

# Introducción a los Sistemas Complejos

## Sesión 3: Sistemas Complejos en Dinámicas Sociales, Gestión y Emprendimiento

Santiago, Chile – 3, 5, 7 y 7 de octubre, 2016 – 19:30 a 22:00hrs

La Casa de Goethe / Santiago Maker Space – Cristián Huepe, PhD

## ► Sistemas Complejos en Dinámicas Sociales, Gestión y Emprendimiento

- Econofísica de sistemas complejos fuera de equilibrio
- Distribuciones de cola larga
- Liderazgo y decisiones colectivas
- Redes y epidemias (Ejercicio)
- Redes de mundo pequeño y libres de escala
- Conceptos asociados: Reducción dimensional, *Big data*, *Machine Learning*, etc.



# Breve Repaso



En la sesión anterior vimos:

- Ejemplos de **redes complejas**
- Nociones de **física estadística**
  - Historia
  - Temperatura
  - Transiciones de fase
  - Equilibrio y fuera del equilibrio
- **Enjambres, movimiento colectivo, y materia activa**
  - Ejemplos: biología, computación, robótica, etc.
  - Definición: Movimiento de grupos de agentes autopropulsados
- **Experimentos** de movimiento colectivo:
  - **Peces**
  - **Langostas**
  - **Mini-robots**

# Extensiones del movimiento de enjambres

- **Movimiento humano** – Algunos resultados establecidos:
  - **Formación de filas** de flujos opuestos a densidad crítica (**transición de fase**)
  - **Velocidad** de **evacuación incrementa** con un **obstáculo**

(a) Normal



(b) With an Obstacle



(c) One Line





# Extensiones del movimiento de enjambres

- Otros tipos de “enjambres” en el espacio físico
  - Danza de enjambres
  - Micro-robots en el cuerpo
  - Vehículos autónomos
  - Satélites y sondas de exploración
- Movimiento de enjambre en otros “espacios” no físicos
  - Música de enjambres
  - Dinámicas de opinión
  - Comportamiento de inversionistas



# Sistemas complejos en economía, gestión y emprendimiento

Econofísica, la economía fuera del equilibrio

Promedios y distribuciones de cola larga

Negocios de cola larga

## ➤ Economía “clásica”:

- Considera sólo sistemas en equilibrio (ej.: curvas de oferta y demanda)
- No incluye correlaciones complejas entre actores económicos
- No describe bien sistemas complejos

## ➤ Econofísica (<https://es.wikipedia.org/wiki/Econof%C3%ADsica>)

- Aplica teorías y métodos de física a problemas de economía
- Especializada en problemas estocásticos y de dinámica no lineal

## ➤ Ejemplos de econofísica:

- Uso de teoría de la percolación para explicar fluctuaciones de mercados
- Uso de modelos de infarto cardíaco y criticalidad auto-organizada para explicar colapsos de la bolsa
- Explicación de fenómenos de escalamiento y auto-similares como las leyes de potencia en distribución de riqueza y dinámica de precios e de intercambio
- Estudio de la existencia de caos determinista en los patrones de transacciones económicas y sus horizontes de predicción temporal



# Promedios y distribuciones de cola larga

- ▶ Los sistemas **lineales** y **no-complejos** son “**normales**” (distribución **Gaussiana** o **Normal**)
  - El **promedio** representa al **sistema**
    - Ejemplo: Distribución de alturas de personas
  - Se aplica la **ley de los grandes números** (teorema del **límite central**)
  - El **promedio** es cada vez **más representativo** mientras **más datos** se usen
    - Ejemplo: Predictibilidad de los casinos



