

Introducción a los sistemas complejos



Complejidad combinatoria

- Número de componentes de un sistema, o en el número de posibles combinaciones que hay que efectuar al momento de tomar una decisión.
- Este tipo de complejidad se conoce como complejidad combinatoria.
- Es función tanto de las variables como de las funciones que rigen o modelan el sistema



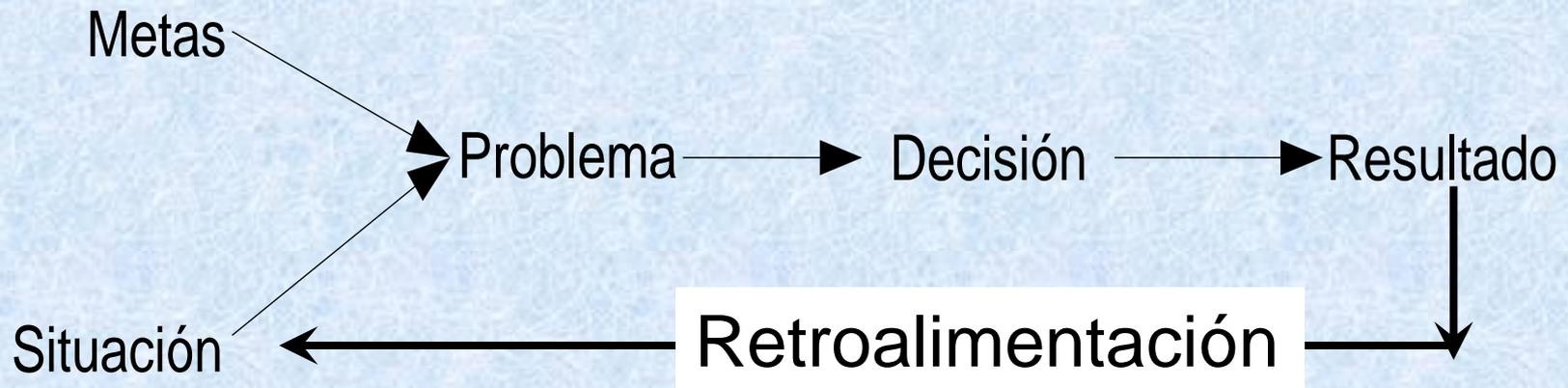
Complejidad dinámica

- Es función de las relaciones e interacciones, a través del tiempo, entre los diferentes componentes del sistema, ya sea entre ellos como con el exterior.
- La complejidad dinámica no es necesariamente función de la complejidad combinatoria



