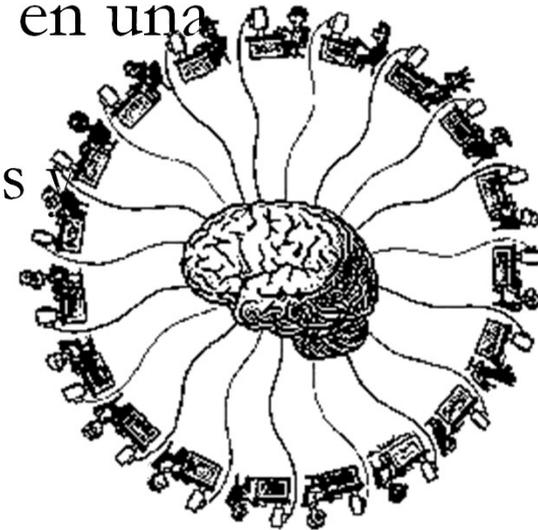


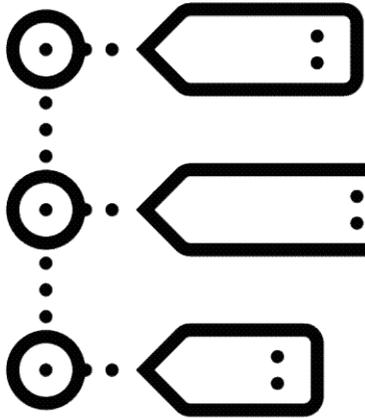
# De la Inteligencia Colectiva a los Sistemas Complejos

Inteligencia Colectiva y Sistemas de Recomendación  
Master Propio en Data Science y Big Data

# Inteligencia Colectiva

- El término aparece por primera vez en **sociobiología**, ciencias políticas, y en contextos de acciones masivas y de aplicaciones crowdsourcing.
- La **inteligencia colectiva** es una forma de inteligencia que surge de la colaboración y concurso de muchos individuos, generalmente de una misma especie. [...] Aparece en una amplia variedad de formas de toma de decisiones consensuada en bacterias, animales, seres humanos y computadoras (Wikipedia).





# Inteligencia Colectiva

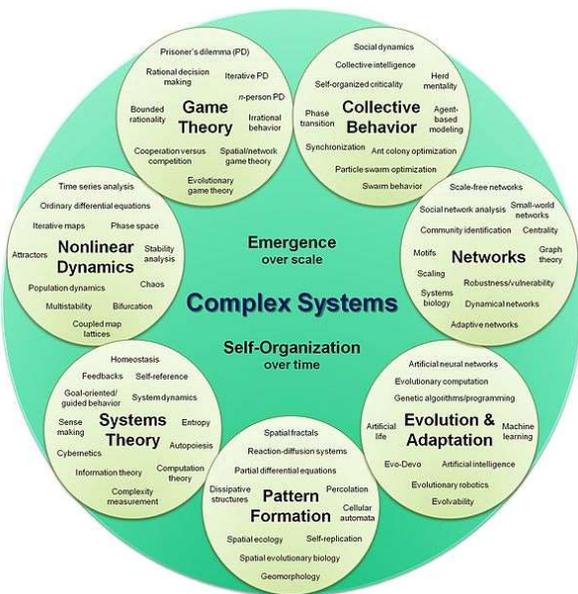
- Kropotkin (1902): en su obra *El apoyo mutuo* se refiere a la inteligencia colectiva de pequeños animales e insectos como abejas u hormigas.
- W.M. Wheeler (1911): introduce el concepto de **superorganismo**.
- E. Durkheim (1912): identificó a la sociedad como el recurso único del pensamiento lógico humano. Argumenta que la sociedad constituye una inteligencia mayor porque trasciende al individuo en espacio y tiempo.
- Hiltz y Turoff (1978): “... una capacidad de decisión colectiva, al menos, tan buena o mejor que la de cualquier miembro individual del grupo”.
- Smith (1994): “... un grupo de seres humanos que realizan una función como si el grupo fuese un organismo inteligente coherente trabajando con un mismo propósito, en lugar de una colección de agentes independientes”.
- Levy (1995): “... una forma de inteligencia universalmente distribuida, constantemente mejorada, coordinada en tiempo real, y terminando con la mejora efectiva de habilidades”.

# Inteligencia Colectiva

Veamos que no es un proceso exclusivo de los seres humanos, y que realmente responde a un patrón mucho más general que puede ser observado en muchos otros ámbitos ...

... para ello, hemos de introducirnos en un tópico **transdisciplinar** que ha determinado la evolución de la Ciencia de los últimos años ...

... los **Sistemas Complejos**

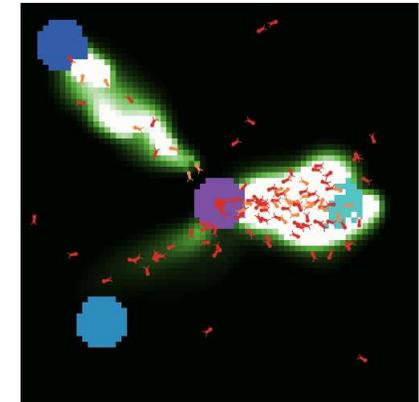


# ¿Qué es un sistema complejo?

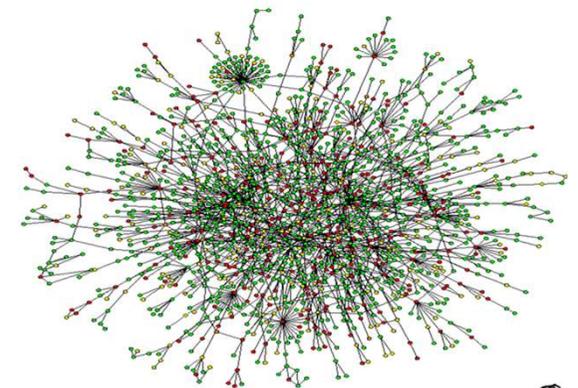
- **Concepto Multidisciplinar y Transdisciplinar:**  
Biología, Química, Física, Matemáticas, Ciencias Sociales...
- **Sin definición unificada ni rigurosa.**
- Lo que nos lleva a una **aproximación fenomenológica...**  
qué se observa y qué comparten...

# Fenomenología de los Sistemas Complejos

- Sistema formado por un elevado número de **componentes elementales que interactúan** de forma local entre ellos y con el entorno.
- Los componentes son relativamente similares entre sí (al menos por familias).
- La evolución temporal es complicada de **predecir**.
- Aparecen comportamientos difíciles de explicar a partir de las reglas.
- Las **interacciones no** suelen ser **lineales**: existen procesos de retroalimentación/inhibición en las mismas.
- Pueden variar su estructura con el tiempo: nuevos elementos, nuevas interacciones,... son **sistemas dinámicos**.



Las hormigas depositan más feromona cuanto mayor densidad de feromonas exista.



