

# **Modelado y Simulación de Sistemas Complejos con Aplicaciones en Economía**

Primer Encuentro y Bienvenida

1er Cuatrimestre de 2024

FCEyN, UBA

# Docentes

- **Dr. Rodrigo Castro.** Modelado y Simulación de sistemas complejos interdisciplinarios.
  - Instituto de Ciencias de la Computación (ICC, UBA-CONICET), FCEyN-UBA
- **Dra. Viktoriya Semeshenko.** Sistemas complejos en economía. Redes.
  - Instituto Interdisciplinario de Economía Política (IIEP, UBA-CONICET), Netlab. FCE, UBA
- **Dr. Daniel Heymann.** Macroeconomía, Sistemas complejos en economía
  - Instituto Interdisciplinario de Economía Política (IIEP, UBA-CONICET), FCE, UBA
- **Dr. Igal Kejsefman.** Análisis de estructura económica y análisis de datos en economía.
  - Instituto de Economía y Sociedad en la Argentina Contemporánea (IESAC-CONICET), Univ. Nacional de Quilmes
- **Mg. Ayelén Bargados.** Análisis económico y análisis de datos en economía
  - Facultad de Ciencias Económicas, UBA
- **Lic. Agustin Caputo Bugallo, Lic. Tobias Carreira Munich** (SEDLab, FCEyN, UBA)

# Modalidad de cursada

- Teóricas (9) y prácticas (8)
  - Cronograma actualizado en <https://campus.exactas.uba.ar/course/view.php?id=4178>
- 1 parcial intermedio
- 1 trabajo práctico final grupal  
(tamaño de 4 o 5, al azar)
- Prioridad en laboratorio: inscriptos regulares  
60 puestos en laboratorio  
(confirmar en hoja de asistencia hoy)
- Llenar encuesta!
- Medio oficial de contacto: Google group [[MSSCAE24](#)]

# Contenidos de curso - Primera parte

- Introducción a la Complejidad: Conceptos fundamentales de sistemas complejos, Fenómenos emergentes. Ley de Potencia.
- Modelos Computacionales: Introducción. Autómatas Celulares. Patrones y Reglas. Ejemplos
- Modelos Estadísticos: Introducción. Entropía. Principio de máxima entropía. Métodos de Monte Carlo. El modelo de Ising. Ejemplos.
- Leyes de Potencia: Propiedades. Mercados. Fenómenos críticos. Criticalidad auto organizada. Ejemplos.
- Redes Complejas y Aplicaciones: Propiedades y métricas. Topologías. Ejemplos
- Economía Computacional basada en Agentes y Expectativas Racionales. Expectativas Racionales.
- 1er parcial

# Contenidos de curso - Segunda parte

- Modelado Micro, Meso y Macroscópico: Escalas espacio temporales. Propiedades Emergentes. Clasificaciones. Ejemplos
- Aprendizaje Automático: Conceptos básicos. Clasificaciones. Ejemplos
- System Dynamics: Introducción. Representación de sistemas económicos mediante modelos continuos. Ventajas y desventajas. Diferencias y similitudes con agentes y sistemas complejos. Ejemplos.
- **Presentación de propuestas de temas de TP Final por grupos**
- **Experiencias prácticas en el diseño de políticas basadas en modelos.**  
**Expositores invitados**

# **Modelado y Simulación de Sistemas Complejos con Aplicaciones en Economía**

Clase 1

Introducción a la Complejidad

# ¿Qué es un Sistema Complejo?

**Cerebro:** la interacción entre neuronas y células produce *comportamientos complejos* tales que la cognición y la inteligencia, o conciencia





**Economía:** Las interacciones de individuos, empresas y bancos entre sí (comprar/vender, pedir prestado/prestar) producen comportamientos complejos como burbujas y colapsos, crisis, recesiones e inflaciones.

## Red Financiera Internacional

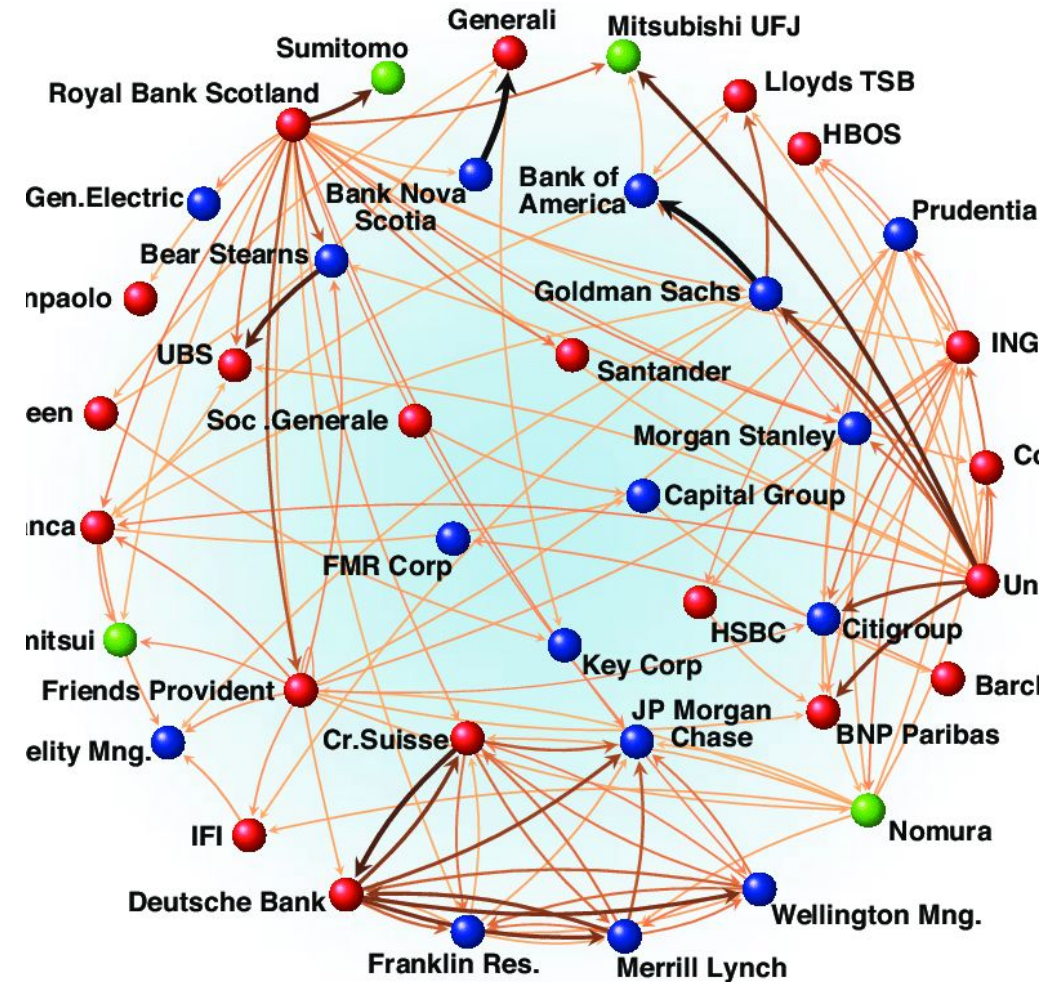
**nodos:** principales instituciones financieras

(**rojo**) - Miembros de la Unión Europea

(**azul**) - Norteamérica

(**verde**) - otros

**enlaces** (dirigidos y ponderados)



# El Puente del Milenio en Londres - Innovación del Norte

- El puente colgante peatonal sobre el río Támesis (1998-2000)
- El diseño ganador de 'lámina de luz' fue muy innovador, realizado por Arup (ingenieros), Foster & Partners (arquitectos) y Sir Anthony Caro (escultor)
- Dos aperturas oficiales: inaugurado oficialmente por la Reina el 10 de junio de 2000. Dos días después se volvió a cerrar. Reabrió definitivamente el 27 de febrero de 2002
- Total de 80.000 personas cruzaron el puente el día de su inauguración, y aprox de 2.000 en promedio