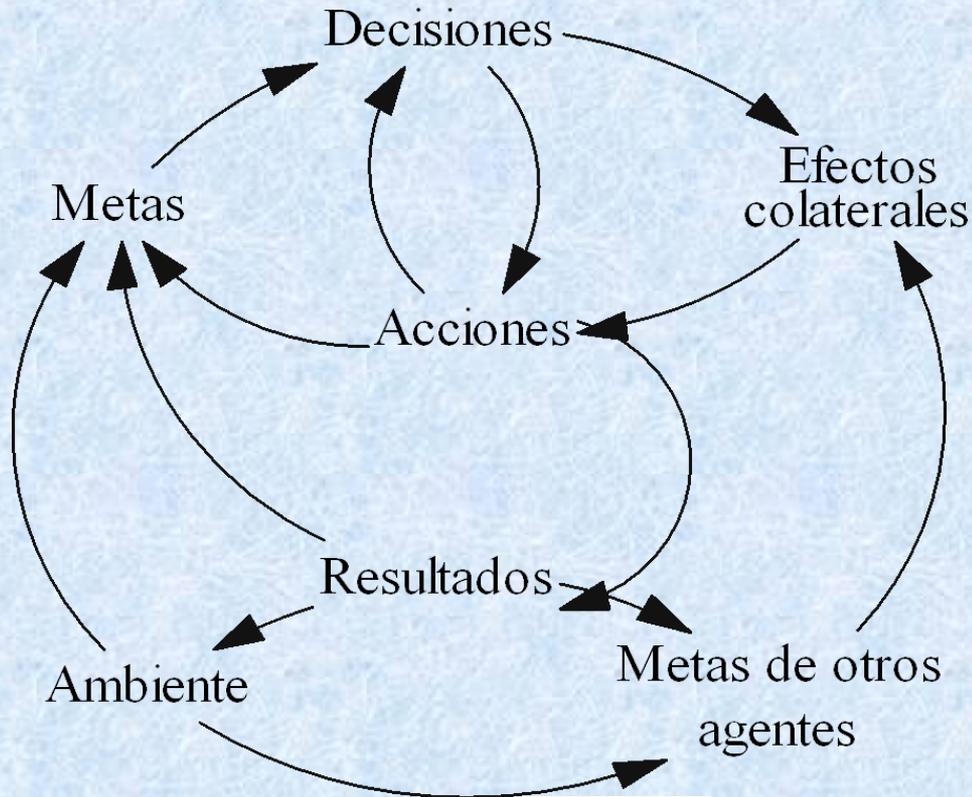
Como actuamos

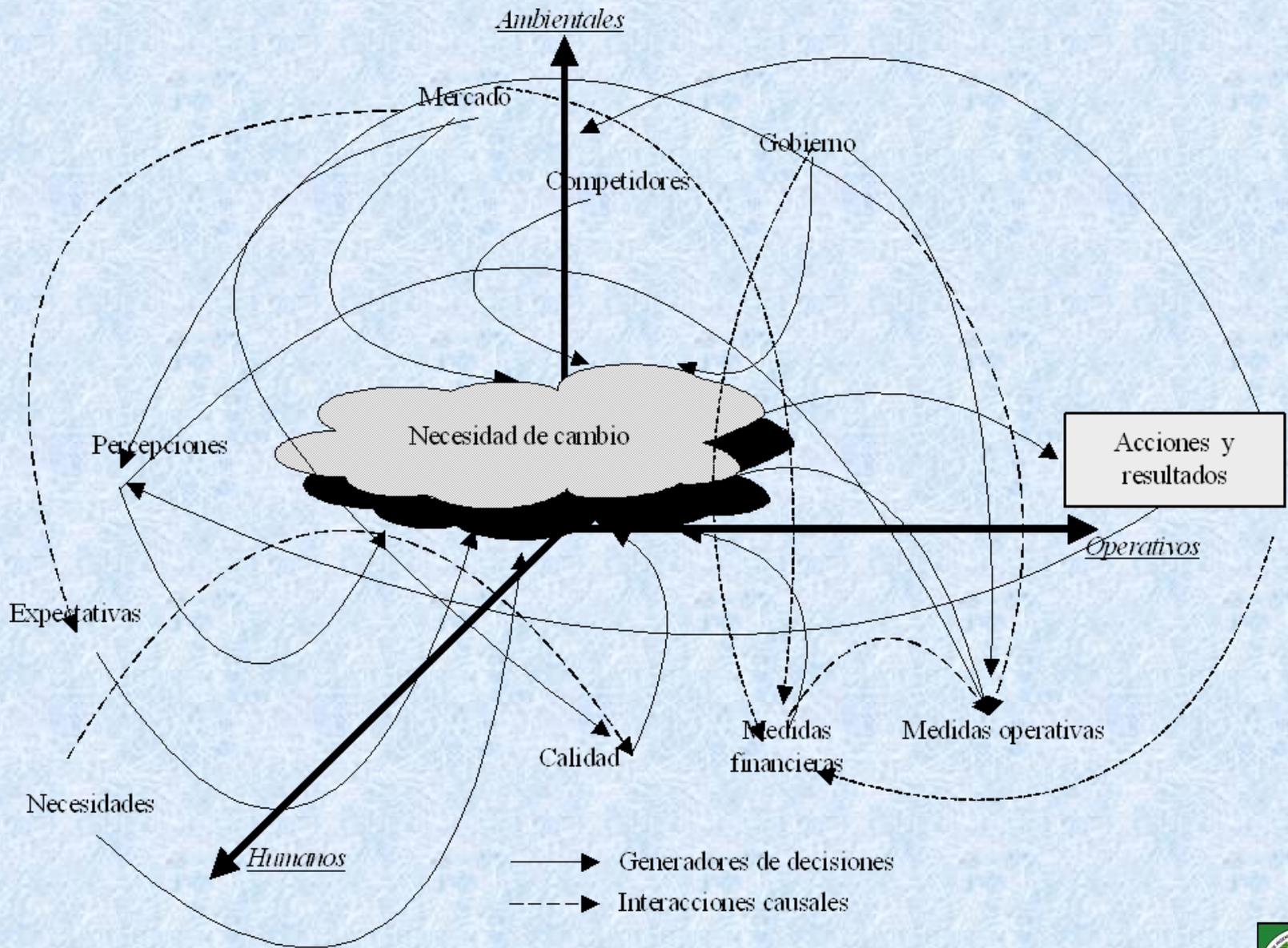
- Generalmente enfocamos los procesos de decisión como una serie de acciones secuenciales



La retroalimentación

- Existen efectos de retroalimentación que afectan el sistema





Sistemas dinámicamente complejos

- **Dinámicos:** el cambio ocurre de manera continua a través del tiempo, pero en escalas diferentes, las que muchas veces interactúan.
- **Acoplamiento:** los actores dentro del sistema interactúan entre ellos y con el mundo real.
- **Retroalimentación:** las acciones se ven retroalimentadas por sí mismas.
- **No linealidad:** los efectos raramente son proporcionales a sus causas y en general, se puede decir que son efectos locales más que globales.



- **Dependientes del pasado:** también conocido como “dependencia de ruta”, las acciones serán funciones de la experiencia o resultado de las acciones anteriores.
- **Autoorganizados:** debido a que la dinámica de los sistemas nace por su estructura interna, pequeñas perturbaciones son ampliadas y moduladas por la retroalimentación creando patrones en el espacio y tiempo.
- **Adaptables:** las capacidades y las reglas de decisión cambian a través del tiempo, lo que hace que haya evolución de los sistemas.