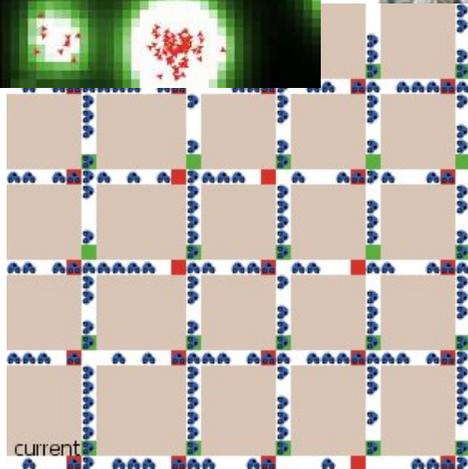
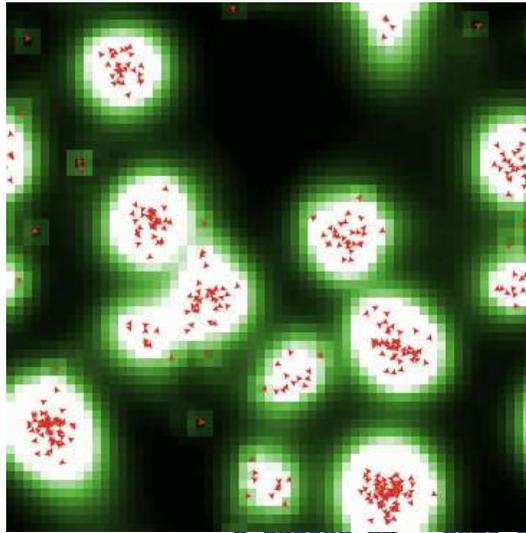
# More is different!

P.W. Anderson,  
*Science* **177** 393-396 (1972)

Sistemas **cuantitativamente** muy grandes son **cualitativamente** diferentes.

Comportamientos **microscópicos simples** dan lugar a comportamientos **macroscópicos complejos**.

# Ejemplos y análisis de Sistemas Complejos



# Colonias de insectos

En una colonia de hormigas podemos observar:

- Toma de decisiones colectivas
- Organización sin existencia de líderes



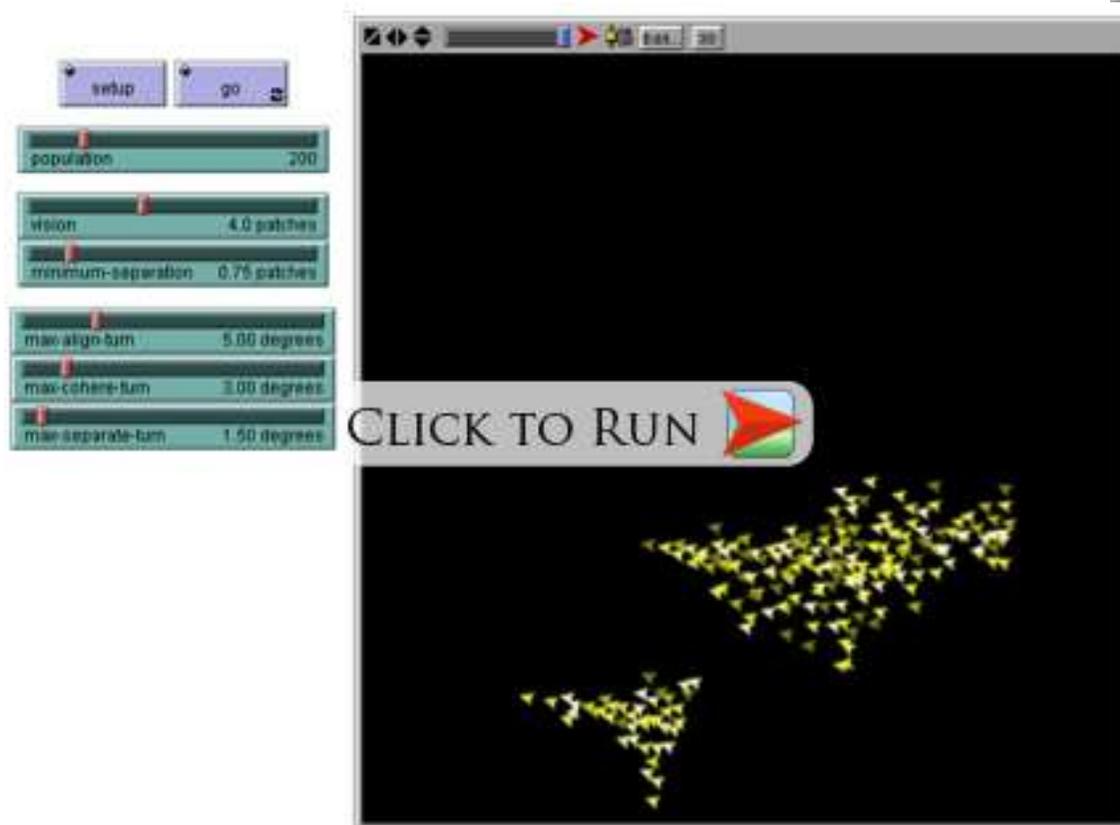
Mecanismos básicos:

- Al moverse cada hormiga deposita una señal química.
- Las otras hormigas pueden detectar el rastro y seguir el gradiente químico.



*Harvester ant*  
(Deborah Gordon, Stanford University)

# Colonias de insectos



*Harvester ant*  
(Deborah Gordon, Stanford University)

# Colonias de insectos

Tenemos:

- Reglas individuales de comportamiento.
- Emergencia de comportamiento colectivo.
- Sin líderes. Sin mapas del terreno.
- Interacciones locales.
- Transición de fase en el número crítico de hormigas.



*Harvester ant*  
(Deborah Gordon, Stanford University)

# Movimientos en grupo

Podemos observar:

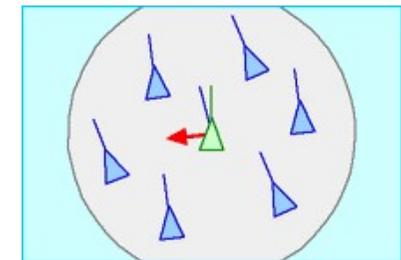
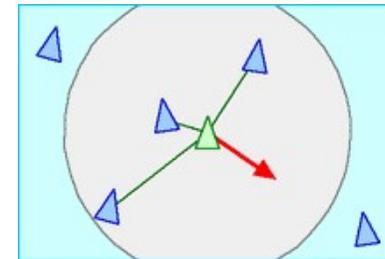
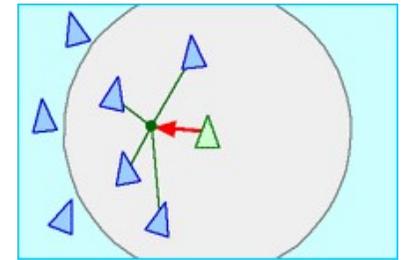
- Coordinación en el movimiento de cientos de individuos.
- Significado adaptativo: defensa contra presas, incrementar eficiencia.



