Autómatas Celulares y su Aplicación en Computación

Conference Paper · May 2014

DOI: 10.13140/2.1.2167.2964

Santigo Fernandez fraga
Instituto Tecnológico de Querétaro (ITQ)

VIII Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica.
Abril 10-12 y Mayo 29-31, 2014. ISBN: 978-607-95347-9-0.
Grupo LOC, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.

Autómatas Celulares y su Aplicación en Computación

Fernández Fraga Santiago Miguel, Rangel Mondragón Jaime
Facultad de Informática, Universidad Autónoma de Querétaro

Resumen

Los autómatas celulares son herramientas computacionales que nos permiten análisis sistemas dinámicos a través del tiempo. Por lo cual son ideales como herramientas de simulación. El presente documento presente presentar una introducción a las características de ésta herramienta, sus principales componentes y de forma general su funcionamiento, así mismo mostrar de forma general sus principales aplicaciones.

Palabras Clave: autómatas celulares, sistemas dinámicos

1. Introducción

El desarrollo de modelos para sistemas físicos, eléctricos y mecánicos, está basado en métodos y expresiones matemáticas, las cuales representan teóricamente el comportamiento de dichos sistemas a través del tiempo. A este tipo de sistemas se les conoce como ***sistemas dinámicos***. Los *sistemas dinámicos* son susceptibles a encontrarse en algún estado determinado en el tiempo, y de alterarse en un instante de tiempo posterior. Generalmente para modelar dichos sistemas, los cuales son de naturaleza continua, se utilizan herramientas matemáticas como las ecuaciones diferenciales, las integrales funcionales, variables de estado, elementos finitos, entre otras. La simulación computacional por medio de estas herramientas nos lleva a transformar variables continuas en variables discretas, obteniendo de esta manera análisis numéricos sobre modelos aproximados.

Los ***autómatas celulares*** son estructuras ideales para construir modelos computacionales de sistemas dinámicos o complejos de una manera discreta; es posible, por ejemplo, lograr modelos que representen con suma fidelidad algunas leyes de la Física. El aspecto que más caracteriza a los autómatas celulares es su capacidad para dotar al conjunto de elementos del sistema, visto como un todo, con una serie de propiedades emergentes inducidas por su propia dinámica.

2. Antecedentes

La teoría de Autómatas Celulares está desarrollada con base en la teoría de autómatas definida por John Von Neumann en su trabajo "*The General and Logical Theory of Automata*".

Von Neumann con frecuencia habló de una "Teoría Lógica de Autómatas" en lugar de simplemente de "Teoría de Autómatas", sin embargo, el sentía que las matemáticas de la teoría de autómatas también deberían tener características formales muy diferentes de las de la lógica matemática. Mientras Von Neumann trabajaba en su teoría de autómatas, Kurt Gödel (1906-1978) redujo la lógica matemática a una teoría de cómputo, al mostrar que las nociones fundamentales de lógica (una fórmula bien definida, un axioma, la regla de la inferencia, las pruebas, etc...) son esencialmente recursivas. Las funciones recursivas son aquellas que pueden ser computadas en máquinas de Turing, y por lo tanto la lógica matemática puede ser tratada desde el punto de vista de los autómatas [6].

En la época de los 50´s, Von Neumann (1903-1957) trató de desarrollar una máquina capaz de idear instrucciones que la modificaran a sí misma, un "autómata auto-replicable" (selfreplicating automaton) [5]. Posteriormente se interesó en generar reglas para las cuales la computadora pudiera programarse y generar una réplica de sí misma. Stanislaw Ulam (1909-1984) consideró un arreglo rectangular de celdas, como un tablero de ajedrez, en el cual cada celda podía estar en uno de un número finito de estados, y el tiempo se desarrollaba a saltos (forma discreta). Durante cada "salto" del tiempo, las celdas tenían la oportunidad de cambiar de estado. La regla que determina el cambio de estado de una celda dependía únicamente de la celda misma y del estado de sus celdas vecinas. La cuadricula de Ulam fue un ejemplo de lo que después se llamaría un autómata celular (**AC**) [3],[4]. Von Neumann comprendió que éste sistema podría servir a sus propósitos para resolver su problema de auto-reproducción. La cuadrícula de celdas podría ser una computadora. ”Theory of Self-Reproducing Automata” fue el resultado de sus observaciones, publicadas posteriormente por su estudiante de doctorado W. Burks en 1966 [5].

