



Complejidad

Presentado por Diana Ita, Ph.D.

Referencia principal: Allenby, B. 2012

Preparado por: Ramzy Kahhat y Diana Ita

Facultad de Ciencias e Ingeniería

CLIMA DE CAMBIOS

INTE PUCP

PELCAN PUCP

Conversatorio: Sostenibilidad Débil vs Sostenibilidad Fuerte

Día Mundial del
Sobregiro Ecológico
2024

Te invitamos a ser parte del conversatorio: **"Sostenibilidad Débil vs Sostenibilidad Fuerte"** organizado por Clima de Cambios, el Instituto de la Naturaleza, Tierra y Energía (INTE-PUCP) y la Red Peruana Ciclo de Vida y Ecología Industrial (PELCAN).

Instituto de la Naturaleza, Tierra y Energía (INTE-PUCP)
Más información: intecomunica@pucp.pe
www.inte.pucp.edu.pe

Panelistas

Eric Cosío
Director del INTE-PUCP

José Carlos Silva
Departamento de Economía (PUCP), Director de carrera en Economía, Investigador del INTE-PUCP

Joan Sánchez-Matos
Investigador Postdoctoral en el grupo de investigación PELCAN PUCP

Moderador

Diego Espejo
Coordinador de Relaciones institucionales del INTE-PUCP

El conversatorio será un lugar donde se debatirá y reflexionará sobre las distintas perspectivas de la sostenibilidad, y así, profundizar en la comprensión de los enfoques y sus implicancias, analizar los límites y potencialidades de cada postura en un contexto nacional y reflexionar sobre las implicancias éticas y sociales.

Día: **martes 3 de septiembre**
Hora: **4:00 p.m.**
Modalidad: **híbrida (transmisión vía Zoom y Facebook del INTE-PUCP)**
Lugar: **A-100, Aulario de Ingeniería**
**Ingreso libre, previo registro*

Ingeniería Sostenible

Diana Ita, Ph.D.

Definiendo “complejidad”

- RAE: Cualidad de complejo
- Complejo:
 - adj. Que se compone de elementos diversos.
 - adj. complicado (enmarañado, difícil).
 - m. Conjunto o unión de dos o más cosas.

En la Teoría de Sistemas Complejos → Complicado ≠ Complejo

Se suele reducir la complejidad con slogans y símbolos simplificados

- Huellas de carbono
- Desigualdad social
- Inmigración
- ...

SISTEMAS SIMPLES VS COMPLEJOS

¿Qué es un Sistema?

Son los grupos o redes de partes interactuantes e interdependientes unidos entre sí mediante el intercambio de energía, materia y/o información.

Frontera de un Sistema

Una parte muy importante de los sistemas es la consideración de la frontera:

¿Qué está considerado adentro?

¿Qué está considerado afuera del sistema?

Escoger la frontera es un arte y es siempre una elección arbitraria

Diferentes fronteras, diferentes resultados

Frontera de un Sistema

Por ejemplo, ¿cuál es el impacto ambiental de un avión?

Uso de combustibles fósiles

Impactos ambientales por materiales usados en fabricación

Evidente

¿Infraestructura para sustentar la tecnología?

Medianamente Evidente

¿Dispersión de enfermedades?

¿Habilitando el ecoturismo e impactos relacionados al ecosistema?

No tan Evidente

Frontera de un Sistema

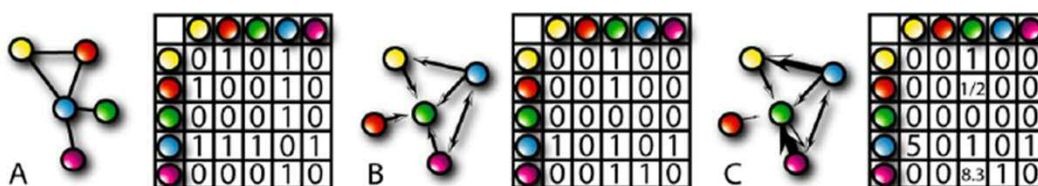
¿Cuál es la frontera del estudio?

No es fácil decidir y tal vez dependa en la razón por la cual se realiza el análisis y el uso de sus resultados.

Quien decide debe hacerlo de manera ética y responsable.

P.ej., ACV del biocombustible

Diferentes tipos de redes



Simple Graph:
Symmetric, Binary.