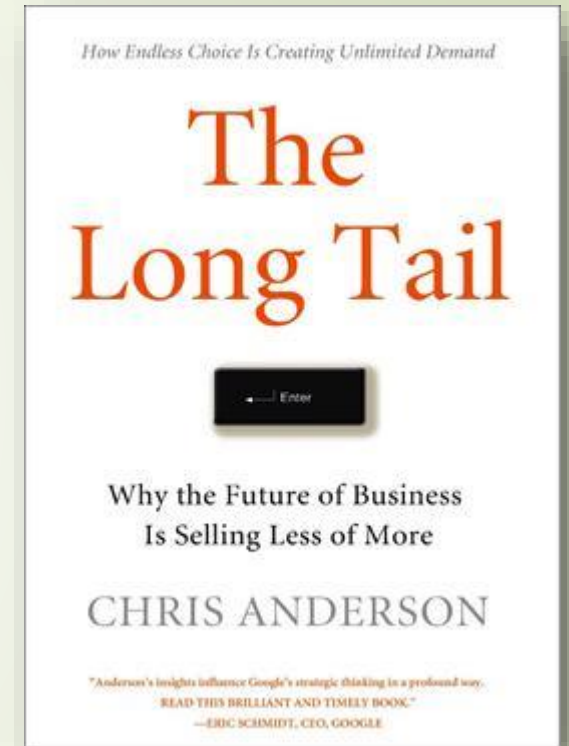
<https://www.youtube.com/watch?v=vlp1kY0H0yw>  
(hasta 2m 22s)

<https://www.youtube.com/watch?v=vlp1kY0H0yw>  
(desde 2m 22s)

- Los sistemas no lineales y complejos no son “normales”
  - Eventos extremadamente poco comunes son posibles (“black swans”)
    - Ejemplo: Lunes Negro (*Black Monday* - Oct. 19, 1987): Dow Jones cayó 22% (lo normal: 1% por día). Probabilidad =  $\frac{1}{100.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000}$  en distribuciones normales
  - Los promedios “normales” no tienen sentido porque la muestra puede incluir a un “black swan”
    - Ejemplo: Altura promedio vs. riqueza promedio
    - Los promedios incluso pueden divergir
  - Ejemplos: Tráfico en Internet, ocurrencia de terremotos, caídas de las bolsa
  - El origen de este fenómeno se relaciona a correlaciones complejas entre eventos

# Modelos de negocio “long tail”

- Popularizado por el libro
  - “The Long Tail” (Chris Anderson – editor de “Wired”)
- Focalizarse en la parte “larga” de la “cola”:
  - No más “superventas”
  - Mercados de minorías o nichos – variedad necesaria
  - Requieren nuevas tecnologías de producción y distribución
  - Procesos colaborativos “pro-am” y gratuidad
- Ejemplos:
  - Impresión 3D: shapeways (<http://www.shapeways.com/>)
  - Auto-edición de libros: Lulu ([www.lulu.com](http://www.lulu.com))