- **Contra- intuitivos:** los efectos y las causas están alejadas en el tiempo, lo que hace que se vean más los síntomas que las causas que los causan.
- **Resistentes al cambio:** la complejidad de los sistemas hace difícil la capacidad de entenderlos, por lo que sus acciones no necesariamente parecen lógicas en función a soluciones dadas.
- **Caracterizados por “negociar”:** los sistemas complejos se caracterizan por presentar soluciones a corto plazo que mejoren transitoriamente, que soluciones a largo plazo que busquen mejoras permanentes pero con comportamientos transitorios no del todo óptimos.



Además:

Su componente principal es el ser humano

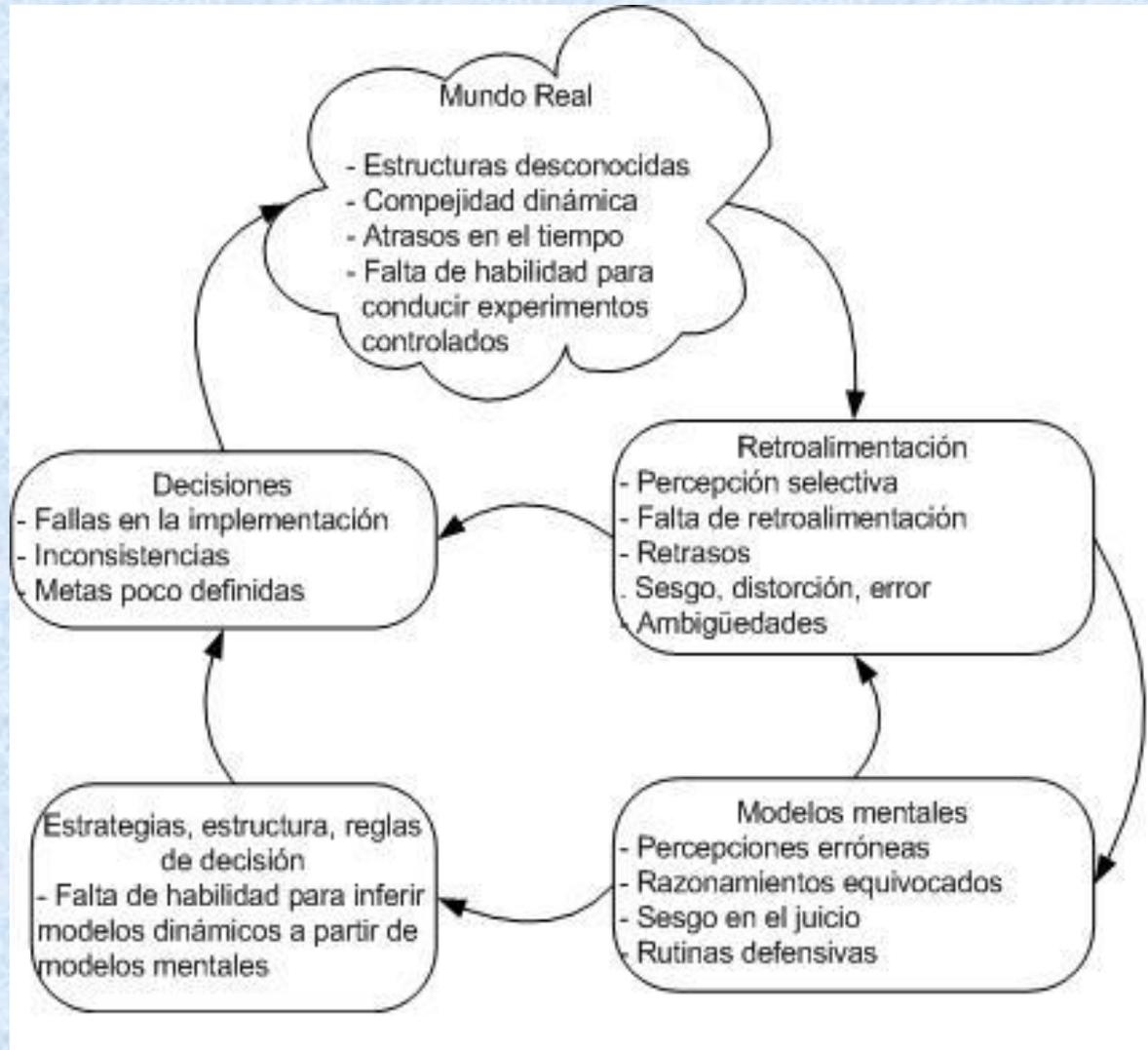


En resumen

- En un sistema social complejo
 - La respuesta a las decisiones y acciones en sistemas sociales complejos es no lineal
 - Los efectos raramente son proporcionales a sus causas
 - Los resultados son localmente diferentes en el sistema a pesar de tener un objetivo global
 - Son resistentes a cambios
 - Tienen la capacidad de reconfigurarse a si mismo en nuevas formas después de un cambio o decisión dramática