En los años 60 John Holland comenzó a aplicar los AC en problemas de optimización y adaptación [3],[4]. A su vez, un gran número de matemáticos dirigían su atención hacia las transformaciones iterativas que actúan sobre estructuras espacialmente extendidas y con un conjunto discreto de estados, es decir autómatas celulares (cuestiones importantes sobre complejidad de ejecución y reversibilidad se han estudiado por Alvy Smith, Serafino Amoroso y Victor Aladyev) [4]. El juego de la vida de John Conway que alcanzó popularidad gracias a Martin Gardner se convirtió en uno de los principales AC más estudiados en los años 70’s.

Los AC pueden servir para modelar las propias leyes físicas en lugar de sólo sistemas complejos, esto fue estudiado por Edward Fredkin y Tommaso Toffoli en los años 80’s [7]. El tema principal de su investigación fue la formulación de que los modelos computacionales de problemas físicos conservan información, y de esta forma conservan uno de los elementos principales de la física microscópica, su carácter reversible. Desde el punto de vista de la Física y la Química el estudio de modelos que reducen fenómenos macroscópicos a procesos microscópicos perfectamente definidos son de un interés metodológico fundamental.

Los simuladores de AC son capaces de actualizar millones de celdas en un tiempo extremadamente corto y son una herramienta ideal en la construcción de modelos simples de ecuaciones diferenciales como las ecuaciones del calor de propagación de ondas o de Navier-Stoke. En particular los modelos de AC se utilizan de forma regular en dinámica de fluidos. Finalmente para una de las ramas de la Física que más se está desarrollando ésta teoría es la de los sistemas dinámicos, la aparición de fenómenos colectivos, la turbulencia, el caos, los fractales, entre otros. Los AC dan una rica y creciente colección de modelos representativos de estos fenómenos, que pueden ser aislados y estudiados de forma sencilla. El uso de los autómatas celulares en este campo fue iniciado por Stephen Wolfram a mediados de los años 80’s [3].

3. Elementos que forman a los autómatas celulares

Definimos formalmente a un Autómata Celular como una función $AC(L, S, N, f)$ donde:

- L región regular de dimensión d, donde los elementos de L se llaman ***celdas***
- S conjunto finito de estados
- N conjunto finito de vecindades
- f función de transición $f : S^N \rightarrow S$

3. 1 Región y Dimensión

Región.- Espacio físico donde evoluciona el autómata.

Dimensión.- Enfatiza principalmente al espacio sobre el cual evoluciona a través del tiempo dentro de un espacio restringido. Los autómatas celulares con $d = 1$ (ACD1), o ***autómatas lineales***, es un arreglo de celdas de la forma:

$$C^{(t)} = \cdots C_{-2}^{(t)}\, C_{-1}^{(t)}\, C_0^{(t)}\, C_1^{(t)}\, C_2^{(t)} \cdots \qquad (1)$$

$$C^{(t)} = C_0^{(t)}\, C_1^{(t)}\, C_2^{(t)} \cdots C_{n-2}^{(t)}\, C_{n-1}^{(t)}\, C_n^{(t)} \qquad (2)$$

donde n representa el total de celdas.

Los autómatas celulares con $d = 2$ (ACD2), representan una superficie plana formada por un número finito de celdas con base a las siguientes configuraciones

$$C^{(t)} = \begin{bmatrix} \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & ⋰ \\ \cdots & C_{-1,-1}^{(t)} & C_{-1,0}^{(t)} & C_{-1,1}^{(t)} & \cdots \\ \cdots & C_{0,-1}^{(t)} & C_{0,0}^{(t)} & C_{0,1}^{(t)} & \cdots \\ \cdots & C_{1,-1}^{(t)} & C_{1,0}^{(t)} & C_{1,1}^{(t)} & \cdots \\ ⋰ & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

$$C^{(t)} = \begin{bmatrix} C_{0,0}^{(t)} & C_{0,1}^{(t)} & \cdots & C_{0,m-1}^{(t)} \\ C_{1,0}^{(t)} & C_{1,1}^{(t)} & \cdots & C_{1,m-1}^{(t)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n-1,0}^{(t)} & C_{n-1,1}^{(t)} & \cdots & C_{n-1,m-1}^{(t)} \end{bmatrix}$$

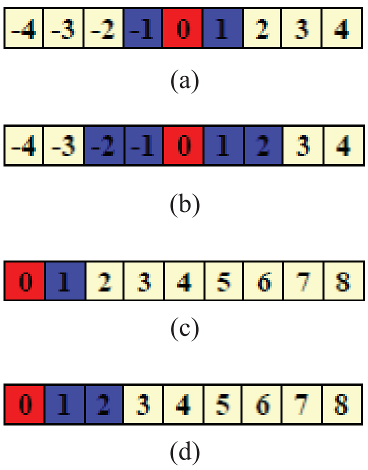
3.2 Conjunto de estados

Todos los valores posibles que puede tomar una celda. En cada instante de tiempo t, cada celda deberá encontrarse en un estado k, que está definido dentro del conjunto de estados del AC. El conjunto de estados más sencillo corresponde a los elementos *biestables*, los cuales se pueden encontrar en sólo uno de dos estados posibles, 0 y 1. Pero también el estado puede venir representado por un vector de componentes reales,

$S = \{0, 1, 2\}$
$S = \{sano, enfermo, inmune, muerto\}$.