# Liderazgo y decisiones colectivas en animales y humanas

Experimento con peces

Inteligencia colectiva

El rol de los desinformados

# Experimento de liderazgo con peces



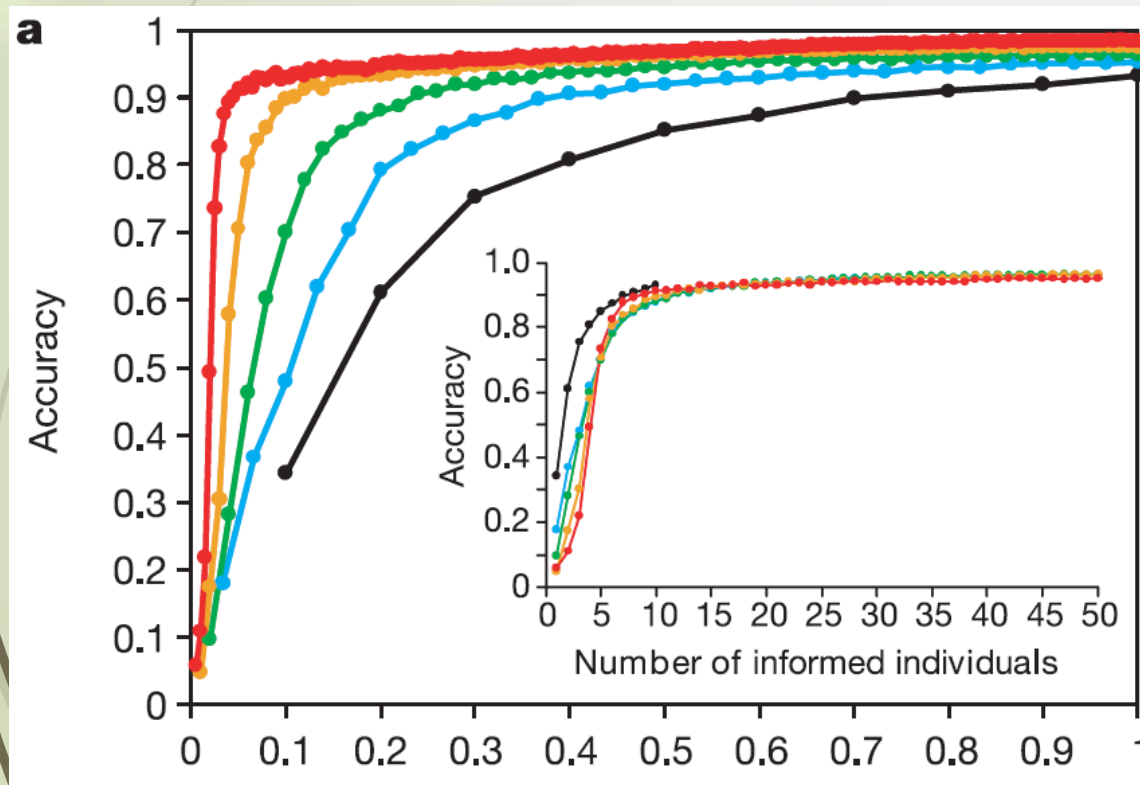


# Decisiones e inteligencia colectiva

## Effective leadership and decision-making in animal groups on the move

Iain D. Couzin<sup>1,2</sup>, Jens Krause<sup>3</sup>, Nigel R. Franks<sup>4</sup> & Simon A. Levin<sup>1</sup>

NATURE | VOL 433 | 3 FEBRUARY 2005 | [www.nature.com/nature](http://www.nature.com/nature)

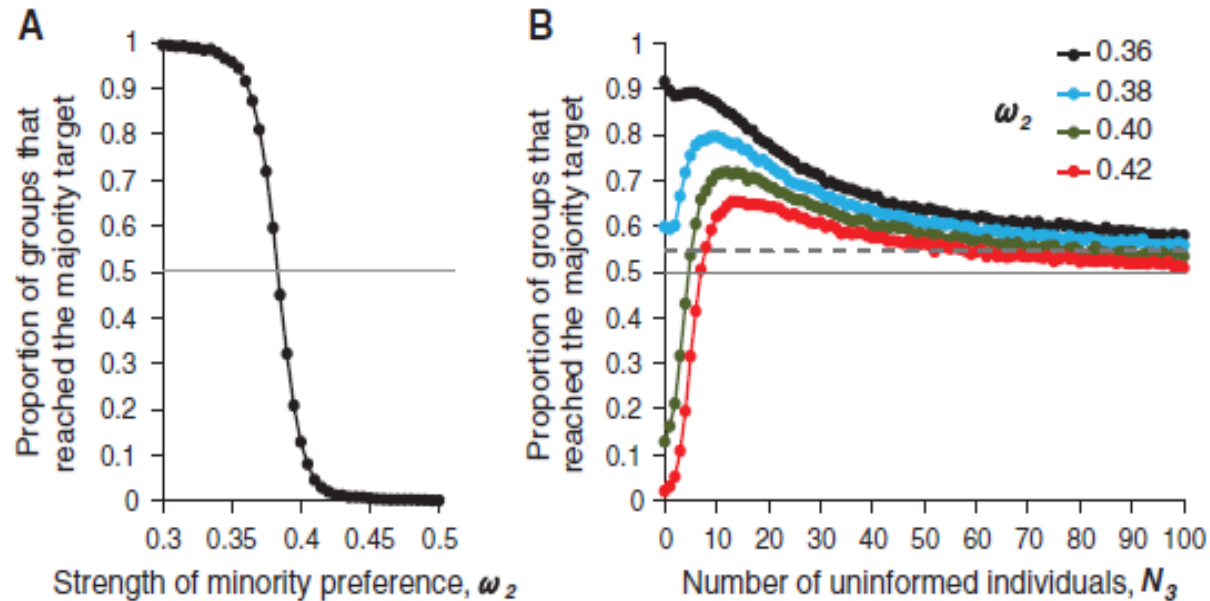


- Resultados del experimento 1:
  - Una fracción más pequeña de peces lidera un grupo más grande
  - Reglas simples (pero no promediadas ni lineales) permiten liderar a la mayoría informada