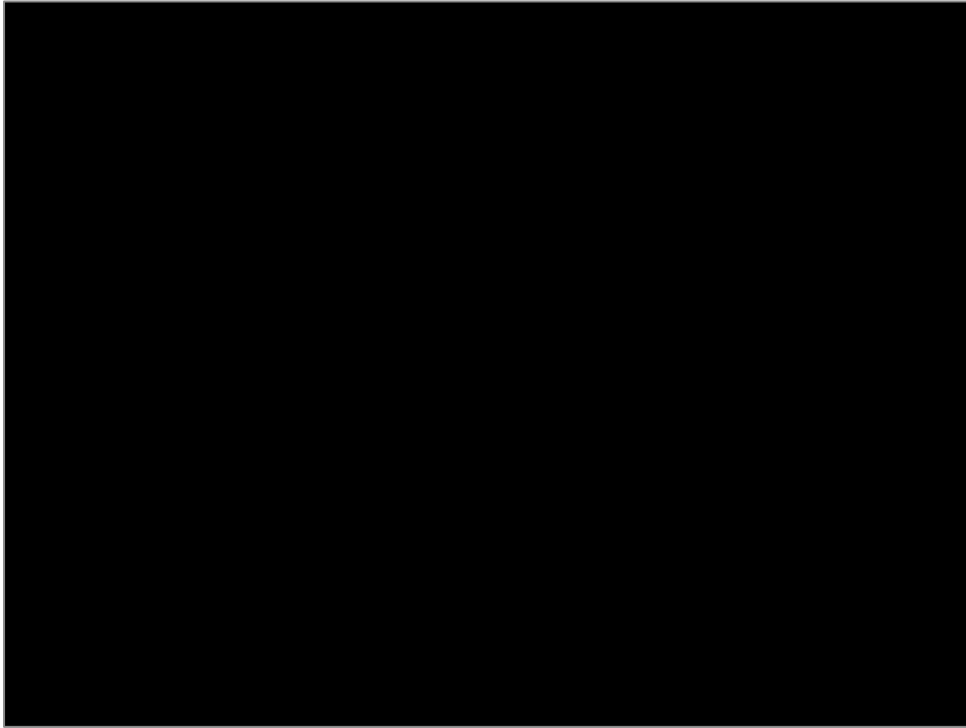
# ¿Por Qué el Puente del Milenio se llama el Puente del Tembleque?

- La innovación de ingeniería: Construir los puentes colgantes con 'suspensión lateral'
- Fenómeno emergente: Excitación Lateral Sincrónica
- La vibración se retroalimenta con el movimiento de peatones sincronizado espontáneamente
- [...Al sentir que el puente comenzaba a balancearse y torcerse en oscilaciones regulares, y perder la estabilidad, los peatones cambiaron su marcha al mismo ritmo lateral que el puente. A su vez, los pasos ajustados magnificaron el movimiento: cuanto más sucedía, más gente respondía al movimiento...]
- El problema se solucionó con diferentes tipos de amortiguadores

# El Puente del Milenio



# ¿ Qué aprendemos del Puente del Tembleque ?



- Los encargados del proyecto no anticiparon las oscilaciones y comportamiento colectivo
- La **sincronización espontánea** es un fenómeno emergente y complejo (*flocks*)



# ¿Por qué se tambaleó el Puente del Milenio ([Strogatz](#))?

The problem, says Strogatz, was one of crowd dynamics as much as engineering. The bridge surpassed standards for withstanding weight and wind. **Every nonhuman element had been tested.**

Instead of focusing on the structure, Strogatz examines the strange phenomenon of people unknowingly working together, simply by walking.

The military has known for years that troops marching in step can **create enough vertical force to destroy a bridge. It is standard practice for soldiers to break step at every bridge crossing.**

But the Millennium Bridge problem is not quite the same, says Strogatz. **In this case, the movement was lateral, not vertical. More importantly, the people were just pedestrians. No one was trying to walk in step; pedestrians did so only to accommodate the bridge's movement under their feet.**

**But which came first, the bridge's movement or the synchronous strides? And what set the whole thing off?**

EyN, UBA

"It's a chicken-and-egg problem," says Strogatz. "That's what our paper explains." From the beginning, the bridge had two factors working against it: It was by design a flexible structure, and its natural frequency is close to that of human walking. From there, Strogatz says, all it needed was a relatively small crowd to spark the wobble.

"If the people are initially disorganized and random, if a few of them get into sync by accident, the bridge would become unstable," he says. With a certain critical number of pedestrians, the wobbling becomes marked enough to force everyone into stride -- thus compounding the problem.

And the critical number of pedestrians, tested subsequently on the Millennium Bridge and derived independently by Strogatz and co-

todo lo que necesitaba era una multitud relativamente pequeña para provocar el bamboleo. El número crítico estimado fue tan solo 160 peatones.

contribution.

The Millennium Bridge reopened in 2002 after engineers fitted it with 91 dampers to absorb both lateral and vertical oscillations. The modifications cost about \$8.9 million.

If Strogatz' analysis is correct -- "and we hope someone will test J36RW... says -- engineers will be able to use it to prevent such

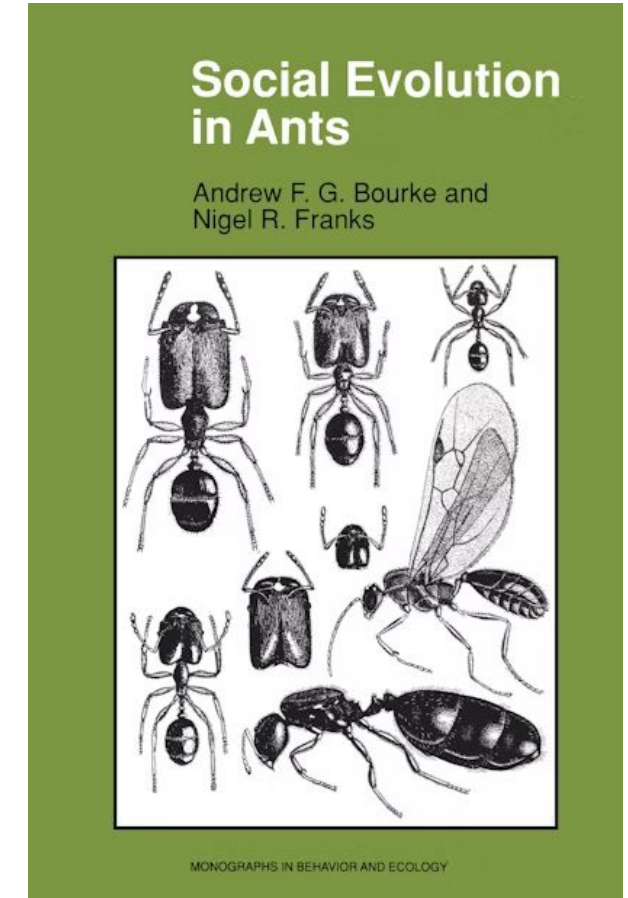
¿Cómo surgen estos comportamientos ?

# Comportamiento de Hormigas

**Nigel Franks** [...La hormiga solitaria soldado es uno de los animales menos sofisticados imaginables, hablando en comportamiento..

Si se colocan 100 hormigas en una superficie plana caminarán una y otra vez en círculos cada vez menores hasta que mueran de agotamiento ([Una espiral de muerte](#)). En números extremadamente altos, sin embargo, es una historia diferente]

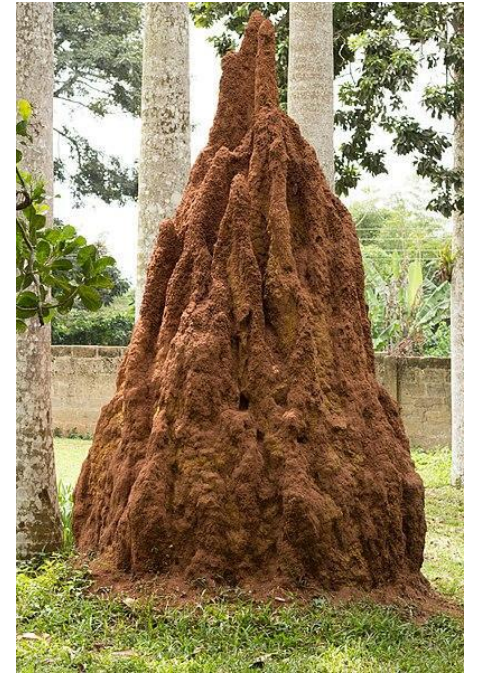
- self organization of ant colonies
- simple rules of interaction among worker ants generate complexity and sophistication at the level of the colony





# ¿Qué es una colonia de hormigas?

- Opera sin un control central o jerarquía.
- Las hormigas deciden qué hacer en función de la frecuencia, el ritmo y el patrón de encuentros e interacciones individuales, lo que resulta en una red dinámica que coordina las funciones de la colonia.
- **Las reglas principales:**
  - las hormigas recogen granos a un ritmo constante, aprox. 2 granos por minuto; prefieren dejarlos cerca de otros granos, formando un pilar; tienden a elegir granos previamente dejados por otras, probablemente debido al producto químico feromona.