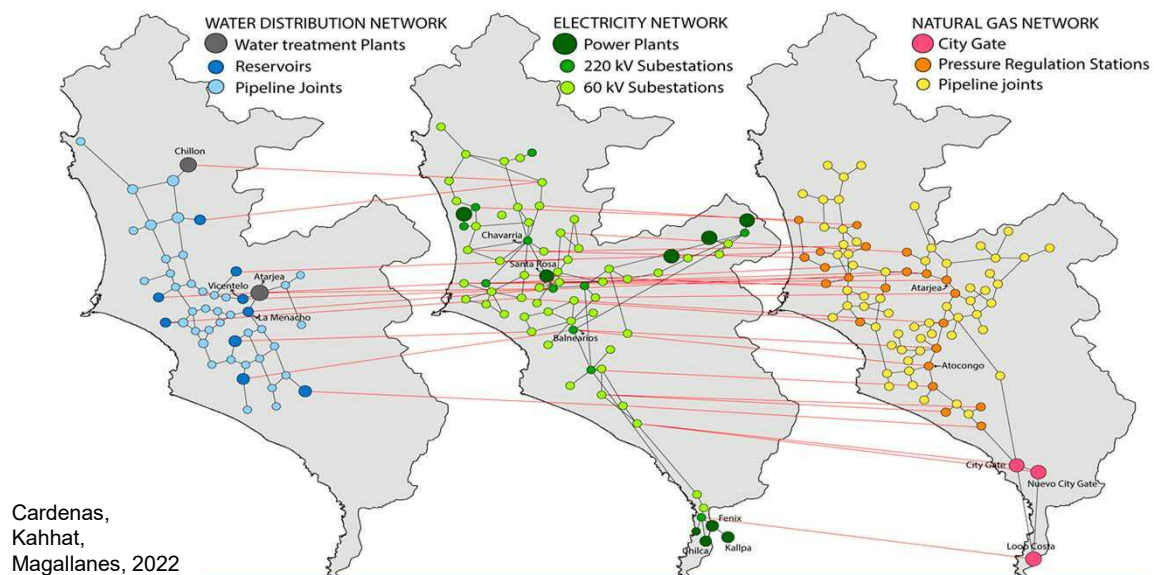
Directed Graph:
Non-Symmetric, Binary.

Directed and Weighted Graph:
Any Matrix

Hidalgo (2008)

Diferentes tipos de redes

- Red A: caracterizada por interconexiones no diferenciadas
- Red B: Conexiones fluyen en direcciones determinadas (p.ej. flujo de suministro alimentando a una industria)
- Red C: Ilustra una mayor diferenciación. Algunos enlaces más importantes que otros



Los sistemas varían en formas fundamentales y sus diferencias tienen implicaciones profundas

En los sistemas fuertemente interconectados la evolución puede ser bastante complicada

Ejemplo:

Carros basados en hidrogeno: **tecnología versus infraestructura requerida para extender el uso**

Un sistema complejo con pocos enlaces puede ser también problemático

Aun cuando el nodo cambia, la falta de conexiones con otros nodos significa que el sistema completo no evoluciona de manera efectiva: se tiende a confundir el comportamiento localizado en lugar de la evolución del sistema.

(Ejemplo: invento que necesita materiales y capacidades no existentes)

El mejor sistema para adaptarse con gallardía a las condiciones cambiantes es uno que tiene suficientes interconexiones, pero no tantas, para que el sistema pueda mantenerse **unido al evolucionar**, pero **no restringido por su estructura interna**. (Allenby, 2013)

La complejidad y la tecnología

- Pueden existir restricciones sociales, culturales e institucionales.
- Introducir una nueva tecnología no solo depende de las conexiones con otros sistemas tecnológicos, pero de conseguir fondos, poder crear una compañía, poder fracasar, ser respetado en la sociedad, etc.

Sistemas simples vs complejos

TABLE 3.1 Simple (S) Versus Complex (C) Systems¹

Function	Type	Function as Displayed by System	Policy Implication	Example
Information	S	System is centralized and "knowable"	Centralized command-and-control feasible	Environmental end-of-pipe regulations
	C	Information diffused throughout the system; some embedded in system structure; system too complex to be "known"	System not directly manageable; real-time adjustments to unpredictable behavior, not centralized control	Climate change management

Ingeniería Sostenible

Diana Ita, Ph.D.




Function	Type	Function as Displayed by System	Policy Implication	Example
Causality	S	Linear; cause and effect relationships easy to see	Centralized command-and-control to end point (effect) feasible	Removing lead from gasoline leads to less lead exposure
	C	Causes and effects cannot be linked in most cases	Cannot be sure of actual impact on system of any policy initiative	Designing the Everglades; running modern large city
Response to Forcing	S	Predictable and relatively linear	Rigid regulatory structures both okay (because outcome predictable) and politically preferable (because can't be gamed)	Removing lead from gasoline
	C	Highly nonlinear and may be discontinuous; not predictable a priori	Policy once in place must be adaptive and flexible, so can be changed in real time as system's response dictates	Designing Everglades; climate change management

Ir




Function as Displayed					Allenby 2013
Function	Type	by System	Policy Implication	Example	
Control Mechanisms	S	Rational centralized control is possible and effective	Single, fully responsible entity with authoritarian power can control system (e.g., U.S. EPA)	Legal controls on interest payments	
	C	Rational direct control fails because of lack of knowledge and system unpredictability	Responsible management entity adjusts forcing functions (e.g., taxes or fees) and monitors results; system has diffuse internal control mechanisms	Regulating modern economy versus Soviet command economy	
End point	S	Can be defined and not path dependent	Command-and-control management to end point feasible	Constructing a bridge or building	

Ingeniería Sostenible Diana Ita, Ph.D.