3.3 Vecindades

Para cada celda de un AC, es necesario establecer el ***conjunto de celdas vecinas***. En caso de asociar objetos con coordenadas de un sistema de referencia, el criterio suele ser construir la vecindad de un elemento dado con todos aquellos otros elementos que se encuentran a menos de una cierta distancia de radio r, de tal forma que los más alejados no ejerzan influencia directa sobre él (Figura 1).



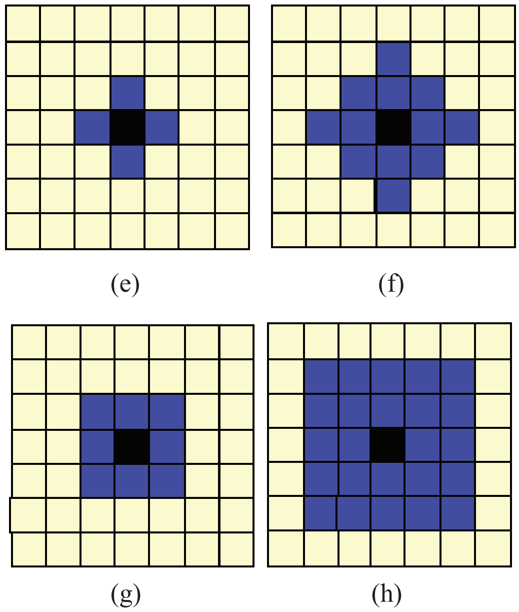


Figura 1. a) AC $d = 1, N(1) = 2$ b) AC $d = 1$ $N(2) = 4$ c) AC $d = 1$ $N(1) = 1$ d) AC $d = 1$ $N(2) = 2$ e) vecindad Von Neumann $N(1) = 4$ f) vecindad Von Neumann $N(2) = 12$ g) vecindad de Moore $N(1) = 9$ h) vecindad de Moore $N(2) = 24$

Las vecindades en los bordes de la región geométrica dependen de las condiciones que se impongan en los límites de la retícula (Figura 3). Se suelen considerar tres casos:

- ***Bordes periódicos***. Células opuestas se consideran vecinas, de forma que en un retículo plano la superficie se convierte en un *torus* (Figura 2).
- **Bordes absorbentes**. Las células de los bordes no tienen vecinos más allá de los límites del retículo.
- **Bordes reflejantes.** Las células de los bordes tienen como vecinos más allá de los límites del retículo a la celda misma

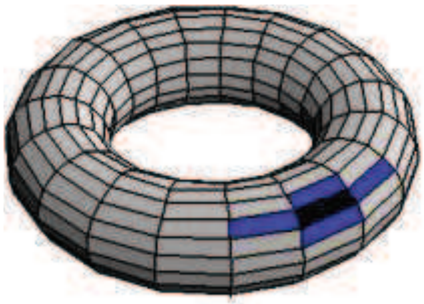
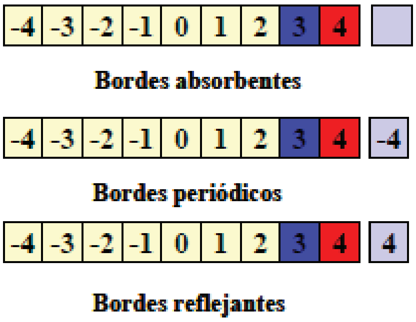
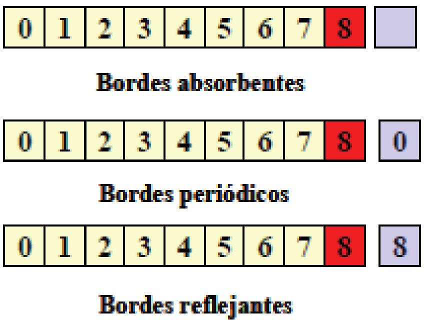


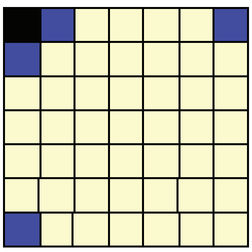
Figura 2. Torus



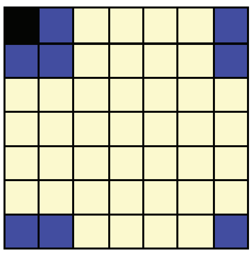
(a)



