# **Apuntes – Módulo 4**

## **Curso: Modeling and Simulation of Natural Processes**

**Universidad de Ginebra - Prof. Bastien Chopard et al.** **Semana 4 – Modelado con Autómatas Celulares**

### **1. Definición y conceptos básicos de autómatas celulares**

Aquí se establecen las bases. Los ACs son como pequeños "universos" discretos.

* **¿Qué es un AC?**

Una abstracción matemática de un proceso físico. Es un universo "ficticio" donde todo es discreto (espacio, tiempo y estados).

* **Componentes clave:**
  + Espacio: Una rejilla regular (ej., tablero de ajedrez, 1D, 2D, 3D). Cada punto es una "celda".
  + Estados: Cada celda tiene un estado finito (ej., 0 o 1, blanco o gris).
  + Tiempo: Evolución en pasos discretos.
  + Regla de Transición: La "ley" que define cómo el estado de una celda cambia en el siguiente paso de tiempo, basándose en su propio estado actual y los estados de sus vecinos. Esta regla es local y se aplica de forma simultánea a todas las celdas.
* **Visualización:** En 1D, las filas sucesivas de celdas representan la evolución temporal del sistema, creando una imagen 2D.
* **Clasificación de Wolfram:** Agrupa el comportamiento de los ACs en 4 clases, desde sistemas estáticos (Clase I) o periódicos (Clase II), hasta caóticos (Clase III) y los más interesantes, con una mezcla de complejidad y estabilidad (Clase IV).

### **2. Antecedentes históricos**

Es bueno saber de dónde vienen estas ideas por eso se introduce lo siguiente.

* Orígenes: John von Neumann y Stanislaw Ulam (sí, el de Monte Carlo) en los años 40.
* Motivación de Von Neumann: Estaba interesado en la autorreparación y autorreproducción en sistemas complejos (inspirado en el cerebro y las células vivas), buscando cómo implementar esto en computadoras.
* Concepto de Autorreproducción: La idea de que un sistema puede copiarse a sí mismo sin necesidad de un "copiador" más complejo que el original. Los ACs pueden ilustrar este principio.
* Hardware Evolutivo: Esta idea de autorreparación/copia en sistemas discretos tiene aplicaciones modernas, como la creación de hardware resiliente para entornos remotos.

### **3. AC como abstracción matemática de la realidad**

Los ACs, a pesar de su simplicidad, pueden modelar fenómenos físicos complejos.

* Escalas: Los ACs pueden verse como un nivel de abstracción "mesoscópico", a medio camino entre la escala microscópica (átomos) y macroscópica (comportamiento global).
* Emergencia de Comportamiento: Lo fascinante es que reglas microscópicas muy simples pueden generar patrones y estructuras complejas a gran escala (tanto espacial como temporal). El todo es más que la suma de sus partes.
* Ejemplos de Aplicación:
  + Regla de Paridad: Genera patrones complejos a partir de una regla local muy simple. Interesante ver cómo el resultado se "resetea" en potencias de 2 de las iteraciones.
  + Medios Excitables: Modelos como la reacción de Belousov-Zhabotinsky (formación de patrones espirales/ondas) o modelos de incendios forestales. Demuestran cómo reglas de interacción simples pueden llevar a comportamientos de propagación y patrones ricos.

### **4. Sistemas complejos**

Esta sección amplía la idea de la "complejidad" que emerge de la simplicidad de los ACs.

* Complejidad: La aparición de propiedades a gran escala a partir de dinámicas microscópicas simples. Los ACs son un buen ejemplo de esto.
* El Juego de la Vida (John Conway): Un ejemplo clásico de AC.
  + Reglas Simples: Celdas Vivas (1) o Muertas (0).
    - Muerta a Viva: Exactamente 3 vecinos vivos.
    - Viva a Muerta: Menos de 2 o más de 3 vecinos vivos (por soledad o superpoblación).
  + Comportamiento Complejo: A partir de estas reglas tan básicas, emergen patrones muy ricos: objetos estáticos, osciladores, "planeadores" que se mueven, y estructuras que pueden simular máquinas de Turing (¡computación universal!). Es increíble la variedad de comportamientos solo con esas pocas reglas.