Function as Displayed					Allenby 2013
Function	Type	by System	Policy Implication	Example	
Metrics	C	System has no defined end point or equilibrium point, and must be understood in process or performance terms	System can be managed to have desired behaviors emerge, cannot be managed towards a defined end point	Adaptive management of forests or fisheries; engineering the Baltic Sea	
	S	May not be necessary because performance measured by attaining end point, not monitoring system state	End points are metrics	Successful completion of an engineering design or project	
	C	Defined in process or performance terms, and change over time because system itself constantly evolving	Manage process adaptively over time to improve performance against metrics; choice of appropriate set of metrics essential, but subject to improvement over time as well	Engineering the Everglades; designing climate change adaptation systems	

Ingeniería Sostenible Diana Ita, Ph.D.



Function	Type	Function as Displayed by System	Policy Implication	Example
Existence	S	Produce end point	Can minimize specific insult (e.g., lead dispersion from use in gasoline); cannot lead to or support achievability of sustainability	Chemical and material bans
	C	Maintain system stability and integrity over time; build systems functions such as resiliency	Policies with complex systems must be adaptive and focus on behavior of system as a whole. Managing to end points does not work; rather, goal must be on maintaining system performance given unpredictability of system	Engineering the Everglades; designing and managing infrastructure in a large city

Allenby 2013

Ingeniería Sostenible

Diana Ita, Ph.D.



Evolución de Sistemas Complejos

Todos los sistemas complejos evolucionan en respuesta a las condiciones cambiantes del entorno y las dinámicas internas.

Ingeniería Sostenible

Diana Ita, Ph.D.



Evolución de Sistemas Complejos

La evolución se produce como resultado de **tres mecanismos vinculados de manera compleja**:

Almacenamiento y transmisión de Información

Mutación (generación de nuevas alternativas para los agentes del sistema)

La **selección entre alternativas** en función del rendimiento determinado los estados internos y las condiciones externas de frontera

Estructura de la Red y Resiliencia

La estructura del sistema afecta su resiliencia a cambio de su entorno.

Por ejemplo, las redes de libre escala (pocos centros – hubs – súper conectados) se comportan muy diferentes a las redes aleatorias.

Estructura de la Red y Resiliencia

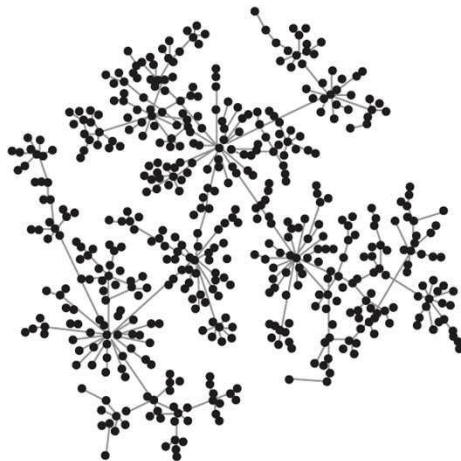
Resiliencia -> Capacidad de un sistema de mantener sus funciones y estructura producto de un cambio interno o externo (Allenby & Fink, 2005).

Sostenibilidad -> Resiliencia
Resiliencia \neq Sostenibilidad

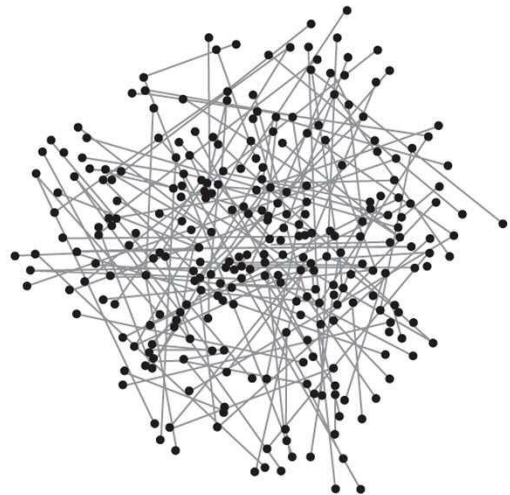
La resiliencia es una condición necesaria de la sostenibilidad (Xu, 2009).

• Scale-free vs. Random

Credito: Ming Xu



Scale-free network



Random network

Las redes se utilizan para ilustrar dos tipos de sistemas complejos

Las implicaciones operativas de cada una son muy diferentes, por ello es importante para un ingeniero no solo entender si es un sistema complejo, pero cuál es su estructura.

Redes sin-escala son muy resilientes a fallas aleatorias

Si un enlace o centro falla, el sistema puede redirigirlas, pero....