Elementos que limitan el aprendizaje



Enfoques que rigen la toma de decisiones

- **Teoría racional**
 - Se conocen las alternativas
 - Se conocen las consecuencias
 - Reglas para priorizar
 - Reglas o criterios de decisión
 - Solución óptima



Enfoques que rigen la toma de decisiones

- **Teoría de la racionalidad limitada**
 - Modifica la teoría racional
 - Conocimiento limitado de alternativas
 - Conocimiento limitado de consecuencias
 - Reglas para priorizar
 - Reglas o criterios de decisión
 - Se busca satisfacer



Enfoques que rigen la toma de decisiones

- **Toma decisiones basada en reglas**
 - Alternativa realista a las anteriores
 - Decisiones definidas por procedimientos, estándares, reglas o políticas
 - Toma decisiones basadas en los siguientes factores:
 - Identidad: decisiones basadas en situación particular
 - Situación: situaciones están clasificadas en categorías con reglas asociadas a la identidad
 - Relación: acciones específicas para atacar situaciones que estén de acuerdo a sus identidades en dichas situaciones



Conflictos en las decisiones

- El dilema de cuál es el mejor enfoque: el racional o el enfoque basado en reglas.
- ¿Se alcanza coherencia y reducen errores o son procesos en los cuales se exhibe, se explota y se aumenta la inconsistencia y ambigüedad?
- Son instrumentos para resolver problemas o son interpretadas para coincidir con modelos sociales e interpretativos



En conclusión

- Una decisión es un juicio.
- Normalmente no se puede hablar de una decisión correcta o incorrecta.
- Implican algún tipo de compromiso,
- Se alcanzarán resultados “casi correctos”, o soluciones óptimas locales y no globales



Modelos y la toma de decisiones

- El proceso racional de toma de decisiones utiliza modelos y reglas matemáticas
- Estos modelos y reglas permiten un proceso sistemático y ordenado de toma de decisiones
- La idea de utilizar modelos no es nueva: mapas, diagramas de flujo, gráficas y ecuaciones básicas apoyan el proceso racional de toma de decisiones



¿Qué es un modelo?

- Viene del latín “modus”: una forma de tamaño reducido
- Un modelo es una representación de un grupo de objetos o ideas de alguna manera diferente a la entidad misma
 - Es una abstracción de la realidad
 - Son ideales
 - No son exactos
- Su objetivo es el capacitar al analista para determinar como uno o varios cambios en las variables del sistema pueden afectarlo parcial o globalmente.