# Movimientos en grupo

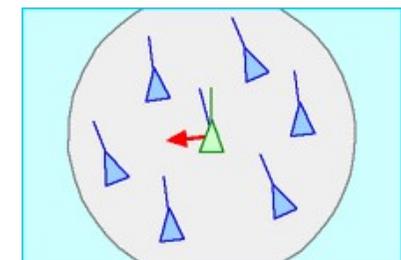
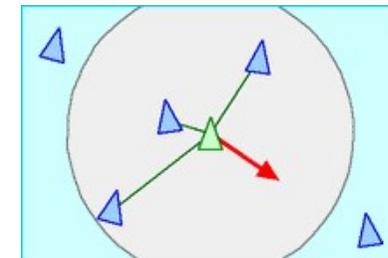
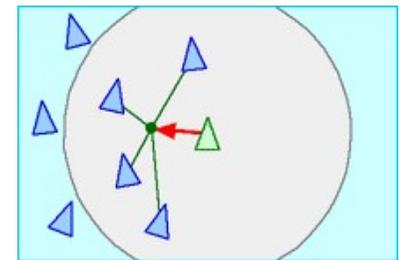
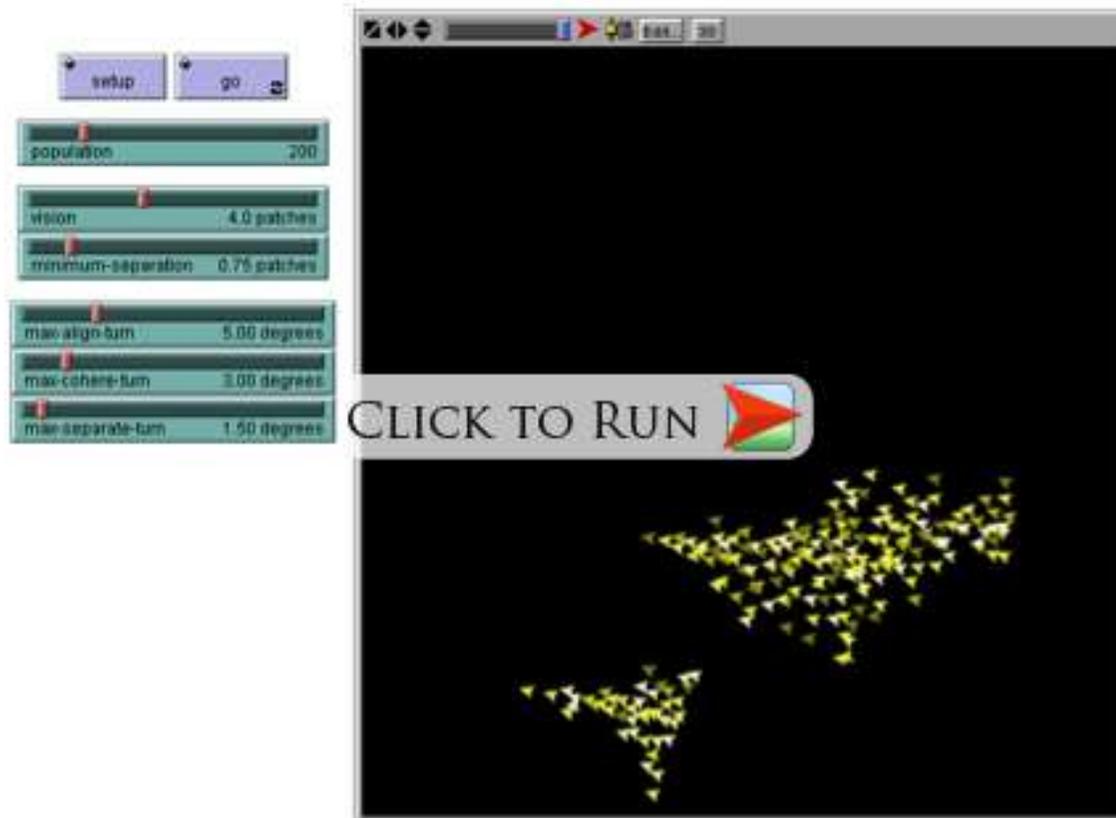
## Mecanismos Básicos:

- Cada individuo ajusta la posición de acuerdo con sus vecinos más próximos.
- Trata de mantener una separación.
- Adopta una alineación con los vecinos



Boids, Craig Reynolds

# Movimientos en grupo



Boids, Craig Reynolds

# Movimientos en grupo

Tenemos:

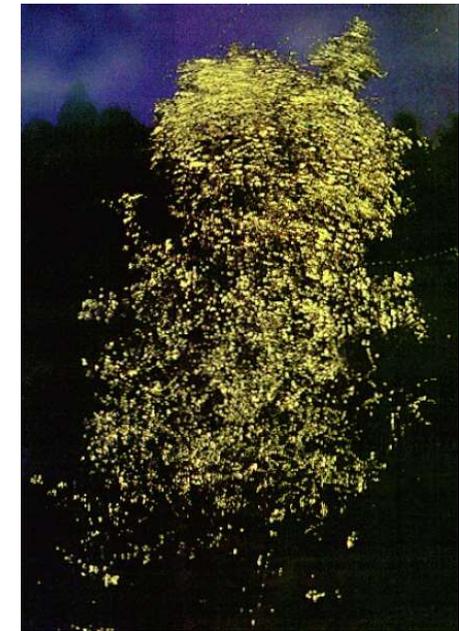
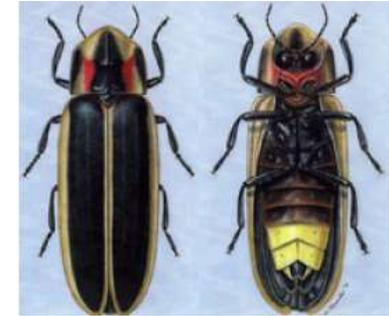
- Reglas individuales simples
- Emergencia de movimiento organizado colectivo.
- Sin líder, sin existencia de puntos de referencia.
- Interacciones locales.



# Sincronización

Podemos Observar:

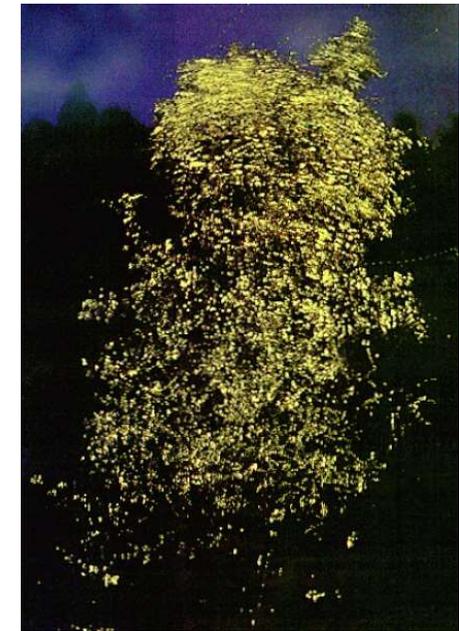
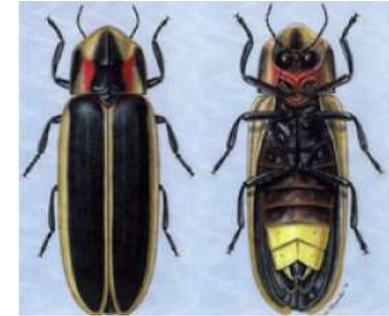
- Número elevado de individuos que comienza a emitir destellos de forma no sincronizada.
- Al cabo de un tiempo los destellos se sincronizan.
- La organización permite emitir destellos de mayor intensidad.