Estas redes pueden ser muy sensibles a ataques diseñados:

Ataca un par de centros y la red sin escala desaparece.

Estructura de la Red y Resiliencia

¿Es importante para el mundo real?

Muchos sistemas de infraestructura son redes sin-escala (*scale-free networks*)...

Internet

¿Red sin escala o Red aleatoria?

Es muy resiliente a fallas aleatorias por ser sin escala

Internet

Ataque a las Torres Gemelas (World Trade Center).

En general, la tecnología del internet continuó trabajando bien.

Fue un ataque intencionado, pero no fue un ataque dirigido específicamente al internet.

Sistemas Complejos

Los sistemas complejos se caracterizan por tener interacciones fuertes y, generalmente, no lineales entre las partes.

Sistemas Complejos

Los sistemas complejos contienen ciclos de retroalimentación (*feedback loops*) que hacen que sea difícil distinguir entre la causa y el efecto.

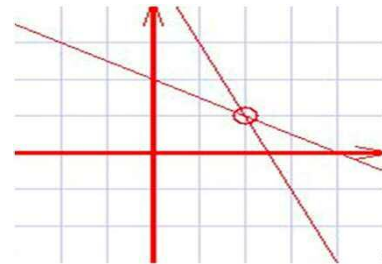
Sistemas Complejos

Los sistemas complejos presentan considerables **desfases temporales y espaciales, discontinuidades, umbrales y límites**, y tienden a **operar lejos del equilibrio** en un **estado de constante adaptación** a las condiciones cambiantes.

Operan al borde del caos determinista.

Sistema Lineal

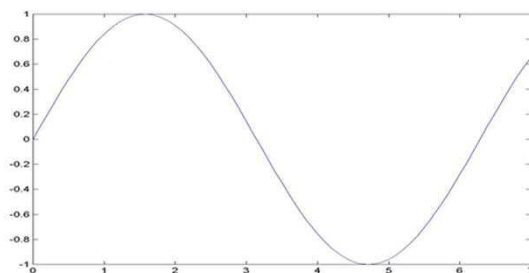
- Los sistemas lineales son simples. Un cambio en la configuración del sistema resulta en una respuesta lineal proporcional a la entrada. ($y = Ax + B$)
 - Usualmente usados como aproximación de sistemas más complicados porque son más fáciles de calcular.



Dr. ir. Igor Nikolic, TU Delft

Sistemas no lineales

- Sistemas no lineales tienen una respuesta que no es proporcional a la entrada.
 - Son sencillos y predecibles. ($y = \sin x$)



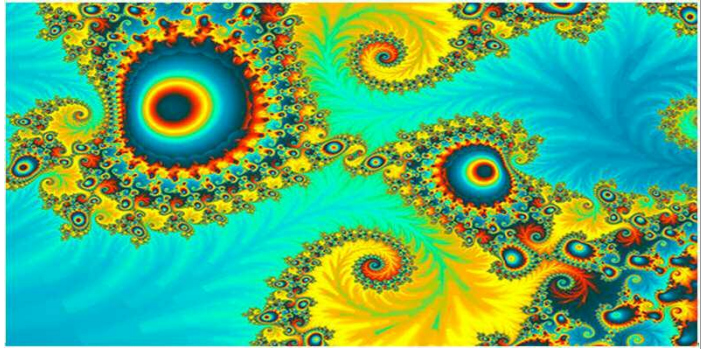
Dr. ir. Igor Nikolic, TU Delft

Sistemas caóticos no lineales

- Algunos sistemas no lineales expresan un comportamiento caótico.
 - Extremadamente sensibles a las condiciones iniciales
 - $Z = Z^2 + Ci$

Un fractal es un objeto semigeométrico cuya estructura básica, fragmentada o irregular, se repite a diferentes escalas. (Wikipedia)

Aun no son sistemas complejos



Dr. ir. Igor Nikolic, TU Delft

Sistemas complejos, ejemplos

- Economía
- Ecosistemas
- Sistemas políticos
- Clima
- Sistemas humanos
- Cerebro humano

Entendamos los Sistemas Complejos con dos ejemplos: La marisma salina, y el caso de Wall Street

Ingeniería Sostenible

Diana Ita, Ph.D.



La marisma salina

- Marisma: Terreno bajo y pantanoso que inundan las aguas del mar (RAE)
- Humedales costeros que se inundan y drenan por agua salada traída por las mareas. Son pantanosos porque el suelo puede estar compuesto de lodo profundo y turba (NOAA)



Ingeniería Sostenible

Diana Ita, Ph.D.