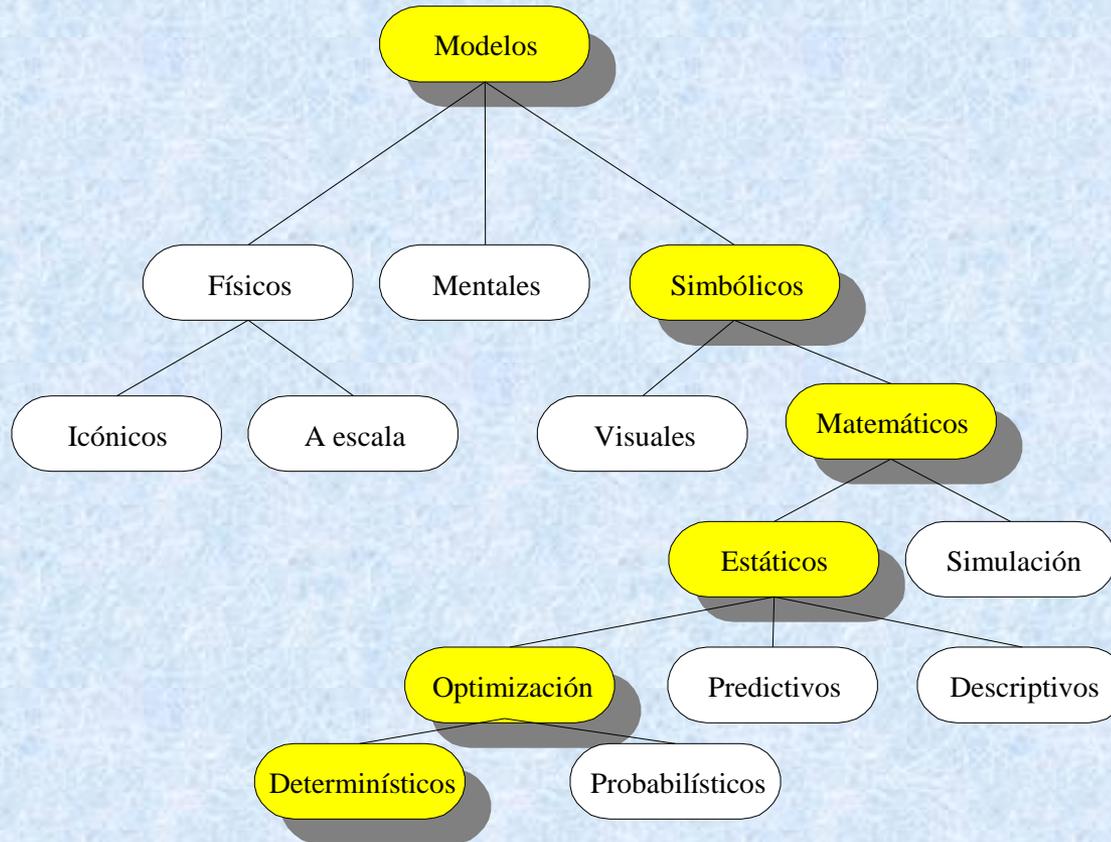


¿Por qué modelos?

- Para una mejor percepción del mundo
- Pensar de manera más clara
- Entender y usar datos
- Decidir, plantear estrategias y diseñar



Taxonomía

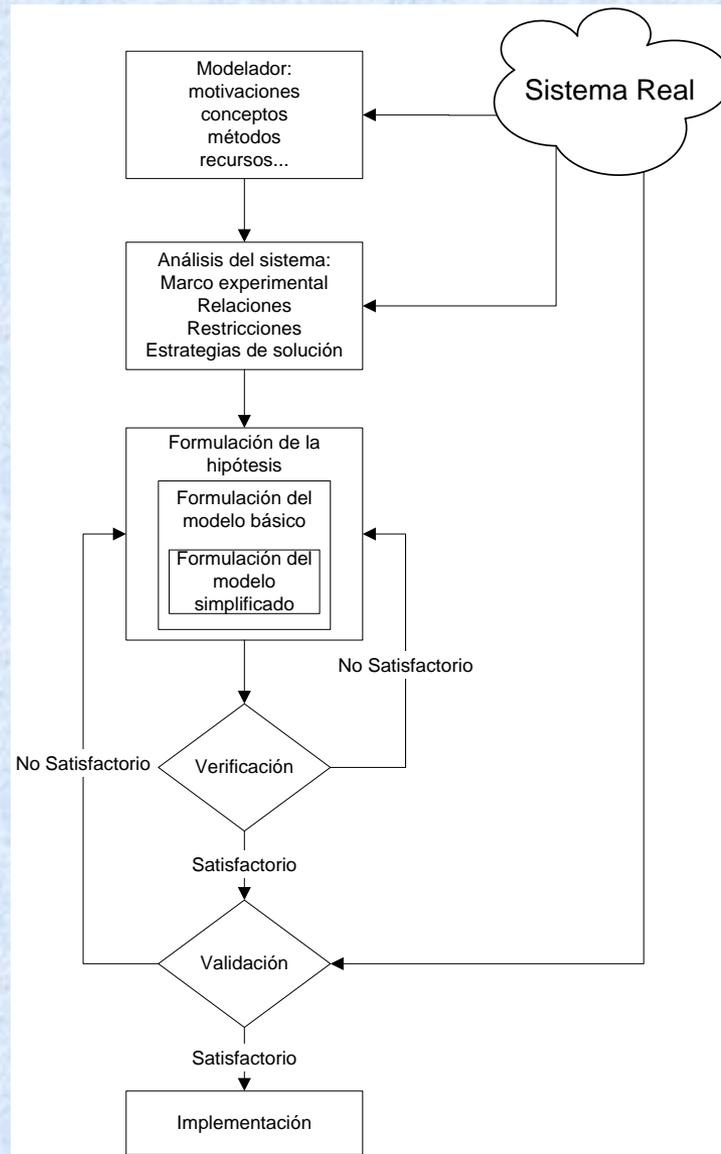


El Modelado

- Es el proceso por el cual se establecen relaciones entre las entidades importantes de un sistema que se expresa en términos de metas, criterios de ejecución y restricciones que en conjunto constituyen el modelo



Proceso de Modelado



Buenas decisiones vs. buenos resultados

- No necesariamente buenas decisiones resultan en buenos resultados
- El efecto de la incertidumbre puede afectar los resultados
- Riesgo vs. Certeza
- Minimizar riesgo minimizando sus elementos:
 - Humano
 - Ambiental