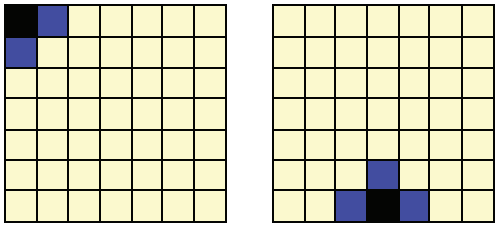
(b)



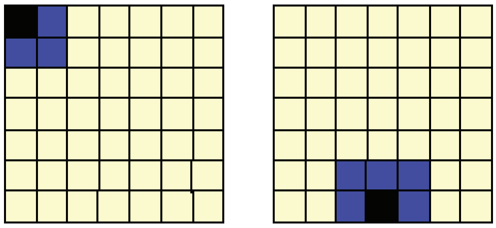
(c)



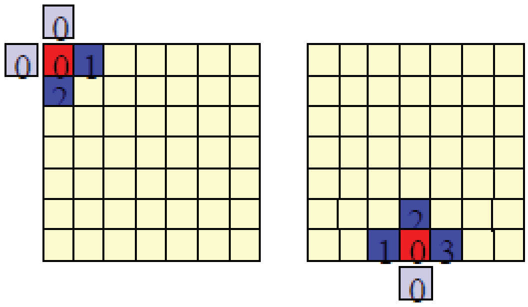
(d)



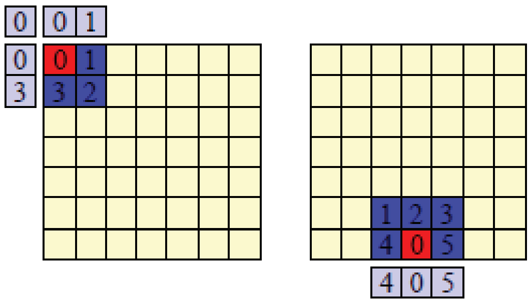
(e)



(f)



(g)



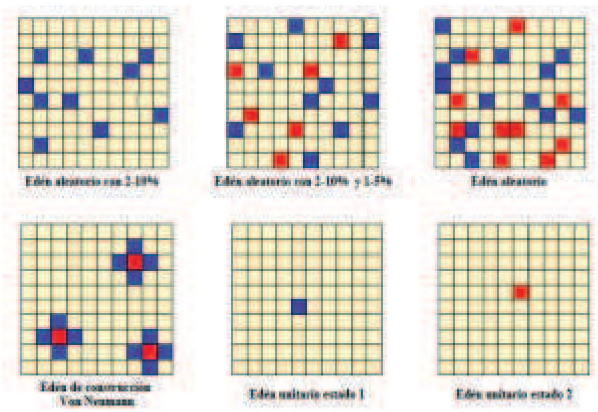
(h)

Figura 3. Autómatas celulares a) $d = 1$ $N(1) = 2$ b) $d = 1$ $N(1) = 1$ c) $d = 2$ vecindad de Von Neumann bordes periódicos d) $d = 2$ vecindad de Moore bordes periódicos e) $d = 2$ vecindad de Von Neumann bordes absorbentes f) $d = 2$ vecindad de Moore bordes absorbentes g) $d = 2$ vecindad de Von Neumann bordes reflejantes h) $d = 2$ vecindad de Moore bordes reflejantes

Es importante establecer el punto de partida a través del tiempo desde donde comenzará a evolucionar el autómata para lo cual se definen sus ***condiciones iniciales*** (Figura 4). Las condiciones iniciales también llamadas ***edén*** (Moore, MyHill 1963), pueden tener una "construcción" específica (edén construido), generadas de forma aleatoria (edén aleatorio) o formadas por un único estado rodeado de estados quiescentes, nulos (edén unitario) [8].

Ejemplos:

i. AC $d = 1, L = 20$ biestable, *edén construido*
edén = {0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 }
ii. AC $d = 1, L = 20, S = \{0, 1, 2\}$, *edén aleatorio*
edén = {0 0 1 1 0 2 1 2 2 1 0 2 1 2 2 2 1 0 2 1}
iii. AC $d = 1, L = 2$. Biestable, *edén unitario*
edén = { 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 }
iv. AC d = 2, y S= { 0→ 1→ 2→ }



3.4 Función de Transición

El aspecto más importante de los AC es la ***regla de transición***, o ***función de transición***, ya que ésta determina la evolución del sistema. El conjunto de reglas de transición T define la dinámica del AC.