### **5. Modelos de Gas Reticular (Lattice Gas Automata - LGA)**

Una aplicación específica de los ACs para simular gases y fluidos.

* Idea Principal: Simular un gas como un sistema totalmente discreto de partículas que se mueven en una celosía regular.
* Movimiento: Las partículas se mueven en direcciones discretas (según las "flechas" que indican su velocidad) a la celda vecina en cada paso de tiempo.
* Tipos de Celosía: Se pueden usar diferentes geometrías:
  + Cuadrada (HPP model): Las partículas solo se mueven horizontal o verticalmente.
  + Hexagonal (FHP model): Seis direcciones posibles, se obtiene al "deformar" una celosía cuadrada. Este es más interesante para fluidos porque tiene más simetría y ayuda a que las propiedades macroscópicas (como la conservación de momento) se comporten más realistamente.
* Modelado: Un intento de modelar la dinámica de fluidos de forma completamente discreta. Incluso con reglas muy simplificadas, se pueden observar patrones a gran escala (como remolinos) que recuerdan al flujo de fluidos reales.

### **6. Microdinámica de la AGL**

Aquí se detalla cómo las partículas interactúan en los modelos de gas reticular.

* Movimiento Detallado: Las partículas se mueven en una celosía con velocidades discretas.
* Colisiones: Cuando las partículas chocan en un sitio de la celosía, interactúan y cambian sus direcciones/velocidades de acuerdo con reglas específicas de colisión.
* Sub-pasos: El proceso se divide conceptualmente en dos:
  1. Colisión: Las partículas que llegan a un mismo punto chocan y cambian sus velocidades.
  2. Propagación (Streaming): Las partículas, con sus nuevas velocidades, se mueven a las celdas vecinas.
* Números de Ocupación: n\_i(r, t) representa si hay una partícula en la posición r con una velocidad v\_i en el tiempo t. Esto es clave para las ecuaciones.
* Formulación Matemática: La microdinámica se describe con ecuaciones que combinan los pasos de colisión y propagación. (Es como n(r + v\*Δt, t + Δt) = n(r, t) + Ω(n(r, t)), donde Ω es el operador de colisión).
* Conservación: Estos modelos se diseñan para conservar propiedades físicas como la masa y el momento (aunque a veces pueden conservar "demasiado" momentum o tener otras invariantes no físicas como el "tablero de damas", lo que puede generar artefactos).

### **7. Modelos de autómatas celulares para el tráfico**

Un ejemplo práctico y cercano de aplicación de los ACs.

* Sistema discreto y simplificado: Una forma de modelar el movimiento de coches en un carril de forma muy básica pero efectiva.
* AC 1D, 2 Estados: Típicamente, cada celda representa un segmento de la carretera y puede estar "vacía" o "ocupada por un coche".
* Regla Clave: Un coche solo se mueve si la celda delante de él está vacía. Si hay un coche delante, no se mueve. (Regla de Wolfram 184).
* Comportamiento Emergente: A pesar de la simplicidad, este modelo puede capturar fenómenos de tráfico como:
  + Formación de atascos: Si el espacio entre coches es insuficiente, se genera una "onda" de frenado.
  + Tiempo de viaje: La simulación puede mostrar cómo el tiempo de viaje se vuelve impredecible o largo durante las horas pico, similar al tráfico real. La variabilidad del tiempo de viaje es una métrica importante.
* Resultados realistas: Sorprendentemente, estos modelos, aunque abstractos, pueden dar estimaciones muy buenas de la situación real del tráfico.

**Consideraciones generales del módulo:**

Este módulo deja al descubierto la versatilidad de los Autómatas Celulares. La idea de que reglas locales y simples puedan dar lugar a patrones globales y comportamientos complejos es súper potente. Desde simular gases hasta entender el tráfico, los ACs ofrecen una herramienta de modelado discreta que es computacionalmente eficiente y conceptualmente elegante. Ver cómo fenómenos macroscópicos emergen de interacciones microscópicas es bastante interesante en este capítulo.