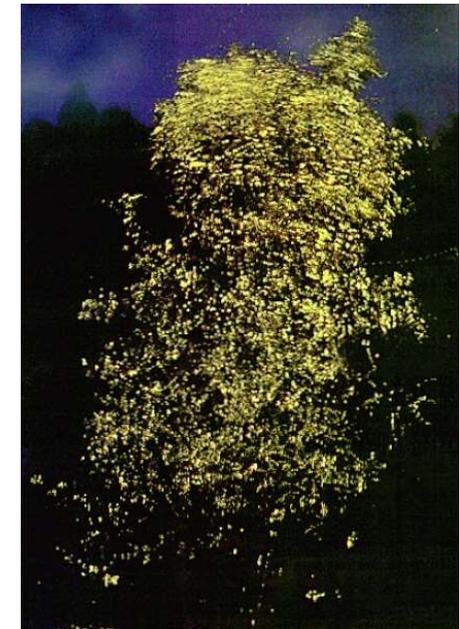
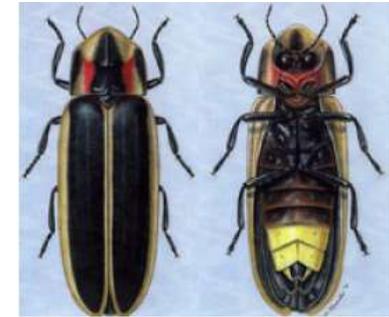
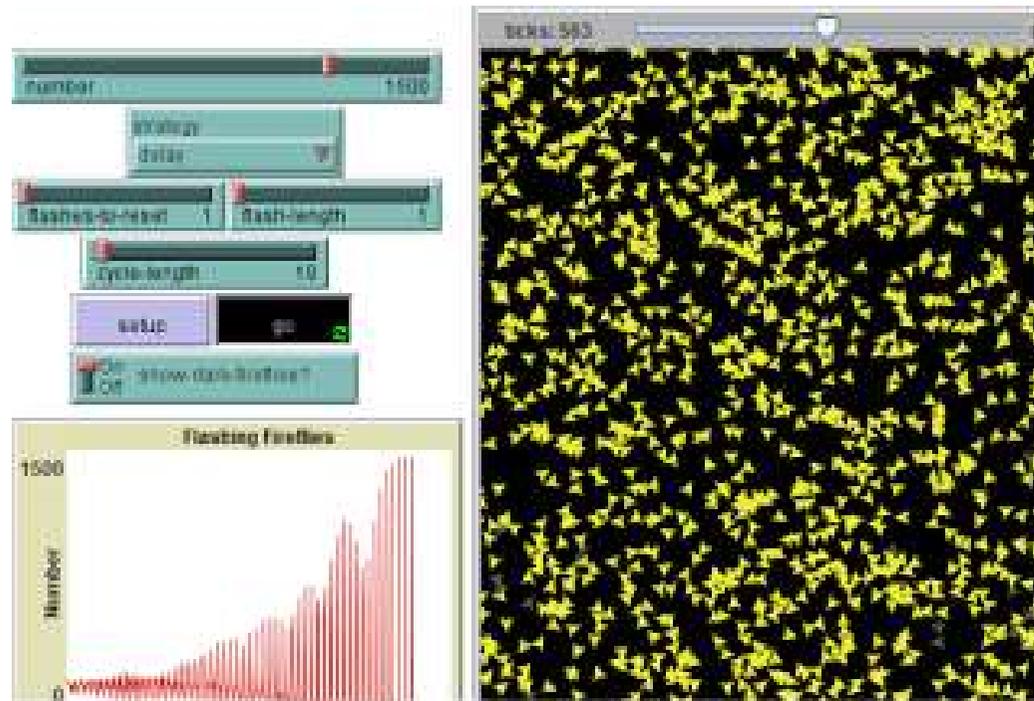
# Sincronización

Mecanismos Básicos:

- Cada individuo emite un destello,
- ... tiene un ciclo interno regulador,
- ... trata de ajustar el momento del destello mirando a sus vecinos más próximos.



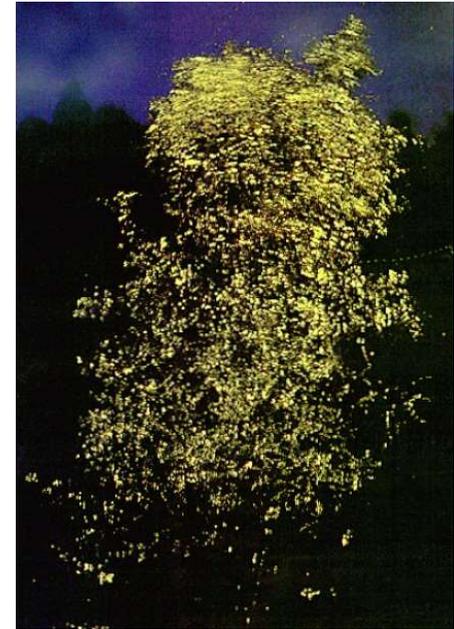
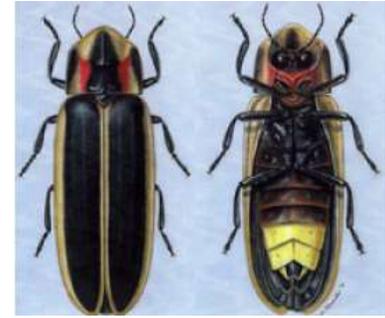
# Sincronización



# Sincronización

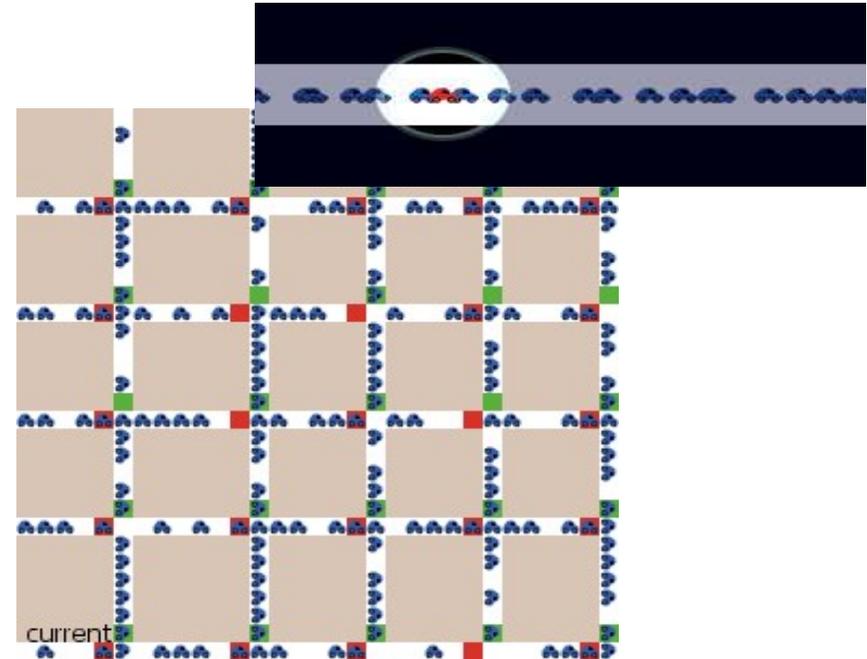
Tenemos:

- Reglas individuales simples.
- Emergencia de sincronización colectiva.
- Sin conductores (internos o externos).
- Interacciones locales.