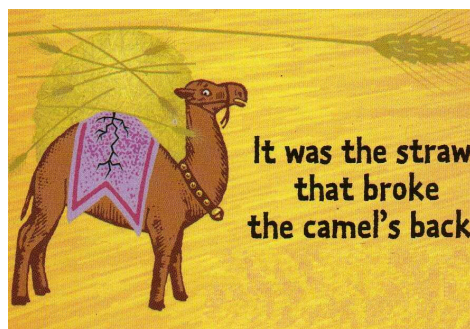


La marisma salina

- Producto de un mal diseño del drenaje de tormentas de un pueblo, la marisma salina está expuesta a niveles crecientes de contaminación.
- La marisma marina no parece ser afectada por un tiempo, pero a medida que la salud y número de algunas especies del pasto de la marisma comienzan a decaer debajo del punto crítico, rápidamente decae a una marisma desnuda.

La marisma salina

- Respuesta no lineal: una pequeña adición resulta en un cambio dramático en el estado del sistema.



La marisma salina

- Ciclos de retroalimentación: el daño a la marisma no se detiene con el pasto, pero se retroalimenta en otras especies, reduciéndolas e induciendo el colapso del sistema principal (“especies clave”).
- Discontinuidades y desfases: salto de una saludable marisma a una marisma desnuda no ha sido un cambio suave, pero rápido a un estado bastante diferente.

La marisma salina

- Un sistema complejo como una marisma salina nunca está en su estado final, pero siempre está adaptándose a nuevas condiciones

Wall Street

- 1980 → Muchos corredores de acciones comenzaron a mecanizar el comercio para poder capturar ganancias por arbitraje antes que otros: capacidad de realizar operaciones con rapidez para capitalizar las pequeñas diferencias temporales en los precios.
- Los programas de comercio estaban programados para vender rápidamente las acciones en caso de que el mercado caiga para así evitar grandes pérdidas.

Wall Street

- Los primeros adaptadores de esta tecnología tuvieron grandes ganancias → el uso se expandió
- Octubre 1987: La bolsa cayó rápidamente provocando que los programas de comercio vendan automáticamente. La venta de acciones hace que el mercado baje → más ventas → colapso del mercado.
- No había ninguna causa externa que justifique este colapso, solo fue resultado de una estructura y dinámica interna.

"All the News That's Fit to Print"

The New York Times

VOL. CXXXVII, No. 47,298 NEW YORK, TUESDAY, OCTOBER 26, 1987 30 CENTS

STOCKS PLUNGE 508 POINTS, A DROP OF 22.6%; 604 MILLION VOLUME NEARLY DOUBLES RECORD

U.S. Ships Shell Iran Installation In Gulf Reprisal

Offshore Target Topped a Base for Gunboats

By STEVEN ROBERTS

A few hours later, a naval commando detachment boarded a shore platform five miles away and destroyed radar and communications equipment, Pentagon officials said.

No American casualties were reported in the action, which occurred 120 miles east of Bahrain at about 2 P.M. (7 A.M. Eastern Daylight time).

A 30-Minute Warning

American officials said the attacking force took pains to avoid hitting Iraq ships, giving the crew on the first two platforms a 30-minute warning before the destroyers, stationed about 20 miles away, began the shelling.

At the United Nations, an Iranian delegate said "several innocent people" had been killed in the attack, but the American could not be confirmed.

With the bombardment, the Administration promised to send a message to Iran. The United States had shown its

A Huge Blow to the Five-Year Bull Market

The Dow Jones industrial average, which has been surging since August 1982, began a dramatic fall last week that continued through yesterday when it closed at 1,733.74, down 508 points from Friday's close.

Source: Knight-Ridder Information

Does 1987 Equal 1929?

By ERIC GELMAN

As stock prices soared this year, at Moore, director of the Center for International Business Cycle Research at Columbia University.

To be sure, there are some unsettling similarities between the current rise and the great Depression years. Like the Roaring Twenties, the 1980's have seen an astonishing boom. Wall Street, however, then, individual and corporate debt was high, and some sectors of the economy are extremely weak. Trade relations are strained, with protectionist sentiment growing.

But today's economy is better equipped to handle financial shocks. "It isn't as this decline in the stock mar-

WORLDWIDE IMPACT

Frenzied Trading Raises Fears of Recession — Tape 2 Hours Late

By LAWRENCE J. DE MARIA

Stock market prices plunged in a tumultuous wave of selling yesterday, giving Wall Street its worst day in history and raising fears of a recession.

The Dow Jones industrial average, considered a benchmark of the nation's health, plummeted a record 508 points, to 1,733.74, based on preliminary calculations. That 22.6 percent decline was the worst since World War I and far greater than the 12.82 percent drop in Oct. 26, 1929, that along with the next day's 11.7 percent decline preceded the Great Depression.

Since hitting a record 3,025.42 on Aug. 25, the Dow has fallen almost 1,000 points, or 33 percent, putting the blue-chip indicator 127.3 points below the level at which it started the year. With Friday's plunge of 508.35 points, the Dow has fallen more than 30 percent in the last two sessions.