# Puente de hormigas

- Ejemplo de hormigas que construyen puente con sus cuerpos para que otros miembros de la colonia puedan cruzar el hueco entre dos hojas:
  - <http://simonsfoundation.s3.amazonaws.com/jwplayer/AntArchitecture/AntBridgeVideo.mp4>

# La división del trabajo de recolección/defensa en los insectos sociales

- Termitas (arriba) y otro de hormigas (abajo), cada uno protegido por su propia columna de soldados enfrentados sin atacarse:
  - [https://twitter.com/Mehdi\\_Moussaid/status/1221728634760781824?s=20](https://twitter.com/Mehdi_Moussaid/status/1221728634760781824?s=20)

# Comportamiento de Hormigas

- un "sistema descentralizado y autoorganizado"
- Hofstadter, Douglas ([Gödel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid, 1979](#)) establece una amplia analogía entre las colonias de hormigas y los cerebros, ambos sistemas complejos en los que componentes relativamente simples con una comunicación limitada entre sí dan lugar colectivamente a un comportamiento complejo y sofisticado de todo el sistema ("global").

# ¿Qué es una bandada de pájaros?

- <https://youtu.be/F0RYPc0Dek0>
- **Las reglas principales:**
  - **Separación** - evitar aglomeración de vecinos (repulsión de corto alcance)
  - **Alineación** - dirigir hacia un rubro promedio de vecinos.
  - **Cohesión** - dirigir hacia la posición media de los vecinos (atracción de largo alcance)



# ¿Qué es una bandada de pájaros?

- [Andrea Cavagna et al.](#), University of La Sapienza, Italia, (2010)
  - Interacción Espacial: un pájaro interactúa con un número fijo de vecinos más cercanos (6 o 7), independientemente de su distancia geométrica.
- El comportamiento Flocking fue simulado por primera vez en un ordenador en 1987 por Craig Reynolds ([Reynolds, Craig W.](#) (1987)).
- El resultado es semejante a un bandada de pájaros, un banco de peces, o un enjambre de insectos.



# Traffic Jam without bottleneck - experimental evidence



World's worst traffic jam: 100km and 12 days en China en 2010

Rush Hour Traffic with motorcycle in Ho Chi Minh city - Vietnam

→ Carlos Gershenson [...letting transportation systems adapt and self-organize often works better than trying to predict and control them]

# Propiedades Comunes a Sistemas Complejos

- Unidades o agentes simples (simples en relación con todo el sistema)
- Interacciones no lineales entre agentes
- Sin control centralizado
- Comportamiento emergente
  - organización jerárquica
  - procesamiento de la información
  - dinámica
  - evolution and learning



# El Pionero del “Machine Translator”

- [Science and Complexity](#), American Scientist 36, 536 (1948)
- [C E Shannon](#), The Mathematical Theory of Communication (1949).

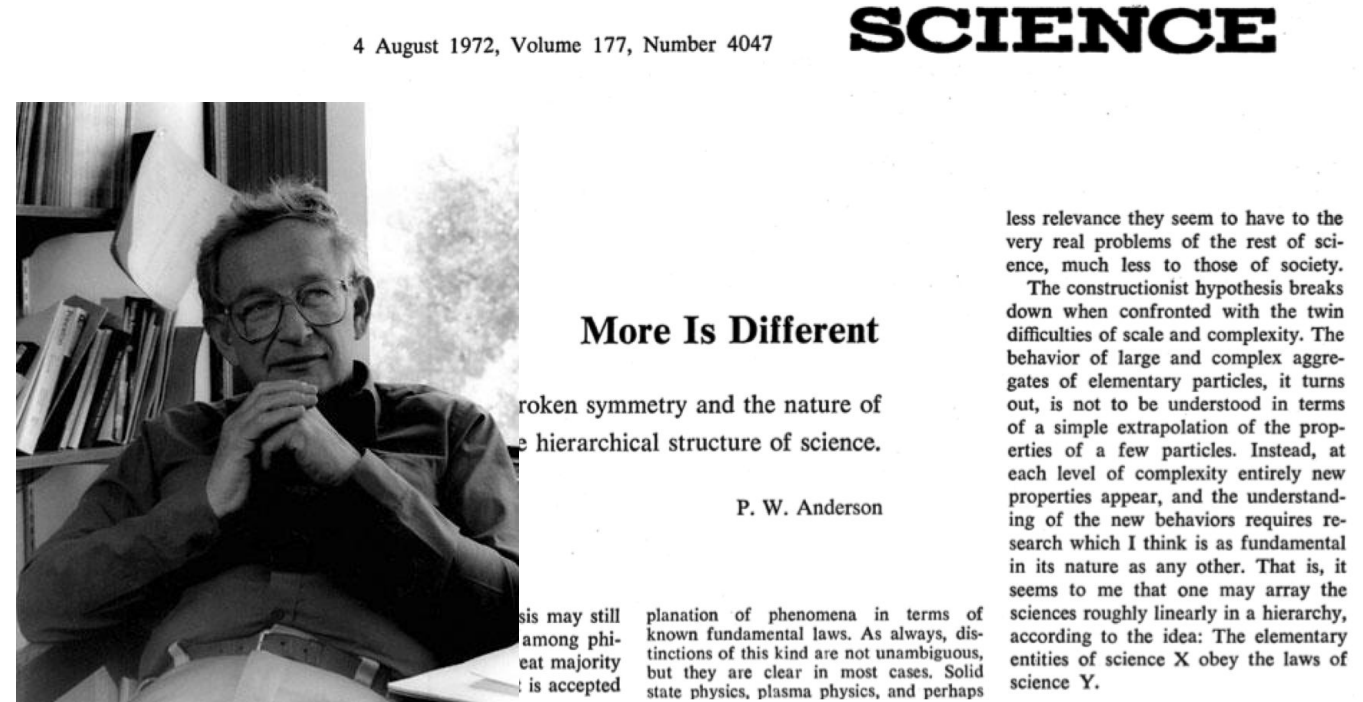
## Warren Weaver (1894–1978): Decoding



*When I look at an article in Russian, I say: “This is really written in English, but it has been coded in some strange symbols. I will now proceed to decode.” (1949)*

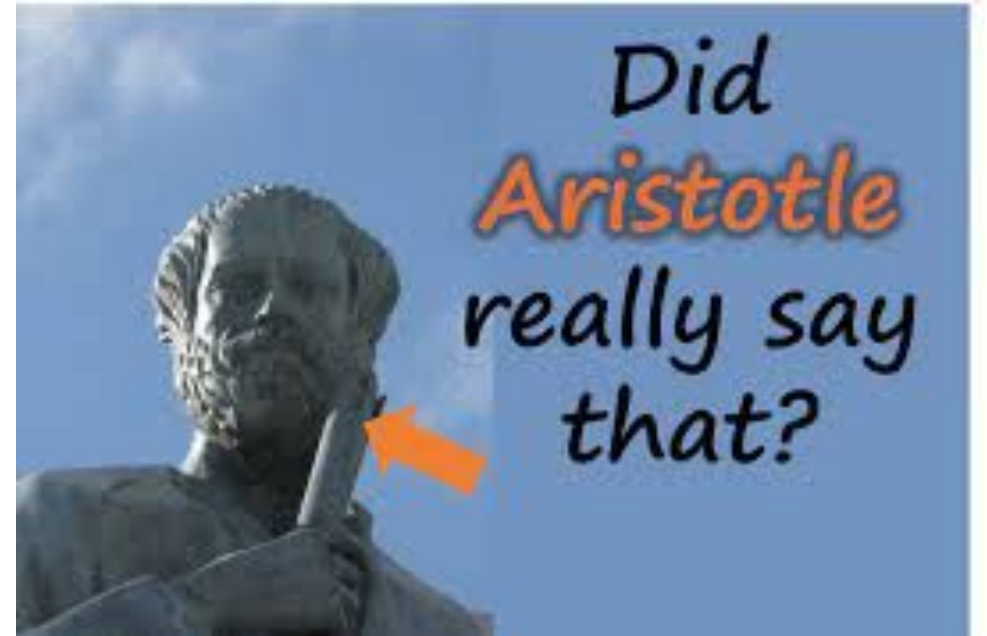
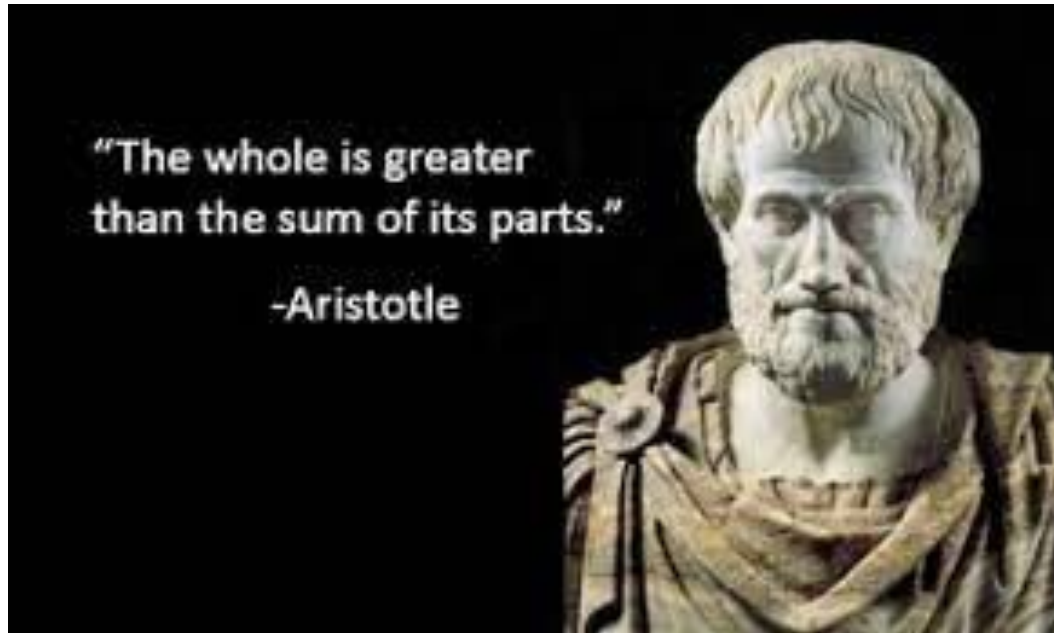
# Física y Emergencia