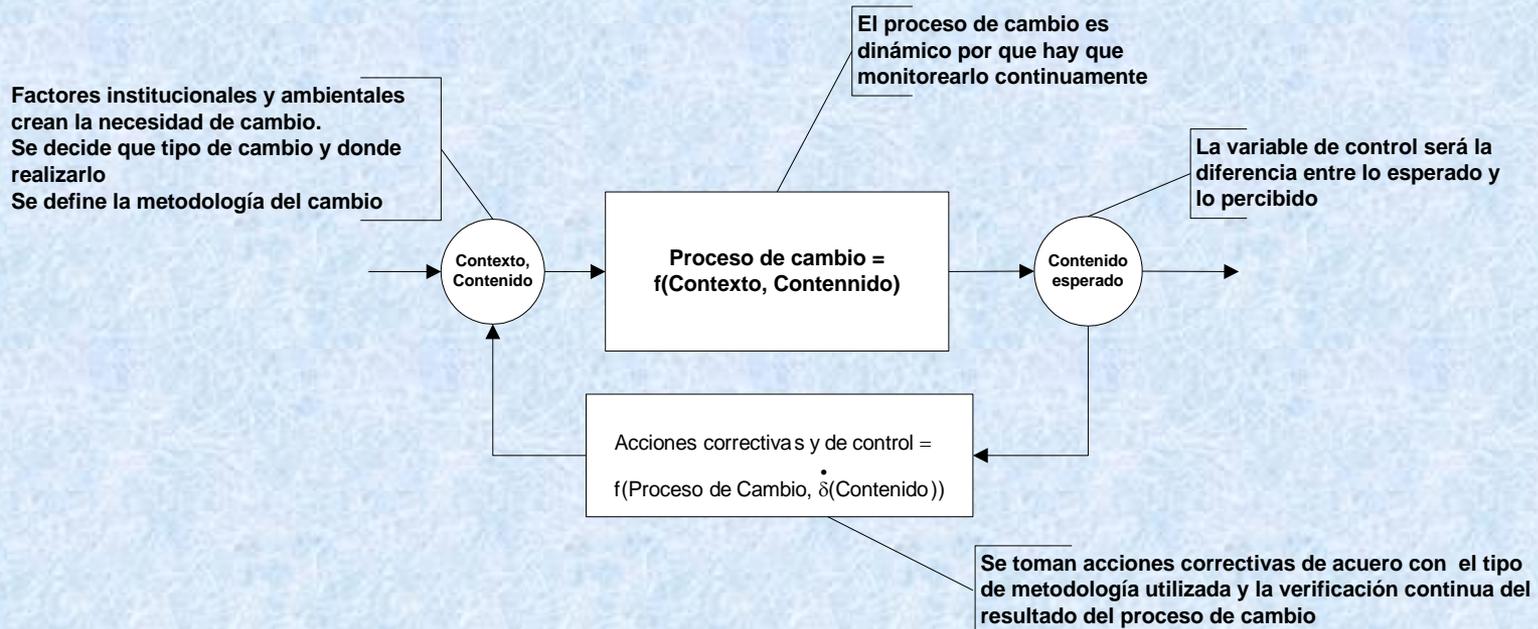


Enfoques para modelar

- Metodologías duras o fundamentalistas que suponen que el mundo es un sistema racional. El modelado se basa en ecuaciones y algoritmos bien definidos.
- Metodologías radicales o emancipatorias suponen que el mundo real puede llegar a ser un sistema de una manera en común a los individuos o grupos de individuos dentro del sistema. Los modelos y el análisis se orientan para mostrar las ventajas y desventajas de la situación bajo análisis.
- Metodologías interpretativas o suaves asumen que el mundo no es necesariamente un sistema racional. El modelado y análisis es creativo y basado en metodologías heurísticas