# El rol de los desinformados

## Uninformed Individuals Promote Democratic Consensus in Animal Groups

Iain D. Couzin, *et al.*  
*Science* 334, 1578 (2011);  
DOI: 10.1126/science.1210280



- ➡ Resultados del experimento 2:
- Una **minoría de fanáticos** (o convencidos) tiende a **liderar** al grupo
  - El liderazgo **retorna a la mayoría** menos fanática cuando aumenta el número de **no informados**



# Ejercicio/demostración de redes y epidemias

Propiedades de las conexiones de mundo pequeño y de cola larga

# Ejercicios epidemiología

- Instrucciones ejercicio 1: Inmunización en red regular
  - Cada individuo debe seleccionar 2 otros al azar
  - Número total de conexiones =  $2 \times (\text{número de individuos})$
- Instrucciones ejercicio 2: Inmunización en red de mundo pequeño y de “cola larga”
  - Todos reemplacen su segunda conexión por una de dos personas específicas
  - Igual número total de conexiones
- **Reglas de infección**
  - Un individuo se infecta si tiene una o más conexiones infectadas
  - Un individuo se recupera si no tiene ninguna conexión infectada
  - Un individuo nunca se infecta si está vacunado

# Ejercicios epidemiología

## ► Ejercicio 1: Inmunización en red regular

- **Caso 1**: Vacunamos al 20% de la población, seleccionada al azar  
¿Detenemos la epidemia?
- **Caso 2**: Vacunamos a amigos al azar del 20% de la población, seleccionada al azar  
¿Detenemos la epidemia?

## ► Ejercicio 2: Inmunización en red de mundo pequeño y de “larga cola”

- **Caso 1**: Vacunamos al 20% de la población, seleccionada al azar  
¿Detenemos la epidemia?
- **Caso 2**: Vacunamos a amigos al azar del 20% de la población, seleccionada al azar  
¿Detenemos la epidemia?