- [More is different](#), Science, 1972 ... a cada nivel de complejidad aparecen propiedades completamente nuevas, y la comprensión de estos nuevos comportamientos requiere investigación que entiendo tan fundamental en su naturaleza como cualquier otra.



*la capacidad de reducir todo a simples leyes fundamentales  
no implica la capacidad de partir de esas leyes  
y reconstruir el universo*

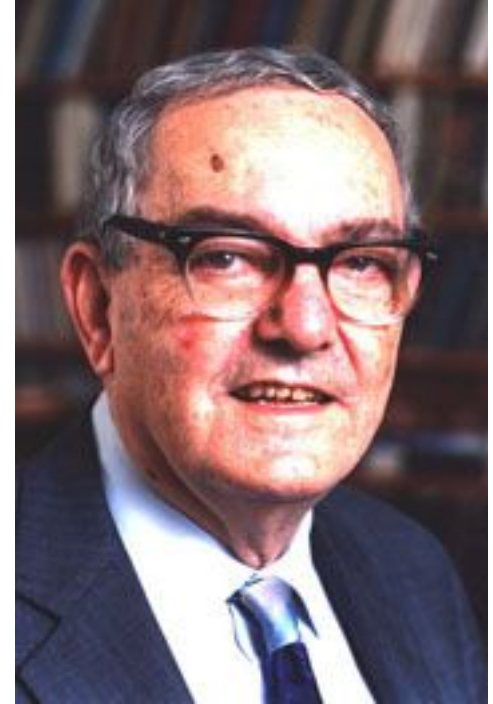
Earlier...384-322 BC



# Economía y Complejidad

(Nobel de Economía) Herbert A. Simon, 1978

- The Architecture of Complexity, (1962)...*“En tales sistemas, el todo es más que la suma de las partes, no en un sentido último y metafísico, sino en el importante sentido pragmático de que, dadas las propiedades de las partes y las leyes de su interacción, no es trivial deducir las propiedades del todo. Ante la complejidad, un reduccionista de principio puede ser al mismo tiempo un holista pragmático.”*
- Racionalidad acotada
  - Capacidad de razonamiento limitada
  - Diferente a la racionalidad restringida

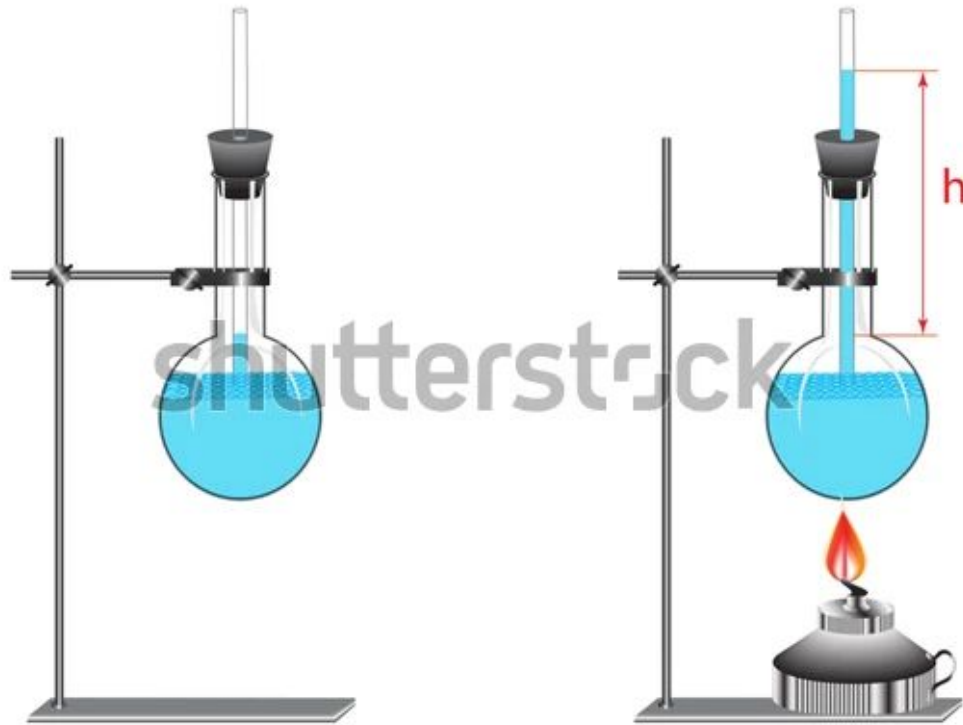


# “Más es diferente” (**emergencia**)

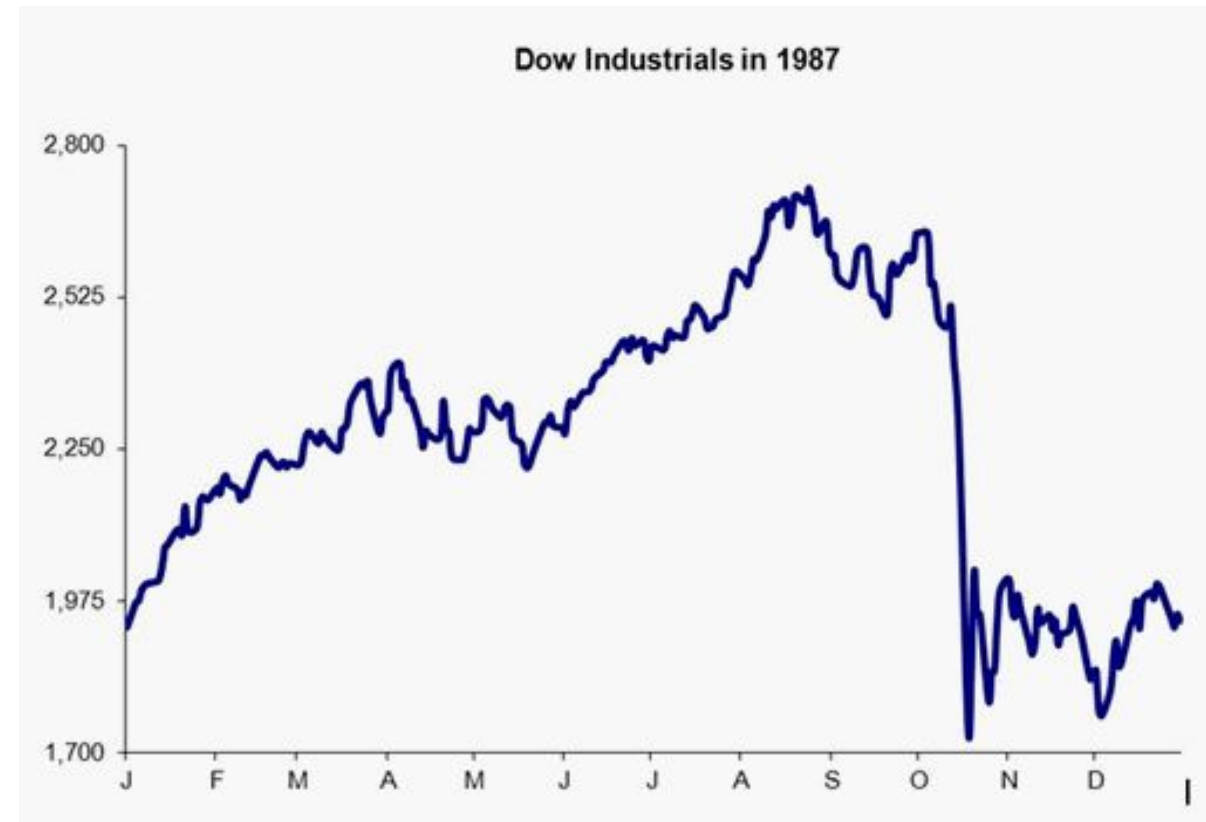
- cuando hay **Más** de un agente simple (neurona/agentes económicos)
- pueden **autoorganizarse** en objetos colectivos (cerebro/mercados)
- que puede tener un comportamiento **emergente** cualitativamente diferente al del comportamiento del agente simple ( conciencia/crisis)
- comportamiento **no lineal**: el todo no es igual a la suma de las partes
- emergencia depende de la no linealidad