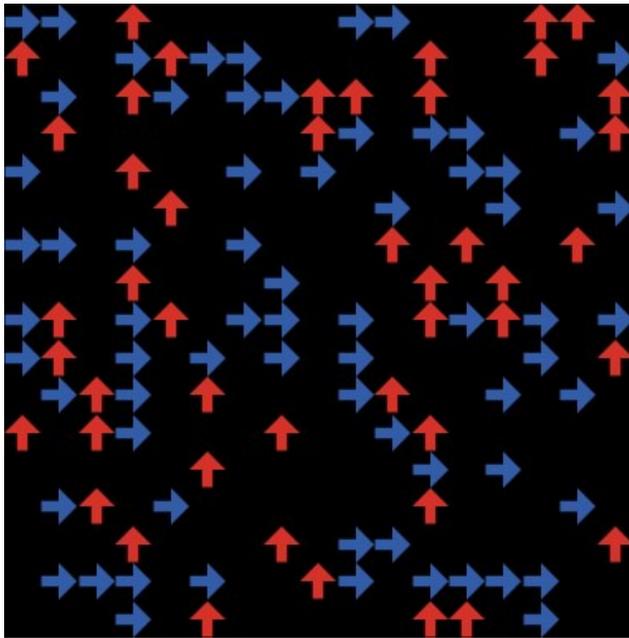
# Modelos de tráfico

- Existen varios modelos que estudian el tráfico desde el punto de vista de los atascos.
- En todos ellos el tráfico se modela por medio de **elementos discretos** que se mueven en una determinada **estructura**.



# Modelos de tráfico

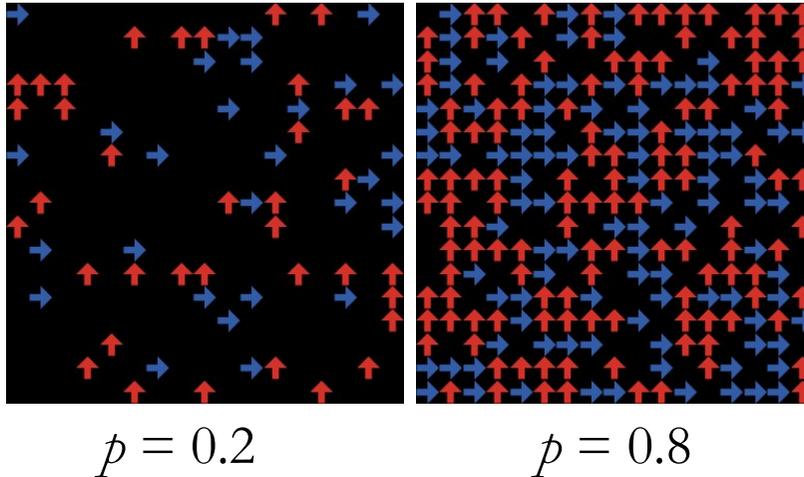
El modelo de **Biham-Middleton-Levine** es una de las aproximaciones más simples:



- Retículo rectangular periódico.
- Dos tipos de coches: Rojos hacia el Norte, Azules hacia el Este.
- Dinámica: primero se mueven los azules, luego los rojos.
- Totalmente **determinista**.

# Modelos de tráfico

- Parámetro:  $p$  determina la densidad de coches en la configuración inicial.
- Distintos comportamientos en función de  $p$ .

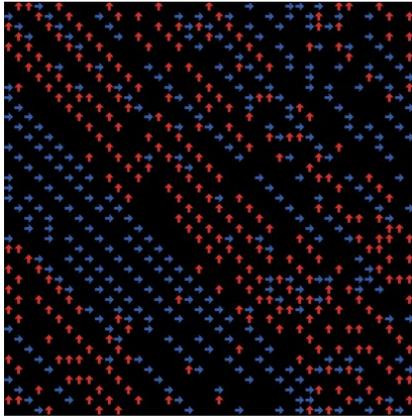


Variable fundamental de estudio

- **Velocidad media de una partícula:**  
nº de movimientos/ nº de pasos
- **Velocidad media del conjunto.**

# Modelos de tráfico

Algunos comportamientos:



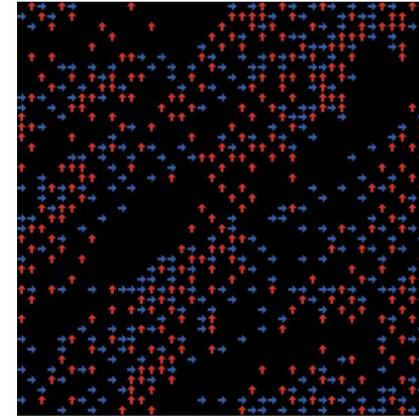
$$p = 0.36$$

El sistema se ha auto-organizado y todas las partículas se mueven libremente. La velocidad del sistema tiende a 1.



$$p = 0.40$$

Ninguna partícula puede moverse.

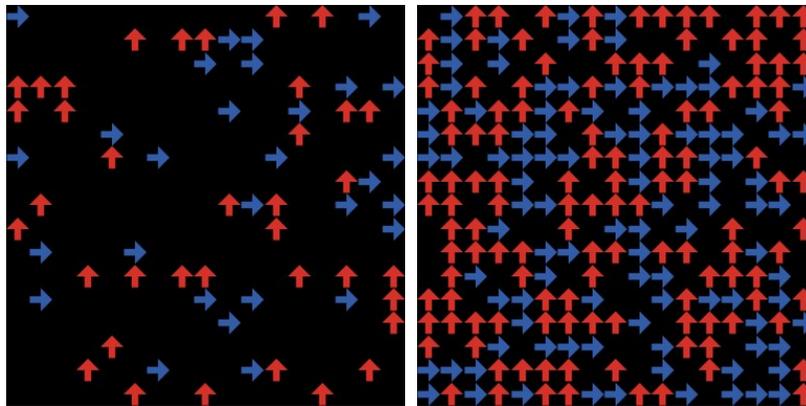


$$p = 0.38$$

Situación intermedia: algunas partículas se mueven; aparecen varios atascos de carácter local.

# Modelos de tráfico

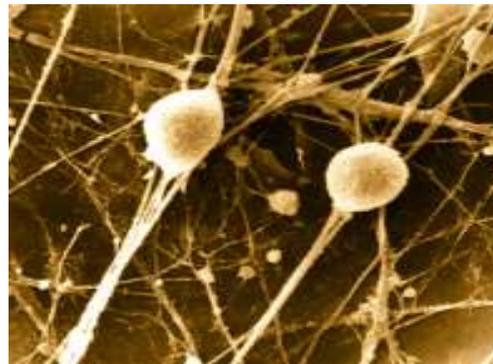
- Solo hay aleatoriedad en la configuración inicial.
- Cambio de comportamiento brusco en función de la densidad.
- Patrones de formación de atascos muy estructuradas.
- Repetición del comportamiento para mismos valores de  $p$ .



... y algunos fenómenos comunes  
a los Sistemas Complejos son ...

# Emergencia

- En la dinámica del conjunto global surgen propiedades inesperadas que, en principio, no se deducen de las propiedades de los elementos aislados que forman el sistema.
- Las propiedades que aparecen no son sencillas de predecir a priori.
- La emergencia de propiedades aparece a diferentes escalas.
- Aparecen propiedades emergentes distintas aunque se sigan las mismas reglas de evolución: moléculas de agua pueden formar gases, líquidos o sólidos cristalinos.



# Emergencia: Auto-organización

- Una de las propiedades emergentes más interesante es la **auto-organización**.
- En muchos sistemas la estructura macroscópica que se observa al evolucionar el sistema es altamente ordenada.
- El orden es dinámico, no estático.
- El orden aparece sin necesidad de intervención externa al sistema y sin la existencia de líderes dentro del propio sistema.