Metodologías Duras



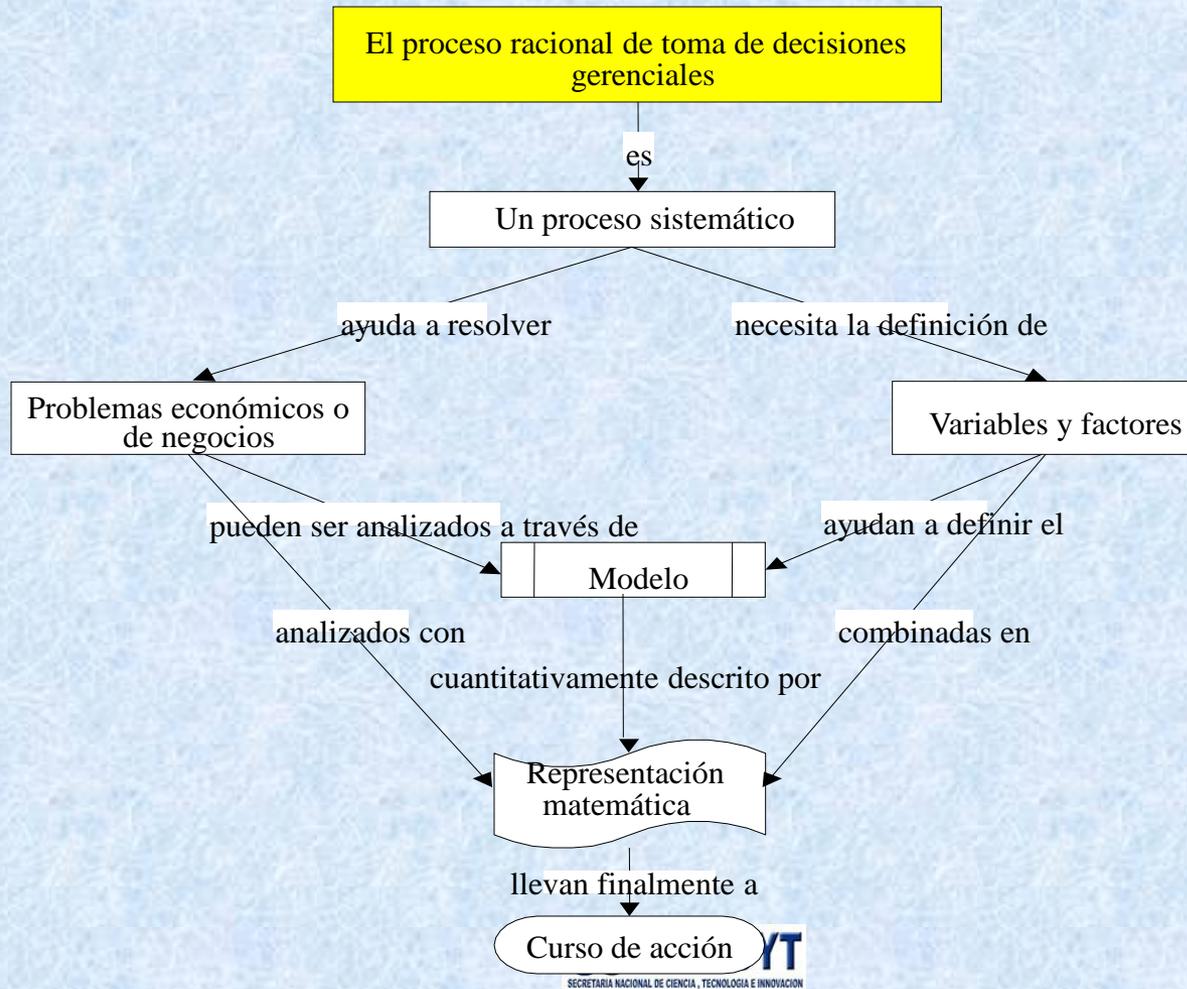
$$\Theta_o(t) = \frac{\text{Proceso de cambio}}{f(\text{Proceso de Cambio, Control y acciones correctivas})} \Theta_i(t_o)$$

Modelos Matemáticos

- Son expresiones idealizadas expresadas en término de expresiones y símbolos matemáticos (Mckeon, 1980)
- Describen relaciones funcionales de la forma: $Y = f(.)$



Modelos matemáticos y la toma de decisiones



Elementos de un modelo matemático

- Variables
 - **Independientes:** definen las condiciones del sistema en un momento dado
 - Endógenas
 - Exógenas
 - **Dependientes:** definen la respuesta del modelo
- Relación matemática