# ¿Por qué es la economía un sistema complejo?

- Promedio Industrial Dow Jones (DJIA), Dow Jones
  - índice bursátil de 30 empresas destacadas que cotizan en las bolsas de USA



www.shutterstock.com · 1121155118



# Economía como sistema complejo

- Si analizamos detenidamente el comportamiento de los individuos podemos entender cómo funciona la economía.
- Se remonta a la noción de Adam Smith (1776) de la Mano Invisible: si todo el mundo actúa en su propio interés, el resultado agregado será socialmente satisfactorio, debido a algún mecanismo que lo hace posible.
- ¿cómo consigue esta mano invisible que los individuos se coordinen?



# Economía como sistema complejo

- los individuos interactúan directamente, siguiendo reglas sencillas
- los individuos se adaptan al entorno
- individuo no son irracionales, tienen información limitada y local
- estos sistemas no tienen un comportamiento agregado que pueda caracterizarse como el comportamiento promedio de los individuos
- en cambio, el comportamiento agregado surge de la interacción entre individuos
- en estos sistemas **la coordinación** es un problema



# Economía como sistema complejo

- los individuos poseen una heterogeneidad intrínseca
- los individuos tienen una tendencia intrínseca a imitarse unos a otros y producen un "comportamiento de manada"

Source: Henri Poincaré (Science et Méthode, 1908): “when people interact with each other they do not do so by acting independently on their own information they tend to watch each other and to behave like sheep”

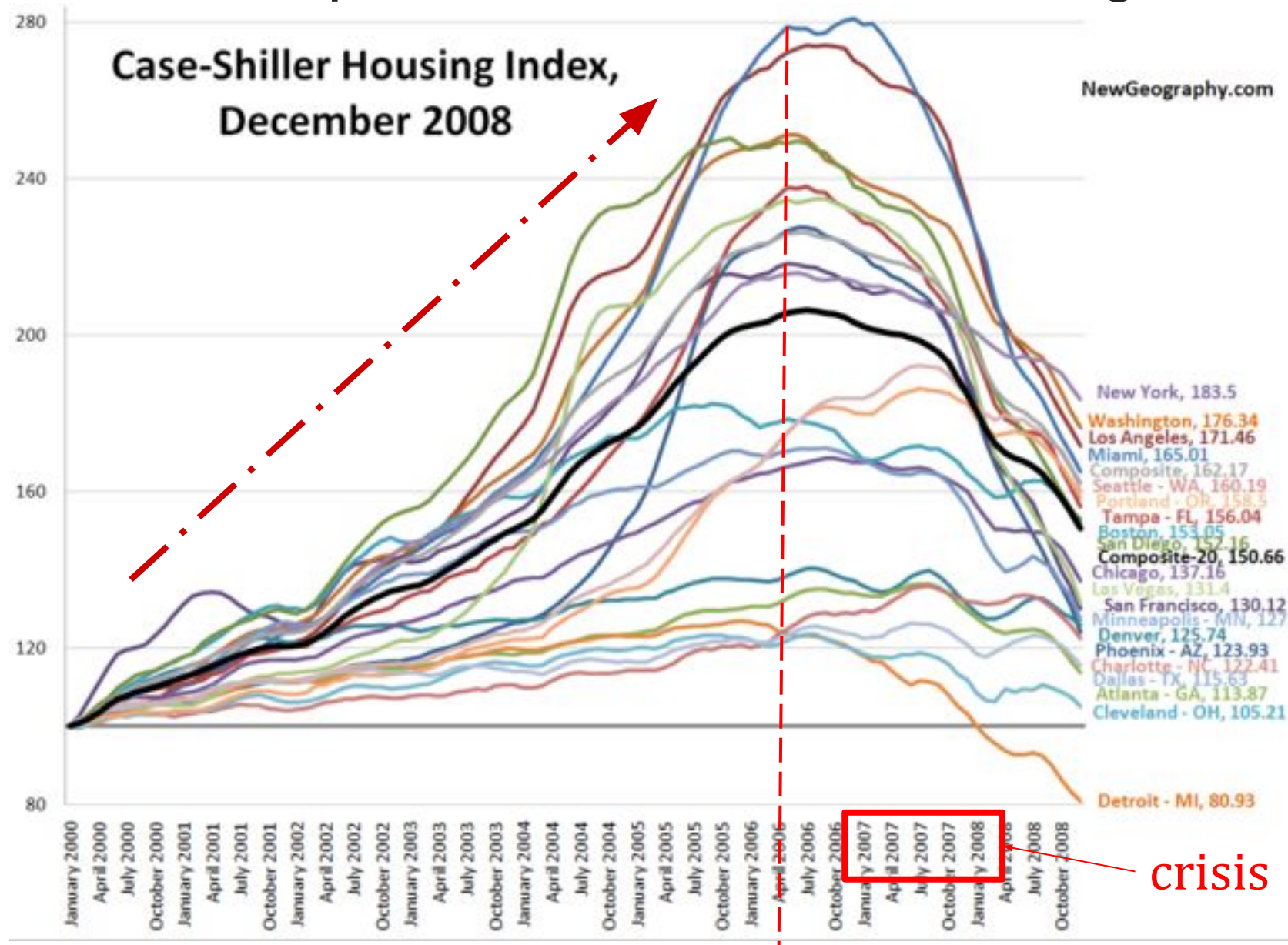
# Los verdaderos secretos de la inversión inmobiliaria

La portada de los años 90 - muy relevante para la reciente volatilidad bursátil. El cómic original de esta portada es de un número de 1989 del International Herald Tribune.

Fuente: Alan Kirman, [Rethinking Economics Using Complexity Theory](#). Course online



# Índices de precios de viviendas de segunda mano en USA



La característica importante de las crisis financieras son los valores respaldados por hipotecas: Se toman hipotecas y se vuelven a colocar en un paquete con otras hipotecas, lo que se denomina valores respaldados por hipotecas. Luego se lo vende a otro. La persona que lo compre se beneficiará de los dividendos que se deriven de su venta (de los alquileres que se paguen, por ejemplo).