Dada una celda i en un estado k, en conjunto con el estado k de cada uno de sus vecinos, estipulados por una vecindad N, para un instante de tiempo t, la regla de transición $T_m \in T$, calcula el siguiente estado de la celda. El número total de reglas posibles puede ser calculado por k^{k^n} donde k es el número de estados para cada celda y n es el número de vecindades, incluyendo a la propia celda [8].

Ejemplos:

i. Para un autómata celular de dimensión $d = 1$, con dos estados y dos vecinos. Tenemos que $k = 2$ y $n = 3$, por lo que el número total de reglas es $2^{2^3} = 256$.
ii. Para un autómata celular de dimensión $d = 2$, con dos estados y vecindad de Moore, tenemos que $k = 2$ y $n = 9$, así que el número total de reglas es $2^{2^9} = 262144$

La función de transición asocia a un estado con cada celda de la región. El efecto de la función de transición f es cambiar la configuración de la celda C_t en una nueva configuración de celda C_{t+1} de acuerdo a la regla:

$$C_{t+1} = f\ (\{C_t\ (i) : N(r)\}) \qquad (3)$$

donde $N(r)$ es el conjunto de vecindades de r celdas.

Las funciones o reglas de transición se pueden especificar de diferente manera con base a la configuración del AC.

3.4.1 Reglas Determinísticas

Para AC $d = 1$ tenemos que las reglas ***determinísticas*** se definen para cada posible combinación de estados, con sus respectivas vecindades, asignar un valor de estado, que determine la evolución de la siguiente generación.

Consideremos un AC $d = 1, L = 20, N(1) = 1$, con edén aleatorio. Podemos definir las las reglas de la Tabla 1:

Regla 1	Regla 2	Regla 3
C_t V → C_{t+1}	C_t V → C_{t+1}	C_t V → C_{t+1}
(0,0) → 1	(0,0) → 0	(0,0) → 0
(0,1) → 0	(0,1) → 0	(0,1) → 1
(1,0) → 0	(1,0) → 0	(1,0) → 0
(1,1) → 1	(1,1) → 1	(1,1) → 0

Tabla 1. Reglas determinísticas

La regla 1 y regla 2 definen a las funciones lógicas disyunción y conjunción, respectivamente y la regla 3 es una definición específica que puede representar a alguna función lógica. La evolución de los AC bajo las mismas condiciones iniciales y que representan estas reglas se muestran en la Figura 4.

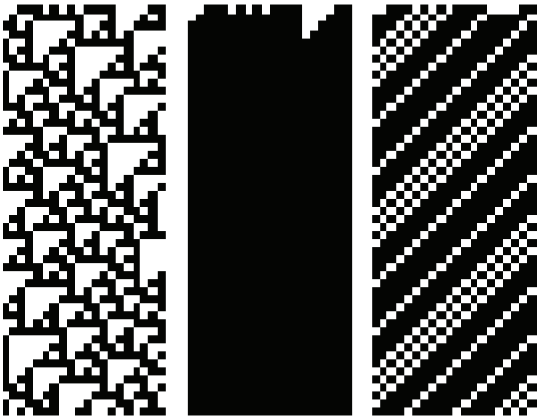


Figura 4. a) Regla 1 b) Regla 2 c) Regla 3 para 50 generaciones

Para AC $d = 2, L = 30 \times 30, N(1) = 9, S = \{0,1\}$, (vecindad de Moore bordes periódicos, edén aleatorio) y $f\{(1{:}2) \to 1, (1{:}3) \to 1, (0{:}2) \to 1, (*{:}*) \to 0\}$ donde $f\{(C_t{:}k \to 1)\}$, el comportamiento del AC lo podemos apreciar en la Figura 5.

Figura 5. Reglas determinísticas para AC $d = 2$

3.4.2 Reglas Totalísticas y Totalísticas exterior

Para AC $d = 1$ las ***reglas totalísticas*** son aquellas donde depende de la suma de los estados de todas las celdas vecinas [2]. La regla totalística se puede describir por

$$C(r)_{t+1} = f(\sum\{N(r){:}\, C(r)_t\}) \qquad (4)$$

Para AC $d = 1$ las ***totalísticas exterior*** donde también depende del estado de la celda misma [2]. La regla totalística exterior se expresa por

$$C(r)_{t+1} = f(C(r)_t, \sum\{N(r){:}\, C(r)_t\}) \qquad (5)$$

Ejemplos:

i. Para AC $d = 1, L = 20, \mathrm{N}(1) = 2,\ S = \{0, 1, 2\}$ Definimos la regla *totalística* $f = \{0 \to 1, 1 \to 2, 2 \to 0\}$ esto es: sí la suma de los vecinos es 0 entonces $C_{t+1} = 1$, sí la suma de los vecinos es 1 entonces $C_{t+1} = 2$ y sí la suma de los vecinos es 2 entonces $C_{t+1} = 0$ (Figura 6.a).