# Redes, grafos y las ciencias sociales

Grafos regulares y la historia de Erdős-Reni

Redes de mundo pequeño

Redes libres de escala

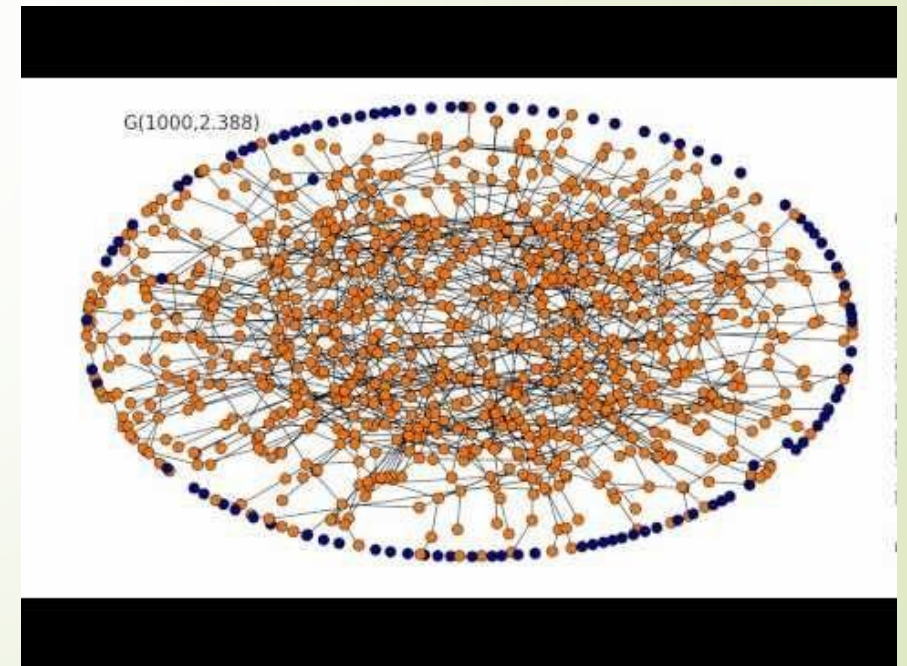
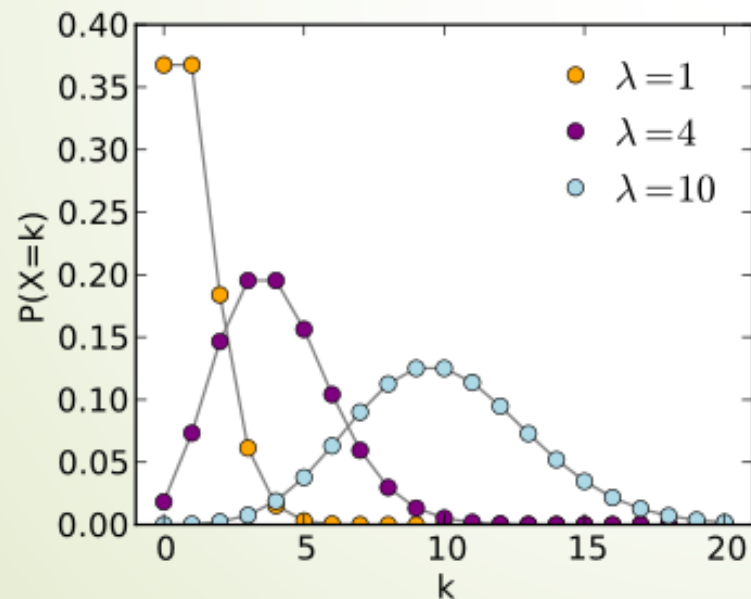
# Paul Erdős y los grafos aleatorios

- **Paul Erdős** (Budapest, 1913 – Varsovia, 1996): Prolífico y excéntrico matemático húngaro quien trabajó en teoría de grafos (o redes).
- Su vida fue documentada en la película *N es un número: El retrato de Paul Erdős* y en el libro *El hombre que solo amaba a los números*.
- Más de 1500 artículos, más de 500 coautores:
  - Número de Erdős (Paul)
  - Número de Bacon (Kevin)
- **Modelo Erdős–Rényi de grafos aleatorios:**
  - **N**: número total de nodos
  - **P**: probabilidad de conectar dos nodos aleatorios (independencia estadística)

# Paul Erdős y los grafos aleatorios

## ► Distribución de grado $P(k)$ : Distribución de Poisson

- Probabilidad de un número dado de eventos durante un período de tiempo, dada la probabilidad de ocurrencia media
- Promedio característico bien determinado
- Mal modelo para redes complejas reales





# Redes de mundo pequeño (*small world networks*)

Experimento de Stanley Milgram

Watts y Strogatz

Concepto y ejemplos

El modelo y la teoría

# Experimento de Mundo Pequeño



Stanley Milgram (Harvard – 1967 en adelante)

1. Dos individuos elegidos como principio y fin de una cadena de correspondencia, típicamente entre Omaha o Wichita y Boston.
2. A los de Omaha y Wichita se les enviaba paquetes con cartas detallando el estudio, e información del destinatario a contactar en Boston.
3. Si el receptor de la cadena conocía personalmente al destinatario de la carta, se la debe reenviar directamente.
4. Si no, se le debe reenviar a alguien que conozca personalmente, y con la mayor probabilidad de conocer al destinatario.
5. Si el paquete alcanzaba al destinatario, los investigadores podían examinar todos los pasos intermedios gracias a un sistema de listas y tarjetas de respuesta pre-dirigidas a Harvard.



# Experimento de Mundo Pequeño



- En muchos casos, no se reenviaban los paquetes. En una serie, 232 de los 296 paquetes enviados nunca llegaron.
- En algunos casos, los paquetes alcanzaban su destinatario en sólo 1 o 2 pasos, en otros en 9 o 10.
- En los 64 casos en que los paquetes sí llegaron a sus destinos, en número promedio de pasos fluctuaba entre las 5,5 y 6 personas.
- Los investigadores concluyeron que la población de los Estados Unidos estaba separada por unas seis personas en promedio.
- Milgram nunca utilizó la expresión “*seis grados de separación*”, pero sus hallazgos contribuyeron a su difusión y aceptación.
- De los 24 paquetes que llegaron a destino en una serie, 16 fueron entregados *por la misma persona*, un comerciante de ropa.