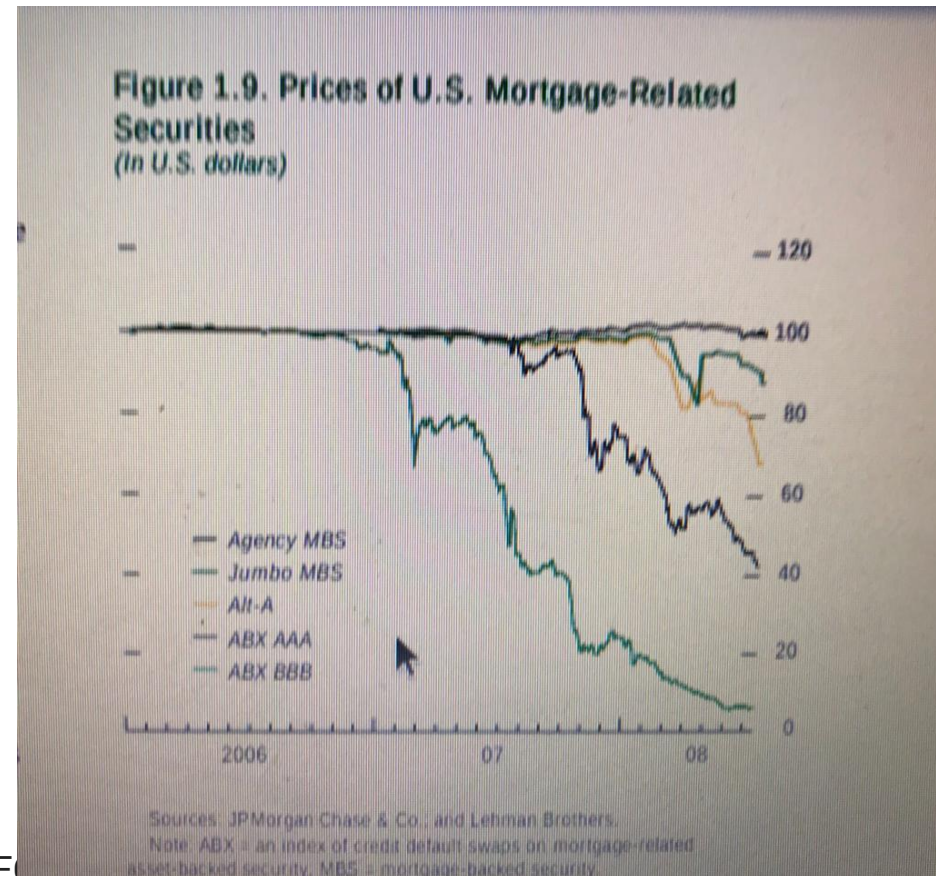
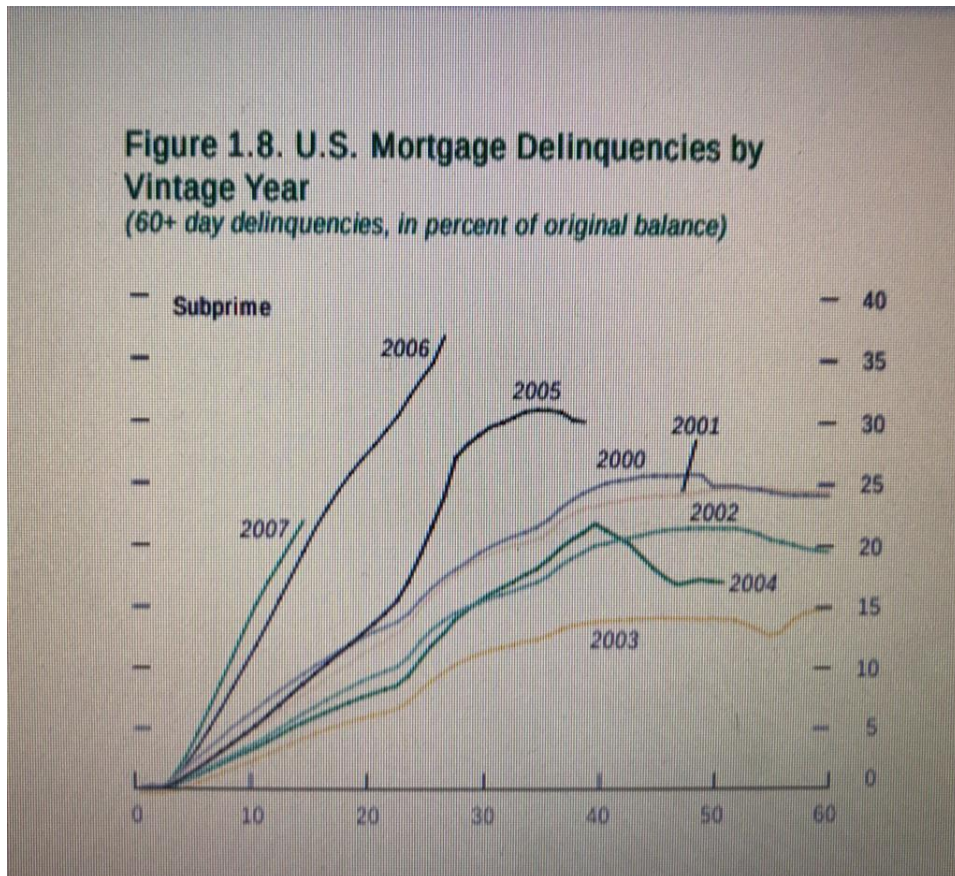
Si el mercado de la vivienda es fuerte esto es bueno.

¿Y si el mercado inmobiliario no es tan bueno? ¿Qué ocurrirá?



# En cambio, observamos lo siguiente

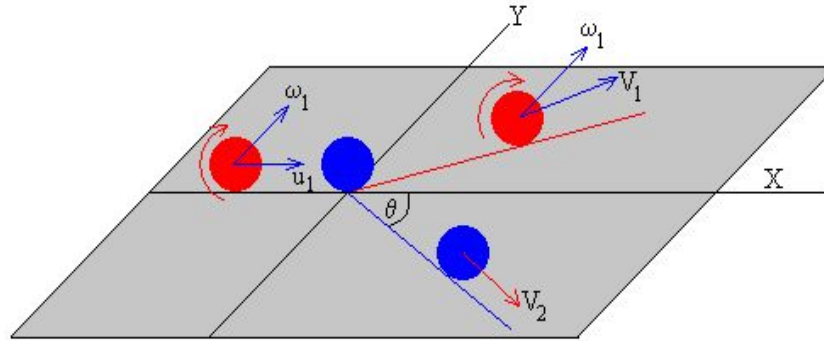
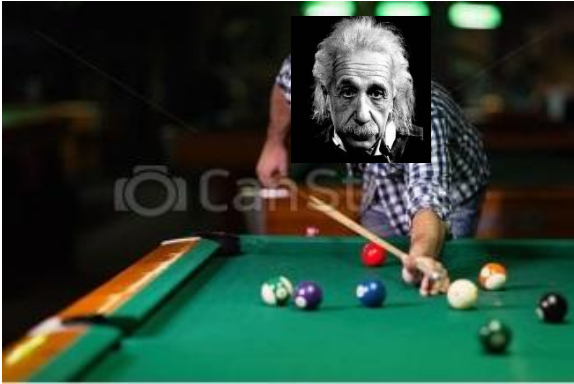
- todas las hipotecas basadas en activos aumentan en cantidades hasta 2008
- Fuente: [Global Financial Stability Report -- October 2008](https://www.imf.org) <https://www.imf.org>



# volvemos... más es diferente

- La tendencia de las ciencias naturales durante el pasado par de siglos fue la búsqueda de “ladrillos elementales”:
  - En biología: la célula
  - En química: los elementos químicos
  - En física: átomos, electrones, protones, etc.
  - En economía: agente representativo
- se parte de la suposición que **se pueden inferir las propiedades del todo a partir de sus partes**
- Esta hipótesis tiene limitaciones importantes: **El agregado de muchos individuos de un mismo tipo da lugar a un ente de naturaleza propia y diferente**

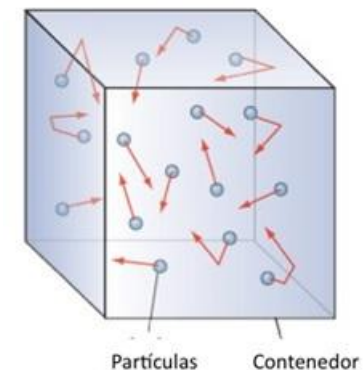
# De la Simplicidad a la Complejidad Desorganizada



Pueden ser correctamente modelados y explicados a partir de las Leyes de la **Mecánica Clásica**

La evolución de un gas a pesar de obedecer a esas mismas leyes, es irresoluble desde el punto de vista práctico debido al gran número de variables involucradas. A partir de las Leyes de la Mecánica Clásica, deducimos las propiedades **macroscópicas** del sistema en el estado de equilibrio