ii. Para AC $d = 1, L = 20, N(1) = 2,\ S = \{0, 1, 2\}$ Definimos la regla *totalística exterior* $f = \{(0{,}0) \to 0, (0, x > 0) \to 2, (1, x) \to 0, (2, x) \to 1\}$ esto es: sí $C_t = 0$ y la suma de la celda misma y sus vecinos es 0, entonces $C_{t+1} = 0$, sí $C_t = 0$ y la suma de la celda misma y sus vecinos es mayor a 0, entonces $C_{t+1} = 2$, sí $C_t = 1$ y la suma de la celda misma y sus vecinos es cualquier valor, entonces $C_{t+1} = 0$ y sí $C_t = 2$ y la suma de la celda misma y sus vecinos es cualquier valor, entonces $C_{t+1} = 1$ (Figura 6.b).

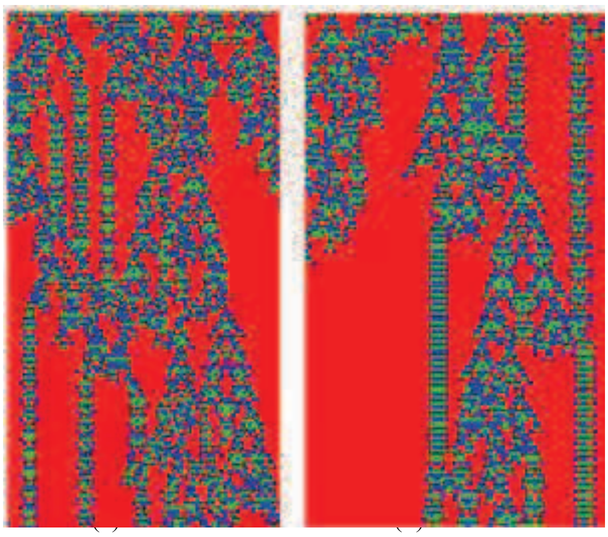


Figura 6. a) Regla totalística b) Regla totalística exterior

3.4.3 Reglas de Wolfram

Para AC $d = 1, N(1) = 2$, biestables. Las reglas de ***Wolfram*** son descritas por números binarios de ocho dígitos. Cualquier número binario de ocho dígitos puede describir un AC, por lo tanto hay $2^8 = 256$ reglas distintas (Tabla 2). Dos restricciones (no esenciales), son generalmente aplicadas a éstas reglas. Primero, una regla puede ser considerada ***ilegal*** si al menos un estado inicial quiescente, permanece sin cambio (condición quiescente). Esta restricción a la regla esta especificada esencialmente para los extremos con valor de 1. Segundo, la regla puede ser de ***reflexión simétrica***, es decir que dos reglas generan idénticos valores, como por ejemplo 100 y 001; 110 y 011, etc. Esta restricción genera 32 posibles reglas ***legales*** de la forma $a_1\ a_2\ a_3\ a_1\ a_2\ a_3\ a_1\ 0$. Entonces definimos que una regla es considerada ***ilegal*** si viola la reflexión simétrica y/o si viola la condición quiescente [8].

REGLA 90 →11011010	
V C_t V	C_{t+1}
(0,0,0)	0
(0,0,1)	1
(0,1,0)	0
(0,1,1)	1
(1,0,0)	1
(1,0,1)	0
(1,1,0)	1
(1,1,1)	1

Tabla 2. Regla de Wolfram

Ejemplos:

i. La regla 90 → 11011010 es una regla *legal*, ya que es de la forma $a_1\ a_2\ a_3\ a_1\ a_2\ a_3\ a_1\ 0$ (Figura 7.a)
ii. La regla 146 → 10010110 es una regla *legal*, ya que es de la forma $a_1\ a_2\ a_3\ a_1\ a_2\ a_3\ a_1\ 0$
iii. La regla 2 → 00000010 es una regla ilegal, ya que viola la *reflexión simétrica* (Figura 7.b)
iv. La regla 1→ 00000001 es una regla ilegal, ya que viola la *condición quiescente*