Unprecedented Trading

Yesterday's frenzied trading on the nation's stock exchanges lifted volume to unheard-of levels. On the New York Stock Exchange, an estimated 384.3 million shares changed hands, almost double the previous record of 198.3 million shares set just last Friday.

With the tremendous volume, reports of heavy trading on the New York

"From the beginning of the year to Black Monday, the Dow Jones was up by nearly 38%, so some analysts believe that excessive optimism and bubbly stock valuations set the stage for the crash. Also, computerized trading programs were gaining a lot of popularity at the time, and many programs sold future contracts to protect portfolios when the market was falling. Exacerbated selling by these computer programs was identified as one of the main causes of the collapse."

Ingeniería Sostenible

Diana Ita, Ph.D.

Wall Street

- Respuesta no lineal: en la región crítica del sistema (rango de precios donde las computadoras comienzan a vender) un cambio pequeño en el precio indujo un gran cambio en el comportamiento del sistema (todos comenzaron a vender)
- Ciclos de retroalimentación son evidentes: Cambios del comportamiento de una computadora rápidamente afectaron otras.

Ingeniería Sostenible

Diana Ita, Ph.D.

PUCP

24

Wall Street

- Efectos en el umbral son también evidentes: en regiones de precio arriba del punto crítico las computadoras funcionaron como se esperaba. Cuando el precio tocó el punto de venta programado, la caída del mercado fue inmediata y discontinua.

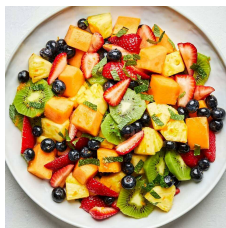
Umbral: Valor mínimo de una magnitud a partir del cual se produce un efecto determinado.
(RAE)

Wall Street

No hay un estado de equilibrio en el mercado de valores, sólo ajustes complejos a medida que los precios de las acciones y el mercado cambian en respuesta a dinámicas internas y externas.

Sistemas complejos

Muchos sistemas pueden comportarse como simples (régimen linear) bajo algunas circunstancias o complejos (régimen no-linear) frente a otras.



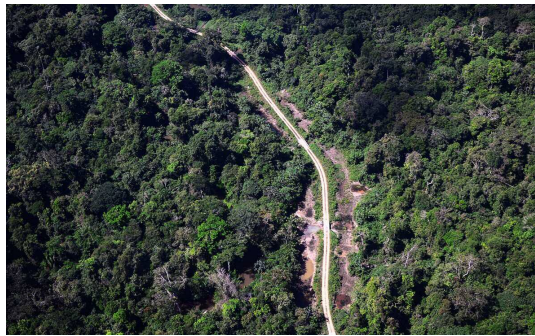
Sistema complejo adaptativo (CAS)

Son redes dinámicas, interactuantes, y auto-organizadas que cambian como respuesta a variaciones en los estados internos o externos, para poder continuar funcionando el mayor tiempo posible.

Frecuentemente muestran comportamientos emergentes, que son impredecibles y que surgen no por componentes individuales del sistema sino por la totalidad del sistema. Ejemplos: Bolsa de valores, economías grandes, sistemas políticos, ecosistemas, cerebro humano. (Allenby)

¿Por qué es importante entender la
complejidad?

¡La ingeniería involucra sistemas complejos!



Autos eléctricos y biocombustibles

¿Por qué **no enamorarse** de una **tecnología**?

Estados Unidos, etanol y sus impactos..
¿Recuerdan?

Nos enseñó que no es buena idea enamorarse de
una **tecnología**, ni de una **ideología**, ni de una
palabra de moda...

The 2007 “tortilla crisis”
where corn prices doubled
due to its use in biofuels

Al escalar rápidamente un
sistema complejo, no se
permitió que se realicen
ajustes en todos los demás
sistemas acoplados a él



Autos eléctricos y biocombustibles

Producto de la histeria del cambio climático
combinando con el éxito de la tecnología de
autos híbridos, está generando **gran presión en
los vehículos eléctricos.**

Autos eléctricos y biocombustibles

Estos vehículos son vistos como: **libres de emisiones, carbono neutral...**

...importantes enunciados morales

Autos eléctricos y biocombustibles

Ambientalistas y reguladores progresistas demandan cada vez más que paremos medidas imparciales que atentan contra el sistema climático y que se decida de una vez por los autos eléctricos...

¿Déjà vu del etanol basado en maíz?

Autos eléctricos y biocombustibles

Hay algunos problemas tecnológicos, tales como la búsqueda de **baterías apropiadas** para la demanda de potencia del auto (combinación de potencia en el auto y recarga rápida) e **infraestructura para la recarga**.

¿Cuál es el problema más grande?

¿Qué pasa si se utilizan carros eléctricos a grandes escalas?

Autos eléctricos y biocombustibles

¿Qué tipo de producción de electricidad e infraestructura de distribución necesitaríamos?

Las energías renovables requieren de mucho más tiempo para sustituir a las energías no renovables en la producción de electricidad

¿Más plantas basadas en carbón?