## Física Estadística / Propiedades Macroscópicas



# Problemas de Complejidad Organizada

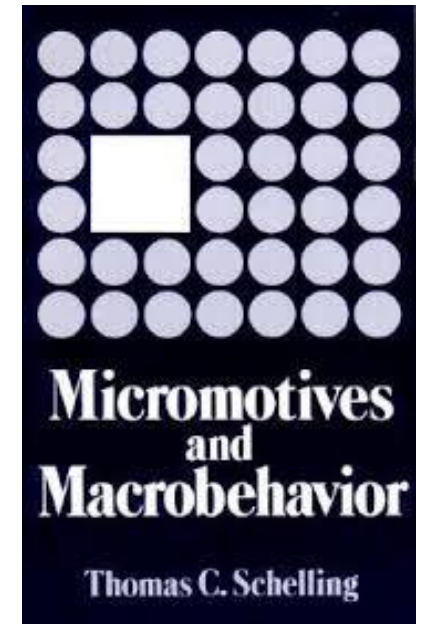
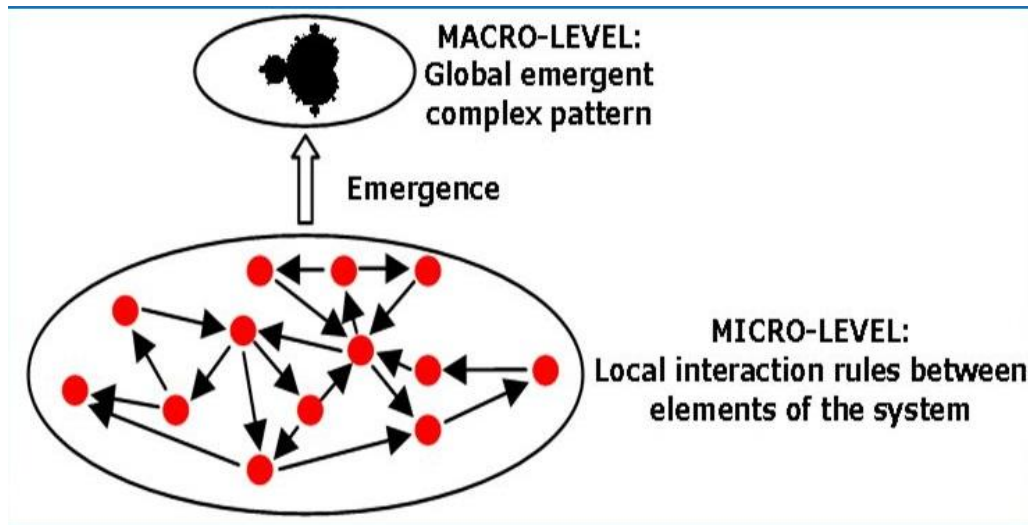
- ¿Cómo modelar un comportamiento de una multitud?
- No puede simplemente pensar en ellos como un gas y modelar cada uno de ellos como uno representativo.
- Individuos toman decisiones, estos son complicados
- Sin embargo se observa un comportamiento Macroscópico organizado





# Sistemas Complejos: definición adoptada

- Los sistemas complejos son emergentes: Están contruidos por un **gran** número de elementos que **interactúan** entre sí. Estas interacciones son relativamente simples en su composición. Sin embargo, a partir de la **multiplicidad** de relaciones individuales, el sistema como un **todo** orgánico presenta ciertas características que han emergido, pero que no estaban presentes en los elementos individuales. A este surgimiento de una estructura o patrón **novedoso** y coherente lo llamamos **emergencia**.





# Sistemas complejos son sistemas que exhiben comportamientos emergentes

- Las sociedades humanas
- La economía y la dinámica de los mercados financieros
- Los sistemas ecológicos: evolución de la biodiversidad
- La propagación de las epidemias, rumores
- La dinámica de la cooperación, competencia en los sistemas sociales
- Las redes metabólicas y el sistema autoinmune
- Internet y la conectividad de todo tipo
- Ciudades

# SC: Físicas, Biológicas, Tecnológicas, Sociales, etc



Formación de Patrones

○ = materia



Desarrollo biológico

○ = célula



Hormigueros/ colonias

○ = hormigas



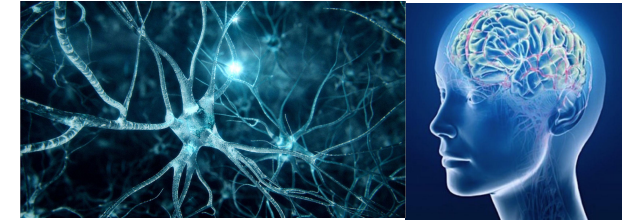
Bandadas

○ = estorninos



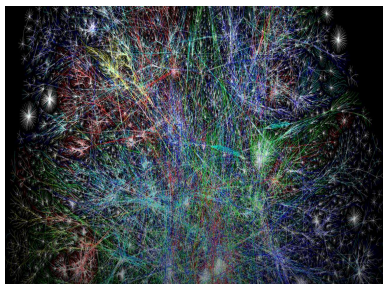
Cardúmenes de peces

○ = peces



Cerebro & Cognición

○ = neurona



Internet & Web

○ = host/página



Redes Sociales

○ = personas

# Sistemas Complejos: Propiedades y Formas de Exploración

- ***El todo es más que las partes***: el sistema posee *propiedades emergentes* que son atribuibles a su nivel de organización interna
- ***Múltiples escalas de espacio y de tiempo***: el comportamiento del agregado puede presentar rasgos de organización en una o varias escalas tanto espaciales como temporales que no tienen porqué coincidir con los de las partes que componen el sistema
- ***La variabilidad a pequeña escala es compatible con constancia macroscópica***: “equilibrio dinámico”
- ***Organización jerárquica***: las unidades que componen el sistema complejo suelen presentar capas sucesivas de organización, un ordenamiento de creciente complejidad

# Sistemas Complejos: Propiedades y Formas de Exploración

- ***Información***: poseen capacidad de procesamiento. Dicha capacidad es una propiedad emergente.
- ***Adaptación***: aprendizaje sistémico
- ***Simplificación de las componentes y de sus interacciones***: posibilidad de estudiar características relevantes de los comportamientos de grupos de agentes sin tener que enfocar el enorme repertorio de conductas potenciales de las personas que los integran

# ¿Como estudiamos los Sistemas Complejos?

Abordajes complementarios:

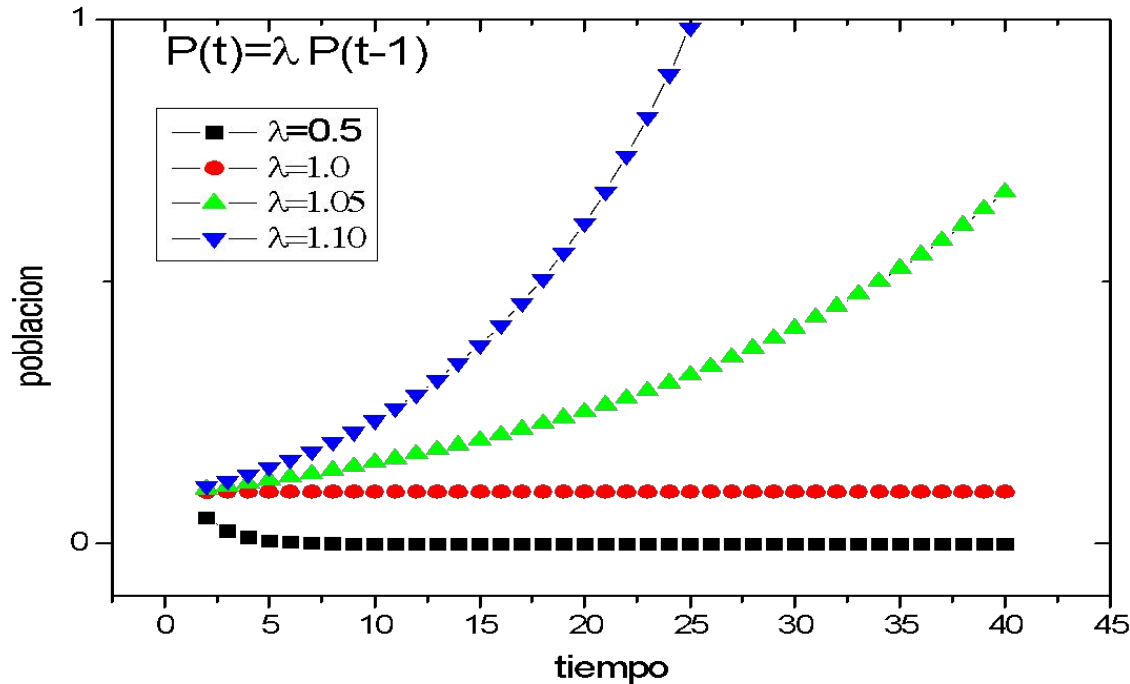
1. la búsqueda de regularidades fenomenológicas que permitan organizar una descripción a escala macroscópica
2. **enfoque “*bottom-up*”**: comprender el conjunto a partir de partes e interacción elementales
  - procedimiento constructivo: se procura “armar” o “hacer crecer” al sistema sobre la base de partes o subsistemas más simples que el conjunto.