# Transiciones de fase

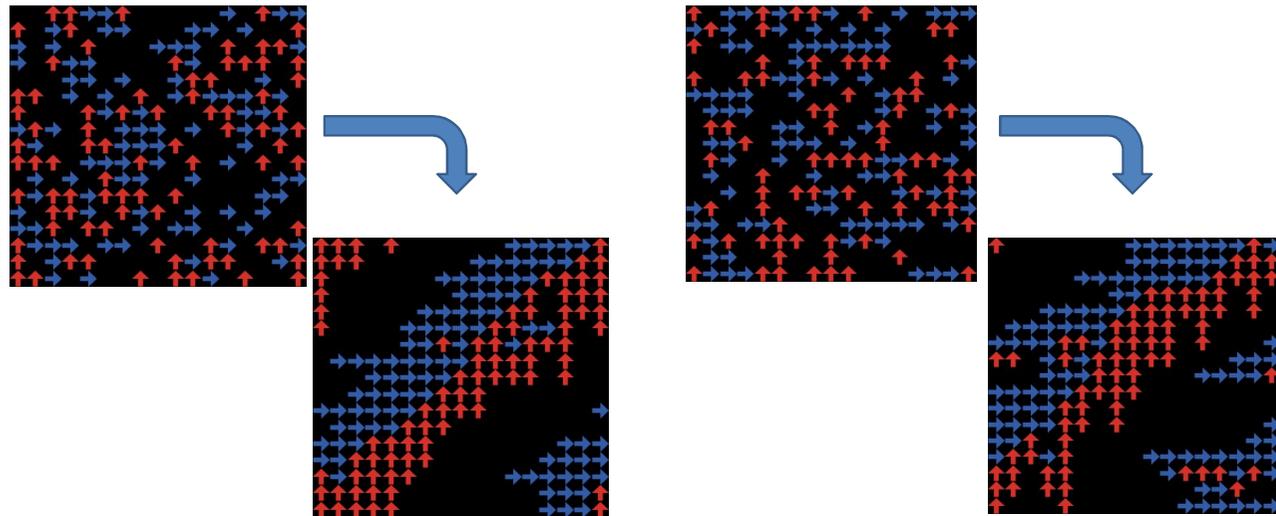
- El modelo matemático del sistema depende de ciertos parámetros con los que podemos controlar pautas de comportamiento del mismo: *temperatura, densidad, masa, velocidad, ...*
- Hay regiones de valores en el espacio de los parámetros que separan zonas muy diferenciadas de comportamientos en el sistema: el cambio de una región a otra ocasiona pérdida de simetrías o la transición de cambios de estado en el sistema.

Una transición de fase conocida: Si la temperatura de un cazo con agua se incrementa de 99° a 101° grados, ¡la densidad decrece por un factor de 1600!



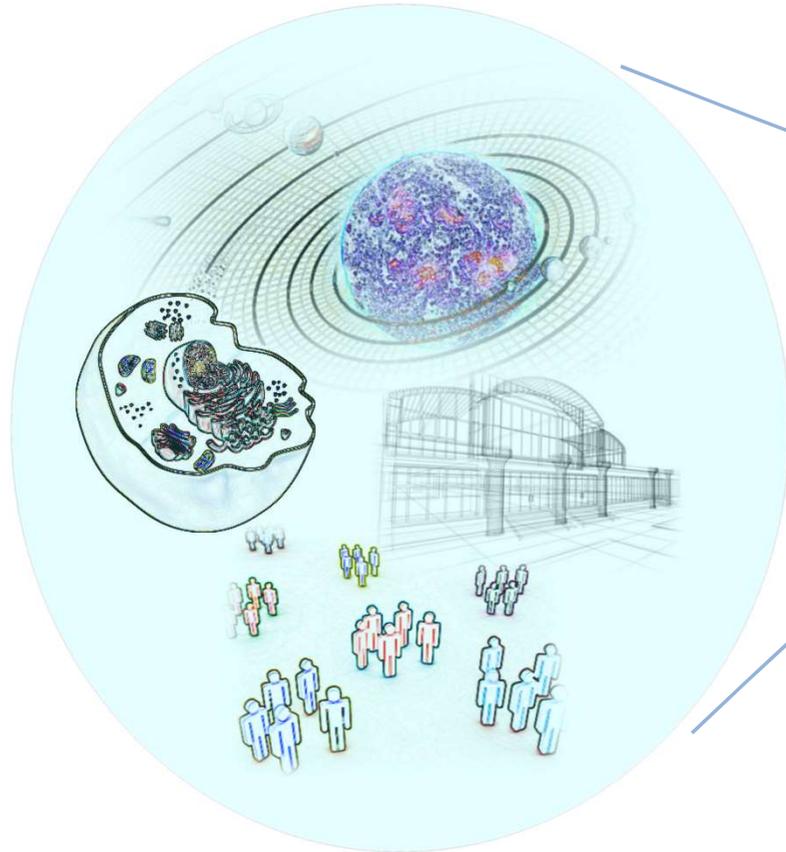
# Robustez

- Fijados los valores de los parámetros, muchos sistemas complejos muestran la cualidad de ser muy estables, incluso aunque exista aleatoriedad en la configuración inicial.
- Aunque existan procesos aleatorios en la evolución temporal, el sistema tiende casi siempre a estados muy similares.
- En muchos sistemas si realizamos ciertos cambios en medio de su evolución, éstos son asumidos por el sistema, que recupera su comportamiento habitual a pesar de ellos.



Modelando la complejidad ...