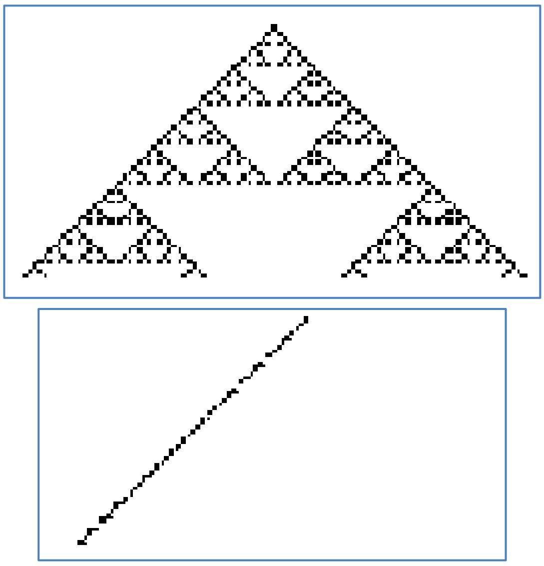


Figura 7. AC edén unitario 50 generaciones. a) Regla 90 b) Regla 2

3.4.4 Juego de la Vida de Conway

Para los AC $d = 2, L = 30 \times 30$, $N(1) = 9\ \{Moore\}, S = \{0,1\}$ definimos la función de transición en términos del "Juego de la vida" o ***GOL*** (por sus siglas en ingles de "***Game of Life***"). Dicho Ac ha sido extensivamente explorado y se han encontrado un gran número de patrones extraordinarios. El ***GOL*** es más una simulación donde puedes alterar los parámetros pero no puedes alterar la salida directamente, esto se hace con las condiciones de la simulación [1]. El "juego" es "jugado" en una región cuadriculada de dos dimensiones. Cada célula puede estar encendida (1) o apagada (0). Cada célula tiene ocho vecinos adyacentes (vecindad de Moore) a los lados y en las esquinas del cuadrado (bordes periódicos). La regla de la vida se puede expresar simplemente (en términos de la manera que afecta el comportamiento de la célula de una generación a la siguiente) como sigue:

- Si una célula está apagada (muerta) y tiene 3 vecinos "vivos" (de ocho), se convertirá en "viva" en la próxima generación.
- Si una célula está encendida (viva) y tiene 2 o 3 vecinos vivos, sobrevive, de otra manera muere en la siguiente generación.

La función de transición se denomina comúnmente $f(S23/B3)$, que significa que la célula viva *sobrevive* ("survive") si tiene dos o tres vecinos vivos y *nace* ("born") si tiene 3 vecinos vivos. Estas reglas específicas fueron seleccionadas por el matemático J.H. Conway para garantizar que el AC esté en la frontera entre crecimiento ilimitado y la monotonía. Se probó que este comportamiento caótico es impredecible y que se puede utilizar para construir una Maquina de Turing universal y aún un constructor universal [1].

John Horton Conway, matemático británico en el colegio Gonville and Caius de la Universidad de Cambrige, a fínales de los 60's estaba trabajando con algunas ideas para un autómata celular simple. Las primeras ideas para un autómata celular fueron pensadas por Ulam. John Von Neumann usó esta idea para crear un autómata celular complejo, que podría producir patrones auto-reproducibles no triviales. La máquina de John Von Neumann tiene 29 estados, sin embargo Conway estaba buscando algo más simple pero interesante [1]. Al inicio de 1970 Conway y sus estudiantes jugaron con diferentes reglas, hasta que finalmente llegaron a la regla "*nacen si 3/sobreviven si 2 o 3*". [2].

El GOL fue publicado en la revista Scientific American en Octubre de 1970 y posteriores artículos mostraban únicamente diferentes patrones que se descubrieron con otras reglas (1974-1988). El GOL es utilizado para el estudio de sistemas dinámicos y la simulación de sistemas complejos.

Consideremos el siguiente patrón de inicio, donde las celdas vacías representan el estado "off" (muertas) y las celdas llenas representan el estado "on" (vivas) (Figura 8). Aplicando la regla de Conway (S23/B3) la Figura 9 muestra el número de vecindades con las que cuenta cada celda.

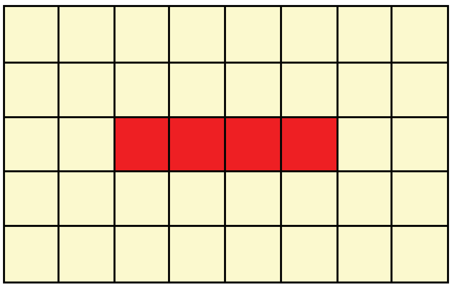


Figura 8. Configuración inicial del GOL

0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	2	3	3	2	1	0
0	1	1	2	2	1	1	0
0	1	2	3	3	2	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 9. Vecindades del edén

Las celdas "vivas" pueden sobrevivir cuando tienen 2 o 3 celdas vecinas "vivas". Las celas centrales tienen exactamente 2 vecinos "vivos" por lo tanto "sobreviven", las celdas que solo tienen un vecino "vivo" "morirán" de soledad. Las celdas vacías o "muertas" necesitan exactamente 3 vecinos "vivos" para pasar del estado "muerto" al estado "vivo", en éste caso, 4 celdas pasarán de estar "muertas" a "vivas". El resto de las celdas permanecerán "apagadas" ya que solo tienen 1 o 2 celdas vecinas "vivas" y no es lo suficiente para "vivir" (Figura 10).