Dada una propiedad emergente (un hecho que parece caracterizar de manera más o menos general el comportamiento de un sistema), buscar una base microscópica simple (minimal) suficiente para dar cuenta del fenómeno macroscópico observado

# ¿Como estudiamos los Sistemas Complejos?

- modelos computacionales de múltiples agentes adaptativos
  - se busca construir elementos interactivos que conforman “sociedades” artificiales
  - programa de instrucciones: procesamiento de información
- sistemas dinámicos con alta dimensionalidad de carácter **no-lineal**
- los efectos de escala
  - las formas de organización, las posibilidades de producción, comportamiento de las personas surgen si se contrastan grupos pequeños y aislados con sociedades numerosas.
  - la crisis, fluctuaciones econ. suelen presentar transiciones bruscas que evocan la presencia de efectos de umbral, reflejados en incumplimientos contractuales, quiebras, interrupciones en la cadena de pagos, corridas bancarias
  - las **nonlinearidades** puedan afectar considerablemente las propiedades de la dinámica del sistema

# Efectos de la Pérdida de la Linealidad



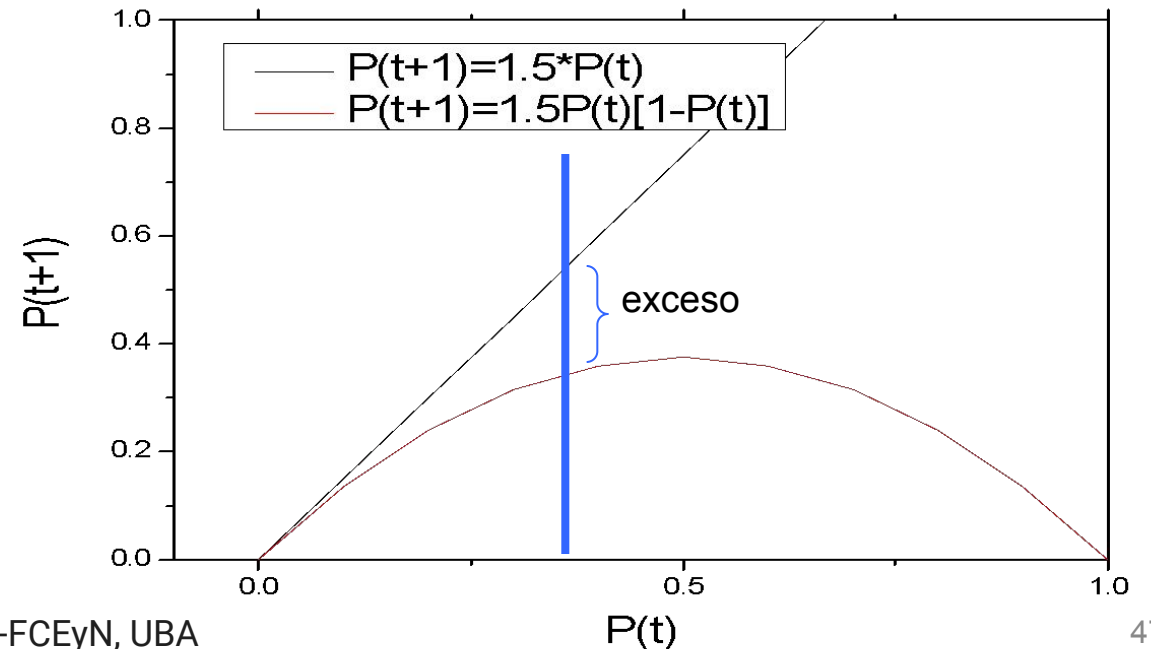
Una ecuación lineal para el crecimiento de una población supone que

$$P(t) = \lambda P(t-1)$$

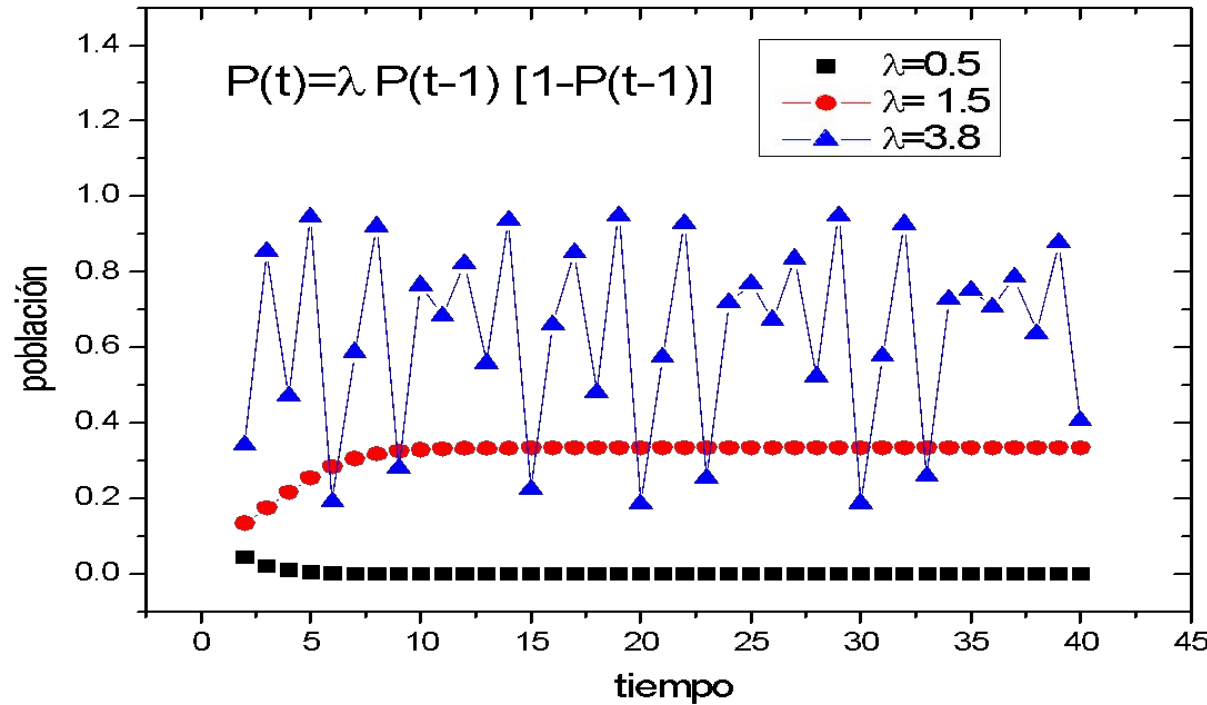
Esto da lugar a crecimientos o decrecimientos exponenciales, siempre de la misma naturaleza

Si se supone que existen límites a este crecimiento, por ejemplo, por límite de recursos, un crecimiento lineal supone un exceso que es tanto mayor cuanto mayor es la población y se corrige con términos no lineales

$$P(t) = \lambda P(t-1) * [1 - P(t-1)]$$







Si el crecimiento obedece a una ley no lineal del tipo:

$$P(t) = \lambda P(t-1) * [1 - P(t-1)]$$

distintos valores de  $\lambda$  dan lugar a una evolución con naturalezas completamente diferentes.

La presencia de efectos no lineales está presente en todos los efectos de agregación que se mencionan al comienzo y que se corresponden con lo que se han dado en llamar sistemas complejos.

- ¿Se pueden comparar entre sí distintos Sistemas Complejos?
- ¿Hay una escala de complejidades?
- Se suele hablar de ***complejidad reducible*** o ***complejidad irreducible***.
  - Un sistema presenta una **complejidad reducible** si se puede desarrollar un algoritmo simple con el que es posible reproducir la evolución del sistema
    - existen sistemas que presentan una complejidad irreducible que son extremadamente simples de especificar (AC)
  - Un sistema presenta una **complejidad irreducible** si la única manera de conocer la evolución del sistema es observándolo (*p. ej la sociedad* )

- ¿Se puede medir la Complejidad?
  - Se la suele asociar con la cantidad de información necesaria para describir al sistema (o sea sus partes y sus interacciones).
  - Se la suele medir en **bits** y se expresa como  $S = \log_2 \Omega$  donde  $\Omega$  es el número de estados posibles del sistema
  - Se suele también definir cuantitativamente la **Complejidad de Kolmogorov** (o **entropía algorítmica**) de una secuencia de números o de la evolución de un sistema como la **longitud del mínimo programa** capaz de reproducirla.

¡Nos vemos en la próxima clase!