# Conocer el mundo

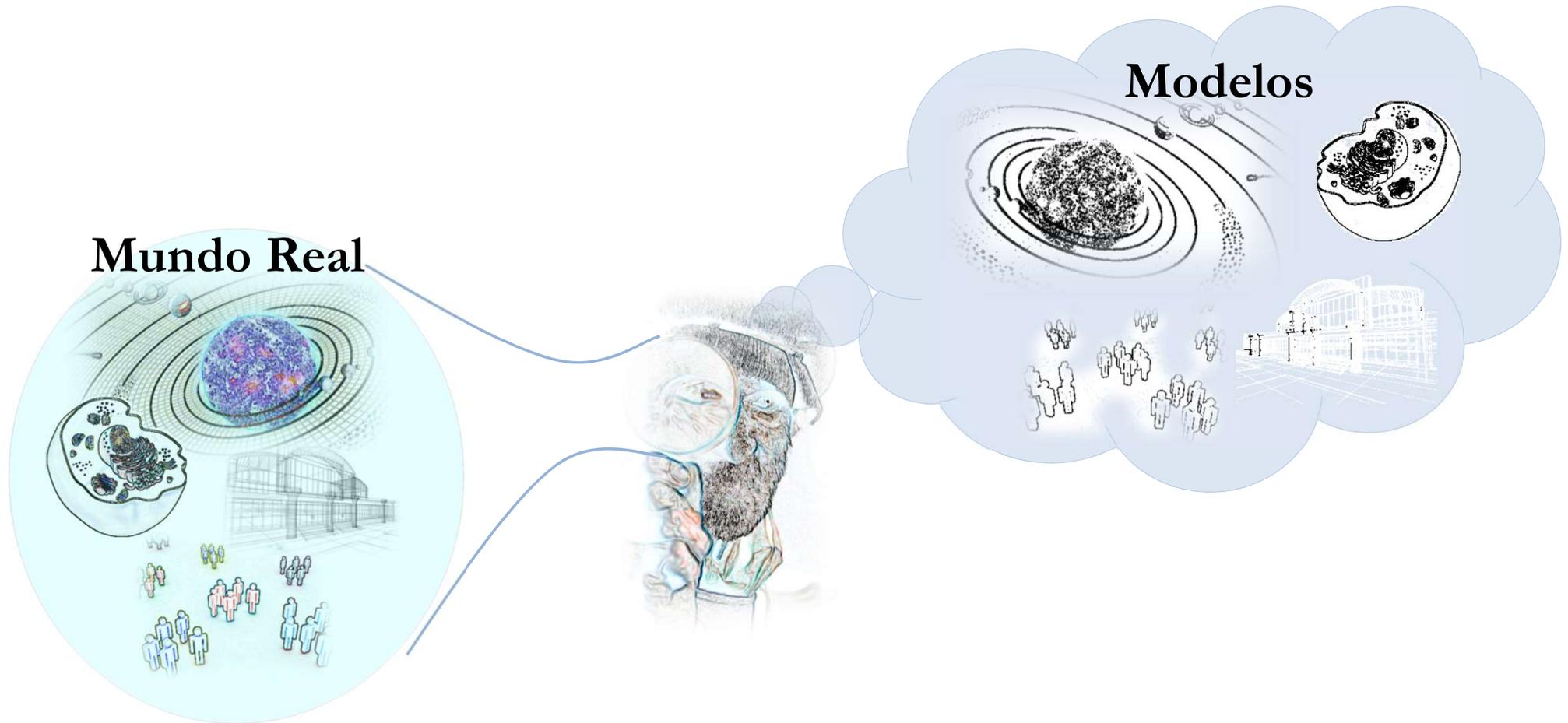


Método Científico



- Observación
- Formulación de Hipótesis
- Experimentación
- Tesis (o refutación)

# Modelar el mundo



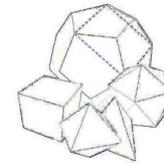
# Qué es un modelo

Un modelo constituye una **representación abstracta** de cierto aspecto de la realidad. Formada por:

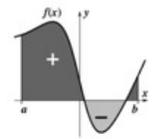
- los **elementos** que caracterizan el aspecto de la realidad modelada
- y por las **relaciones** entre esos elementos

## Modelado Matemático

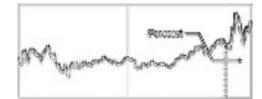
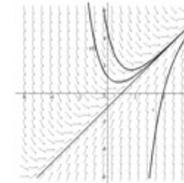
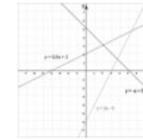
- Teorías Matemáticas



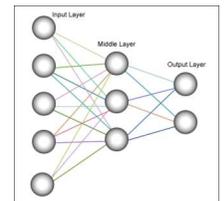
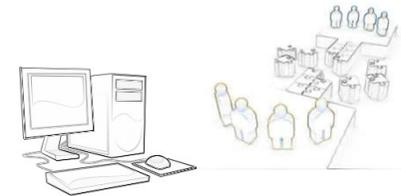
$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$$