Autos eléctricos y biocombustibles

¿A qué **escala** podemos introducir tecnologías nuevas para **aprender de ellas** sin empujar a los sistemas enlazados a comportamientos no lineales?

¿Qué tan rápido podrá ser la transición?

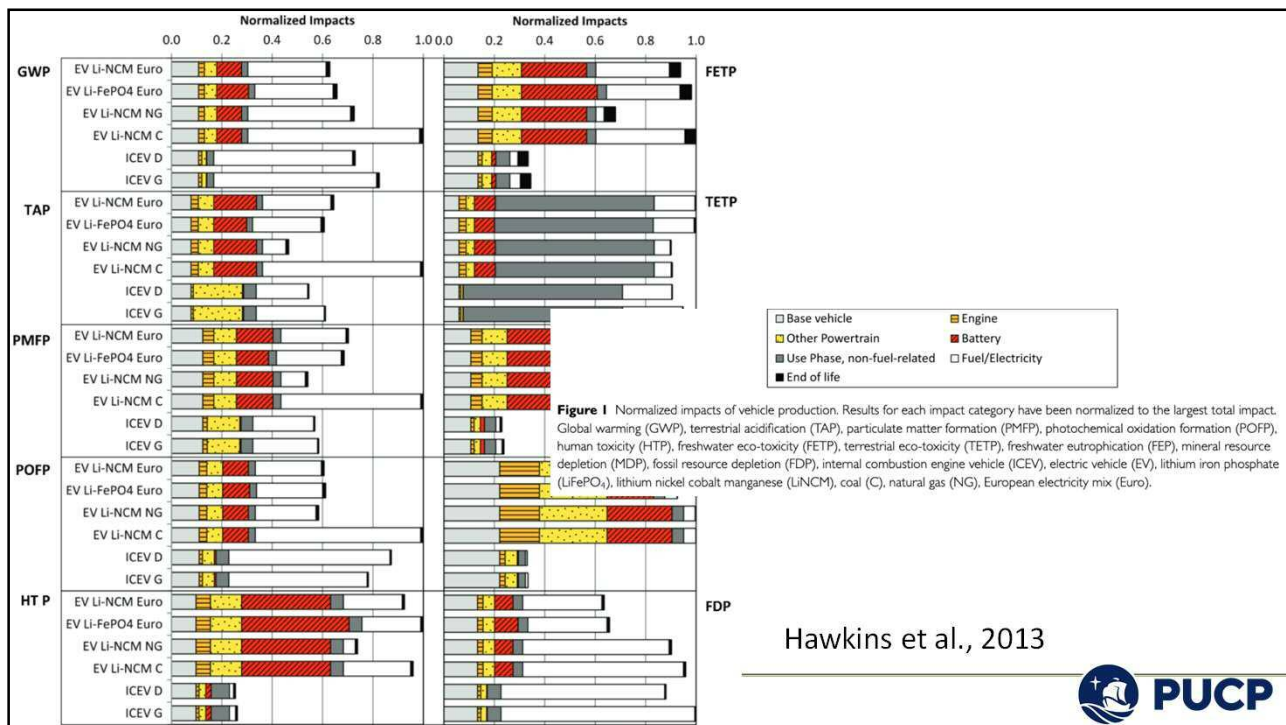
¿Qué recursos necesitamos?

Table 1 Vehicle components

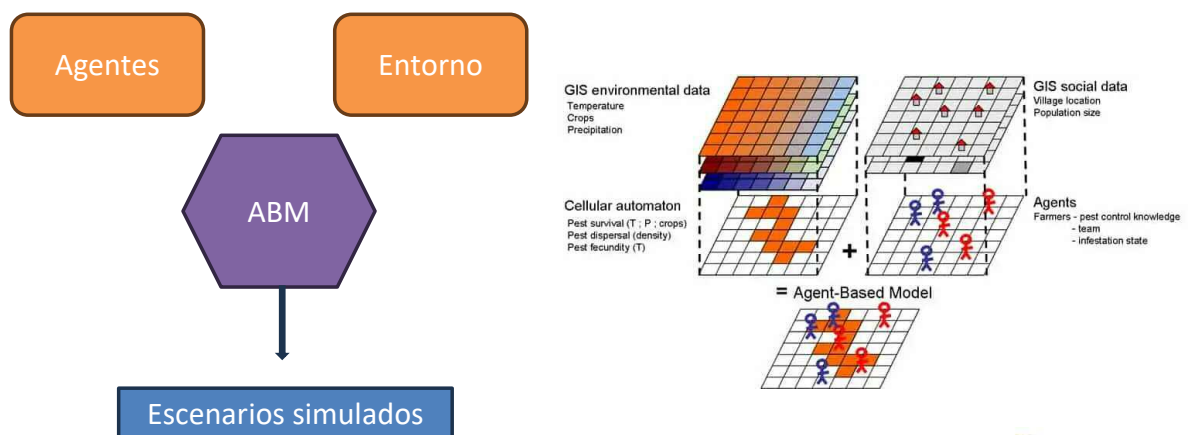
Category	Component	ICEV	EV, LiFePO ₄	EV, LiNCM	Data sources
Glider	Body and doors	X	X	X	a–d
	Brakes	X	X	X	a, e–g
	Chassis	X	X	X	a, h
	Final assembly	X	X	X	h
	Interior and exterior	X	X	X	a, i
	Tires and wheels	X	X	X	a, h–k
	Engine	X			a, h, b, c
ICEV	Fluids	X			a, b, i, j
	Other powertrain	X			a, i, l
	Transmission	X			d, h, m
	PbA batteries	X			a, i, o, p
EV	Motor, control, and inverter				
	Fluids				
	Differential				
	LiFePO ₄ battery				
	LiNCM battery				