# Redes de Mundo Pequeño

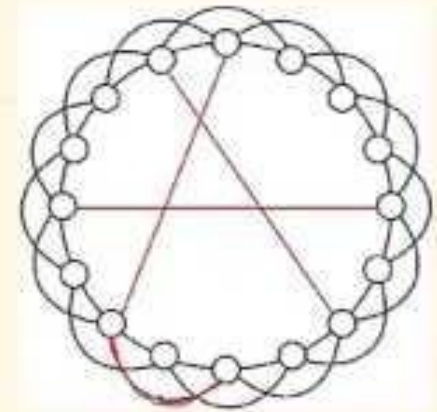
- Una **red de mundo pequeño** es un tipo de grafo en que la mayoría de los nodos no son vecinos entre sí, pero pueden ser alcanzados desde cualquier nodo origen a través de un número relativamente corto de pasos
- En 1998 Duncan Watts y Steven Strogatz estudiaron un cierto tipo de redes aleatorias que mostraba propiedades de conectividad peculiares
- Mostraron que éstas se podían clasificar en función de dos parámetros: el coeficiente de agrupamiento (*clustering coefficient*) y la distancia.
- Modelo de Watts y Strogatz:
  - El trayecto mínimo promedio entre nodos es pequeño
  - El coeficiente de agrupamiento es grande

# Redes de Mundo Pequeño

- Modelo de **Watts y Strogatz**:
  - Red de *mundo pequeño*
  - Publicado en 1998 en *Nature*
- Descripción del modelo:
  - **Conectar todos los vecinos**
  - **Incluir algunas conexiones de largo alcance con probabilidad  $p$**
- Resultado:
  - Distancia media entre dos nodos aleatorios crece como el logaritmo del número de nodos:  $\log(N)$

## Watts-Strogatz Model

- Add a few, long-range links
- Published in 1998 in *Nature*
- Three parameters:
  - Number of nodes
  - links/node
  - **prob**: chance of connecting random pair of nodes, for each link in the graph



*Networks Illustrated: Principles without Calculus*

*Brinton & Chiang*

<https://www.youtube.com/watch?v=aa7z8V4-Bc4>



# Redes libres de escala (*scale-free networks*)

Barabási y las redes libres de escala

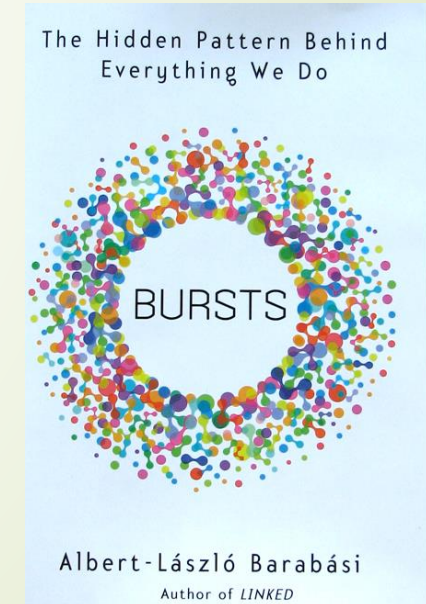
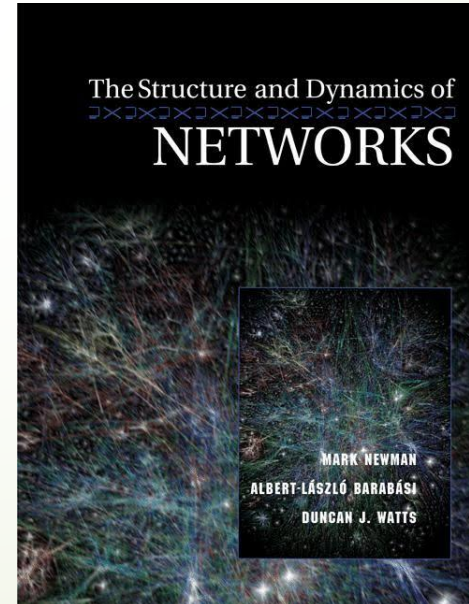
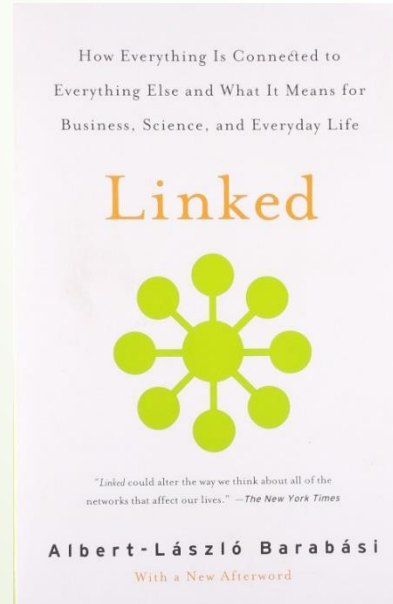
Escalas, logaritmos y leyes de potencia