- Modelos Numéricos

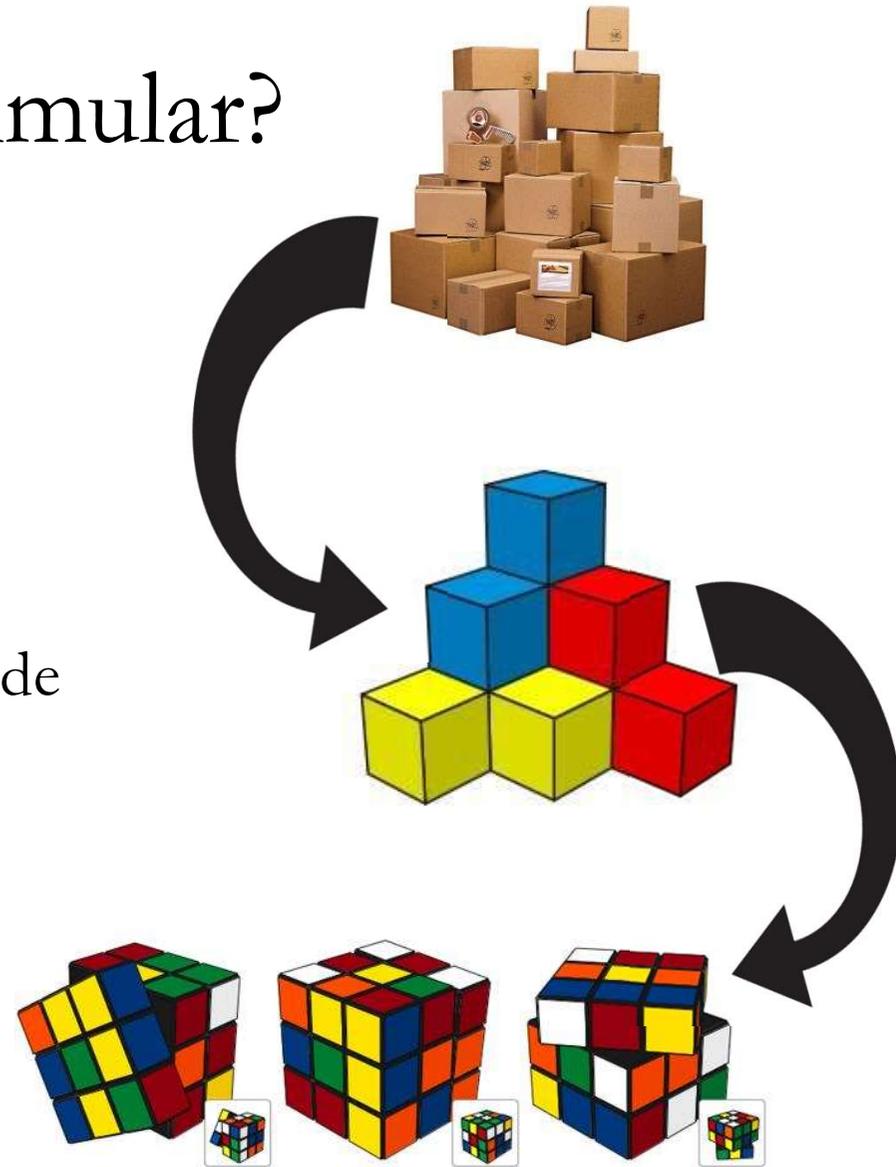


- Modelos Computacionales

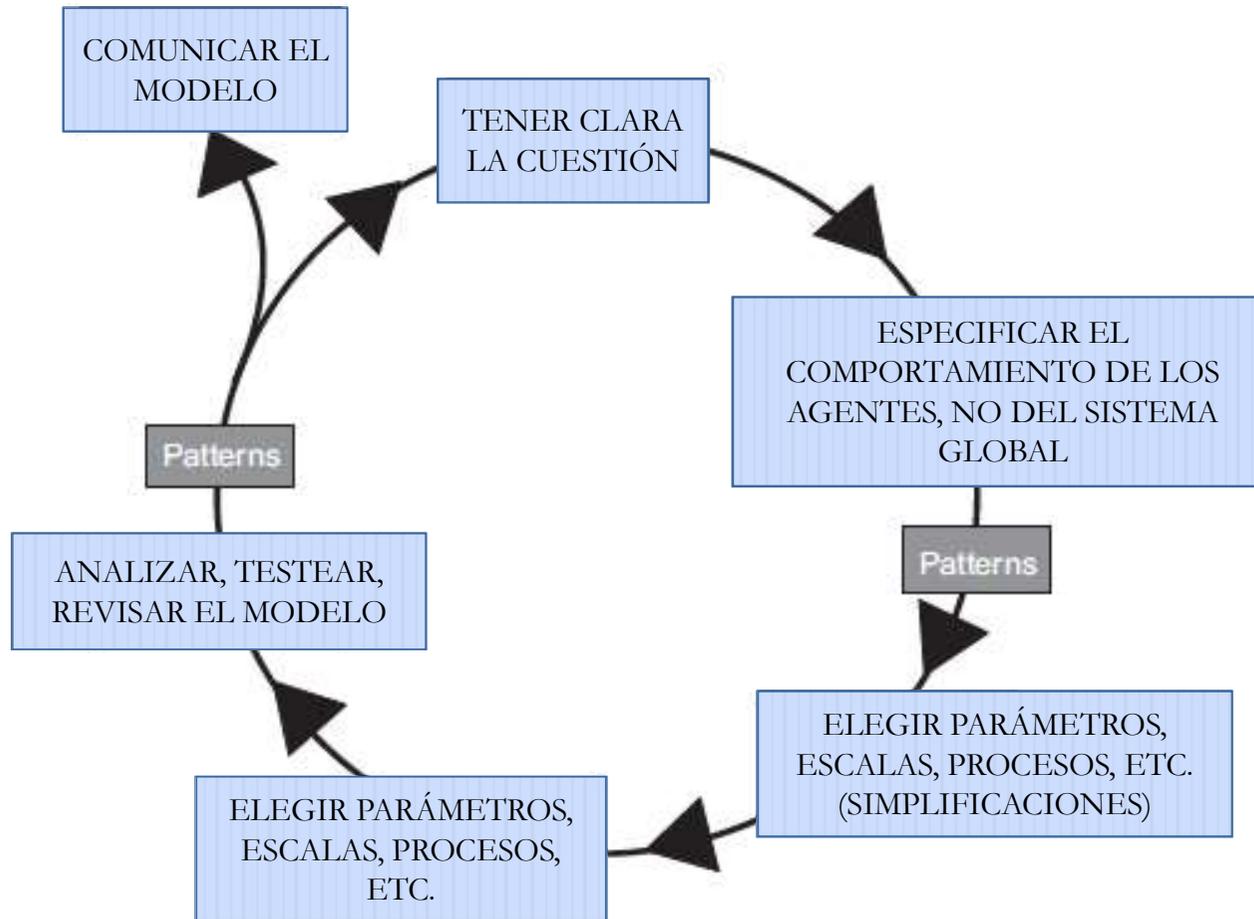


# ¿Modelar... o Simular?

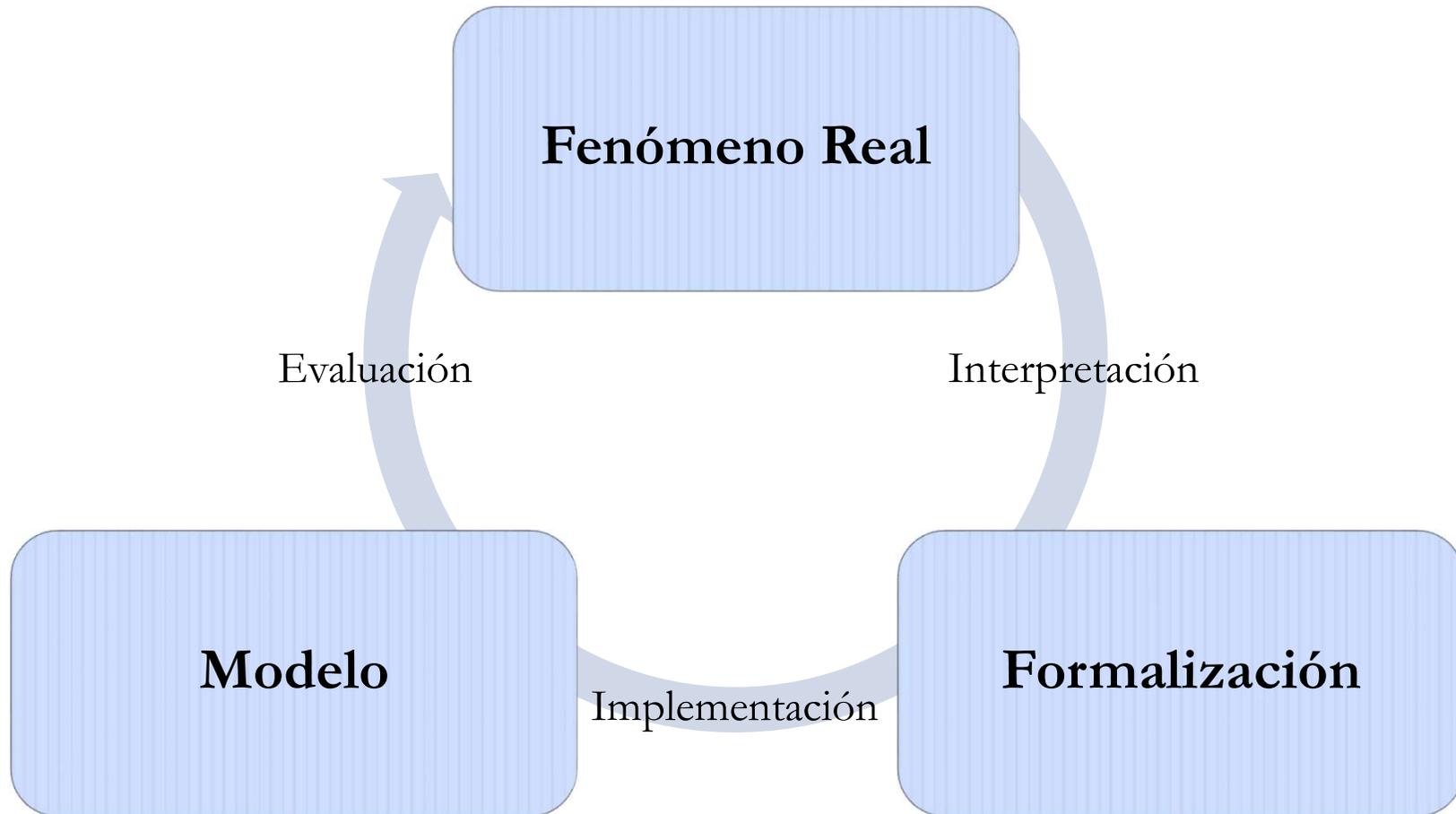
- ¿Qué es **modelar**?
  - Sirve para entender mejor la estructura e interrelaciones de un sistema.
  - Exige reflejar formalmente cada parte del problema/sistema
  - Puede proporcionar métodos alternativos de resolución
- ¿Qué es **simular**?
  - Sirve para entender la dinámica de los sistemas estudiados
  - Proporciona medios de experimentación



# El Ciclo de Modelado-Simulación



# El Ciclo de Modelado-Simulación



# Modelado de la Complejidad

- Las aproximaciones clásicas no funcionan bien con el modelado de Sistemas Complejos:
  - La complejidad surge de las interacciones de todo el sistema
  - ... no funciona la simplificación como medio de modelado
  - Muestran alta impredecibilidad
- Entre las vías actuales existen 4 que destacan:
  - Sistemas Dinámicos (entendidos como casos de EDO's o EDP's)
  - Sistemas Multiagente
  - Redes Complejas
  - Modelado por Datos