0	0	1	2	2	1	0	0
0	0	2	3	3	2	0	0
0	0	3	5	5	3	0	0
0	0	2	3	3	2	0	0
0	0	1	2	2	1	0	0

Figura 10. Evolución del GOL en la primera generación

Para la siguiente generación podemos apreciar que 4 celdas "sobrevivirán" debido a que cuentan con 3 vecinos, las otras dos "morirán" de "inanición". También podemos ver que 2 celdas "vacías" tienen 3 vecinos, por lo tanto pasarán del estado "muertas" a "vivas". El resto de las celdas permanecerán apagadas (Figura 11).

0	0	1	2	2	1	0	0
0	1	2	2	2	2	1	0
0	1	2	5	5	2	1	0
0	1	2	2	2	2	1	0
0	0	1	2	2	1	0	0

Figura 11. Evolución del GOL en la segunda generación

Ahora tenemos que ninguna celda tiene tres vecinos, por lo tanto ninguna celda llegará a vivir. Todas las celdas "vivas" tienen exactamente 2 vecinos "vivo" por lo tanto todas ellas sobrevivirán. Entonces tenemos un patrón estable, que permanece vivo y que no cambiará en las siguientes generaciones.

El GOL no se limita a las reglas S23/B3. Otras variaciones con respecto al número de vecindades, o el número de celdas vecinas necesarias para que una celda pueda vivir, morir o sobrevivir, podrán generar combinaciones que muestran un comportamiento "vivo" a través del tiempo (Figura 12).

4. Aplicaciones de los autómatas Celulares

El desarrollo de AC ha encontrado aplicaciones específicas en varios campos de las ciencias. Física: termodinámica e hidrodinámica de partículas; Química: reacciones catalíticas y comportamiento de gases; Matemáticas: solución de ecuaciones diferenciales parciales, comportamiento de sistemas no lineales; Biología: estudios del comportamiento de microorganismos y macro organismos; Ecología: simulación de gases contaminantes comportamiento del fuego; Medicina: simulación de epidemias y estudios de fármacos; Economía: simulación del comportamientos económicos y tendencias financieras; Administración Pública: crecimiento de ciudades y control de tráfico; Psicología: comportamiento delictivo; etc.

Dentro de la ciencia computacional los autómatas celulares también se aplican sobre diferentes ramas de investigación: Criptografía, Teoría de la Computación, Simulación, Algoritmos genéticos, Paralelismo, Teoría del Caos y Fractales.

5. Conclusiones

Los autómatas celulares son estructuras ideales para construir modelos computacionales de sistemas dinámicos gracias a su capacidad de dotar a los elementos que forman el sistema, con una serie de propiedades, inducidas por su propia naturaleza, y mostrar la complejidad de todo el sistema. Los elementos que forman al autómata celular (espacio, conjunto de estados, vecindad y reglas de transición) fueron explicados con detalle, mostrando las características de cada uno de ellos.

Las propiedades de los autómatas celulares son parte importante del modelado computacional, las cuales afectan el comportamiento del sistema. Es importante mencionar que las condiciones en los bordes, el estado inicial y las reglas de transición, son elementos esenciales para mostrar la evolución a través del tiempo del autómata.

6. Referencias

[1] Eppstein David; Searching for Spaceships; ACM Computing Research Repository A1/000/4003 July 2000

[2] Espericueta Rafael (1997). "Cellular Automata Dinamycs". Bakersfield Collage, Math Department

[3] Gaylor Richard J., Wellin Paul R. 1995."*Computer Simulations with Mathematica, Exploratations in Complex Phisical and Biological Systems*". Springer-Verlag TELOS

[4] Gaylor Richard J., Nishidate Kasue (1996). "*Modeling Nature: Cellular Automata Simulations with Mathematica*". Springer TELOS

[5] Hopcroft John E., D. Ullman Jeffrey. (1997). "*Introducción a la Teoría de Autómatas, Lenguajes y Computación*"; CECSA

[6] Russell Stuart, Norvig Peter (2010). "*Inteligencia artificial. Un enfoque moderno".* Prentice Hall Hispanoamericana.

[7] Toffoli Tommaso, Margolus Norman. (1991). "*Cellular Automata Machines a New Environment for Modeling*"; MIT Press.

[8] Wolfram Stephen (1994). "*Cellular Automata and Complexity, Collected Papers*" Addison-Wesley