El ejemplo del algoritmo del **Google**



# Barabási y las redes libres de escala

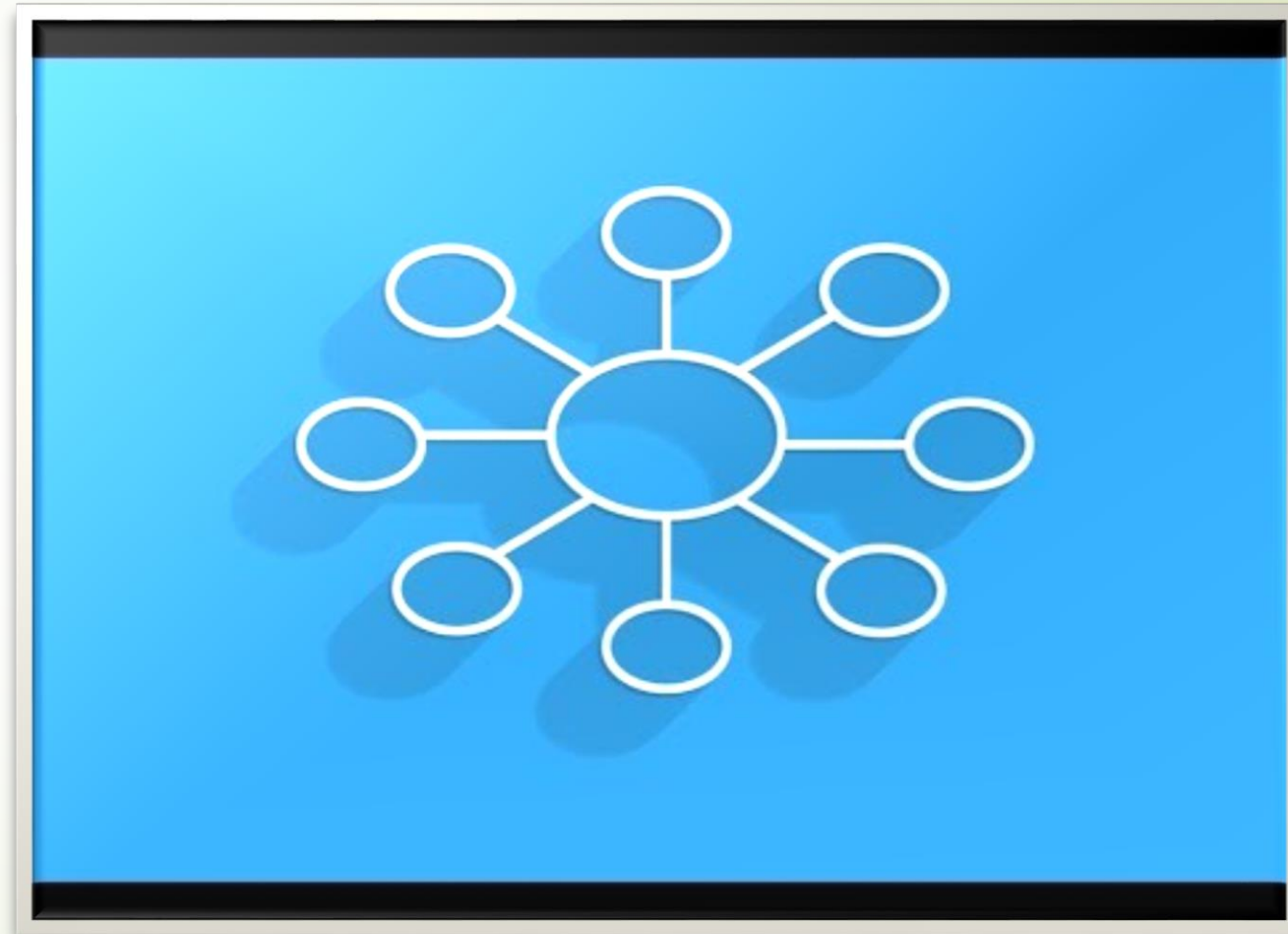
- Físico Húngaro-Estadounidense nacido en Transilvania (Rumanía)
- Investigador de redes libres de escala, complejas y biológicas.
- Director del Center for Complex Network Research (CCNR)
- Uno de los científicos más citados de la historia
- Autor de:





# Barabási y las redes libres de escala

- Redes centralizadas
- Distribución de grado
- Leyes de potencia
- Redes libre de escala
- Modelo **Barabási-Albert**:
  - Conexión preferencial
  - Probabilidad de conectarse a un nodo dado crece con su número de conexiones



<https://youtu.be/qmCrtuS9vtU>

# Distribución en ley de potencia (sin escala)

## ➤ No son una ley de potencia:

- $F_C(x) = A_1 \cos(C_C x)$
- $F_E(x) = A_2 \exp(C_E x) = A_2 e^{(C_E x)}$

## ➤ Escalas características:

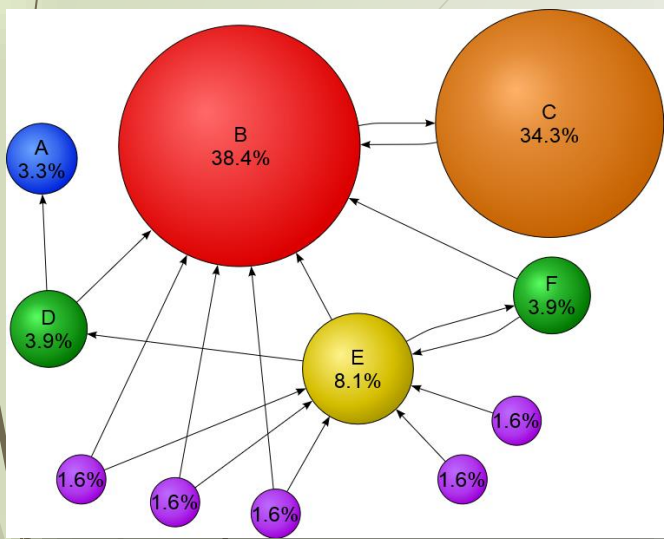
- Coseno:  $x$  característico =  $1/C_C$
- Exponencial:  $x$  característico =  $1/C_E$

## ➤ En cambio, en una ley de potencia:

- $F_P(x) = A_P x^n + C_P$

## ➤ Leyes de potencia no tienen escala característica

# Ejemplo algoritmo de búsqueda de Google



- **PageRank:** marca registrada y [patentada por Google en 1999](#)
- Desarrollado por [Larry Page y Sergey Brin](#) (Google), en Stanford durante su postgrado en computación
- Utilizado para evaluar la relevancia de los documentos (o páginas web) indexados por un motor de búsqueda
- **Algoritmo inicial:**

$$PR(A) = (1 - d) + d \sum_{i=1}^n \frac{PR(i)}{C(i)}$$

- $PR(X)$  = PageRank de página X
- $d$  = factor entre 0 y 1
- $\sum$  = Suma sobre todas las páginas conectadas a A
- $C(X)$  = Número de conexiones de página X



*Fin*

...de la tercera sesión del taller