bidimensionales son empleados para simular el flujo de vehículos en autopistas y la congestión urbana. Estos modelos permiten a los planificadores evaluar el impacto de diferentes reglas de tráfico y diseños de infraestructura. En el campo de la **Criptografía**, ciertos AC, particularmente aquellos de Clase III (comportamiento caótico), se han investigado para la generación de secuencias pseudoaleatorias de alta calidad, útiles en la creación de claves y cifrado.

## 7. Debates y Críticas

A pesar de su utilidad y elegancia conceptual, los autómatas celulares son objeto de varios debates y críticas. Una de las principales limitaciones es la **discretización** inherente del modelo. Al asumir que el espacio, el tiempo y los estados son discretos, los AC necesariamente simplifican la realidad física, que es continua. Aunque esta simplificación es a menudo una ventaja computacional, puede introducir artefactos o inexactitudes al modelar sistemas puramente

continuos.

Otro punto de controversia, especialmente en el contexto de la física, es la cuestión de si el universo mismo es un autómata celular. Stephen Wolfram, en su obra *A New Kind of Science*, argumenta que la simplicidad subyacente de las reglas de los AC sugiere que podrían ser la base fundamental de la realidad física. Esta hipótesis, si bien fascinante, ha generado un intenso debate filosófico y científico, ya que la verificación empírica de una regla fundamental de AC para el universo sigue siendo un desafío monumental y especulativo.

Finalmente, aunque los AC son eficientes en la simulación de fenómenos que dependen de interacciones locales, el diseño de la función de transición (la regla) para que coincida con precisión con un fenómeno natural observado a menudo requiere un ajuste manual considerable y no trivial. La complejidad algorítmica y el tiempo de simulación, especialmente para AC tridimensionales con muchos estados, siguen siendo un desafío computacional significativo, limitando su aplicación en simulaciones que requieren un detalle microscópico extremo.

## 8. Lectura Adicional

[Autómata celular - Wikipedia](#)

[El Juego de la Vida de Conway - Wikipedia](#)

[Cellular Automata - Stanford Encyclopedia of Philosophy](#)

[A New Kind of Science \(Wolfram\) - Sitio Oficial](#)