Note: ICEV = internal combustion engine vehicle; EV = electric vehicle; LiNCM = lithium nickel cobalt manganese; LiFePO₄ = lithium iron phosphate; PbA = lead acid.
a = Burnham et al. (2006); b = Sullivan et al. (1998); c = USAMP

Hawkins et al., 2013

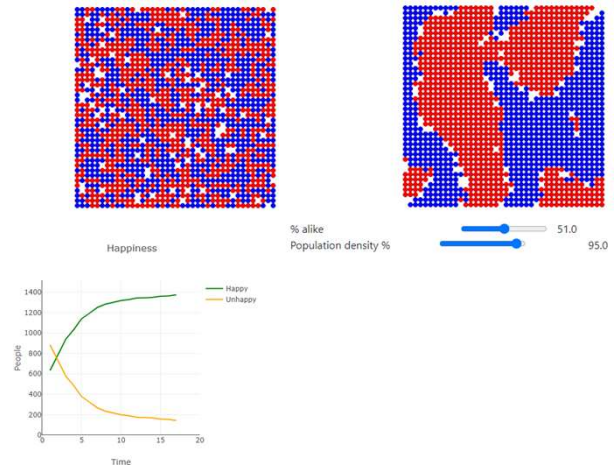


Un modelado basado en agentes (ABM) permite simular sistemas complejos

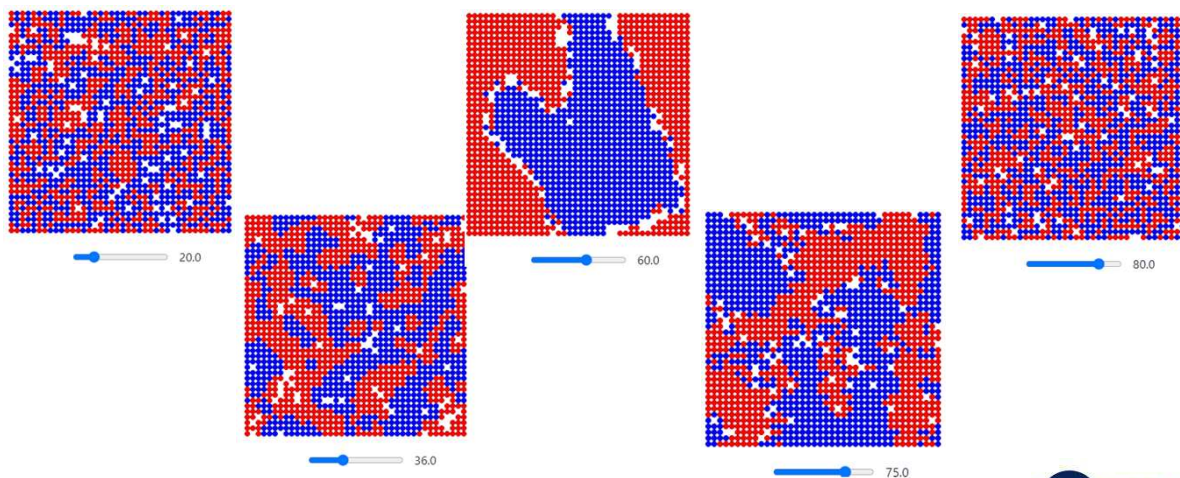


El modelo de segregación de Schelling explica de manera sencilla los comportamientos emergentes.

- La ciudad se representa por el cuadrado
- Cada persona (agente) tiene una casa en la grilla.
- Cada agente es de dos tipos, rojo o azul.
- Se mide la felicidad de cada agente con la proporción de personas como ellos en su vecindario local.
- Si el agente está triste, se mueve.
- El comportamiento colectivo de todos los agentes genera patrones de segregación.
- Estos comportamientos se conocen como "emergentes"



La importancia de este modelo radica en que es posible explicar a partir de las reglas de conducta de los agentes individuales resultados sociales que, en principio, no son evidentes o fácilmente predecibles.



¿PREGUNTAS?
¡GRACIAS!