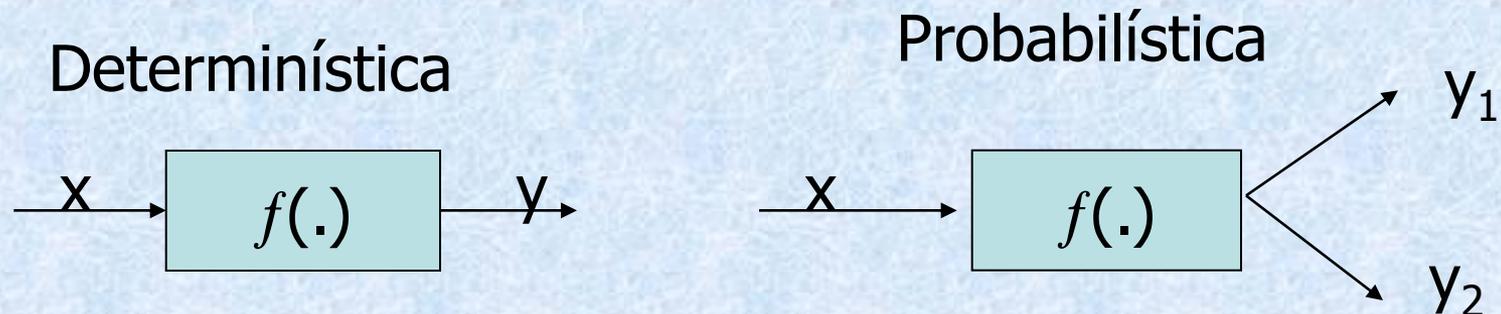
Categorías de los Modelos

Características

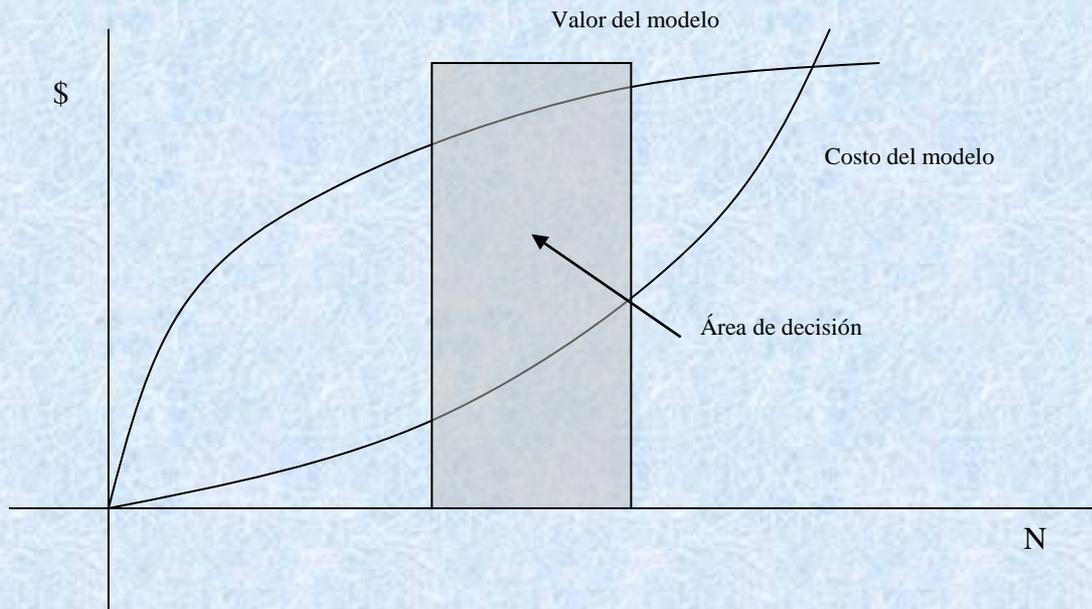
Categoría	Forma de $f(.)$	Variable independiente	Técnica cuantitativa
Prescriptivo u optimización	Conocida, bien definida	Conocida o bajo el control de tomador de decisiones	Programación lineal, entera o no lineal; Redes; CPM; EOQ
Predictivo	Desconocida, mal definida	Conocida o bajo el control de tomador de decisiones	Regresión, Series de Tiempo, Análisis de Discriminante
Descriptivo	Conocida, bien definida	Desconocida o bajo incertidumbre	Simulación, Colas, PERT, Modelos de Inventarios

Tipos de relación

- En función a su relación matemática – lineal o no lineal
- En función a sus resultados:

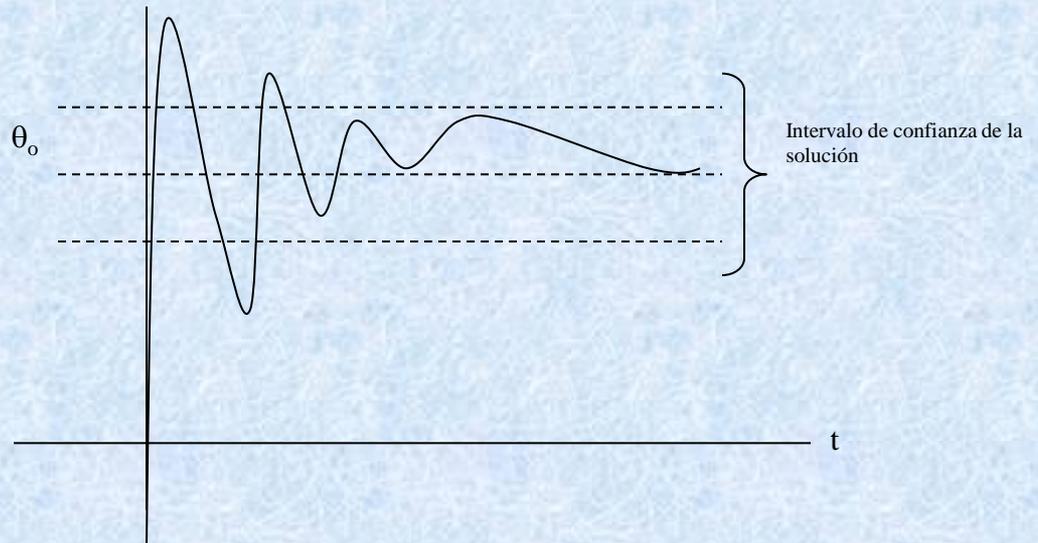


Costo vs. valor



Características del modelo

- Tratabilidad
- Trazabilidad
- Factibilidad
- Convergencia



Modelos de Optimización

- Tienen como propósito seleccionar la mejor decisión de un número de posibles alternativas, sin tener que enumerar completamente todas ellas.
- La Teoría de Optimización es una rama de la matemática aplicada que formula y explica estos problemas



Tópicos en optimización: Programación Matemática

- Objetivo:
 - Encontrar el mejor punto que optimice un modelo económico
- Formulación matemática
 - Optimizar $y(\mathbf{x})$
Sujeto a $f(\mathbf{x}) \geq 0 \quad \forall i, \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$
- Métodos:
 - Analíticos, Programación Geométrica, P. L., programación combinatoria, métodos heurísticos, métodos matemáticos discretos.

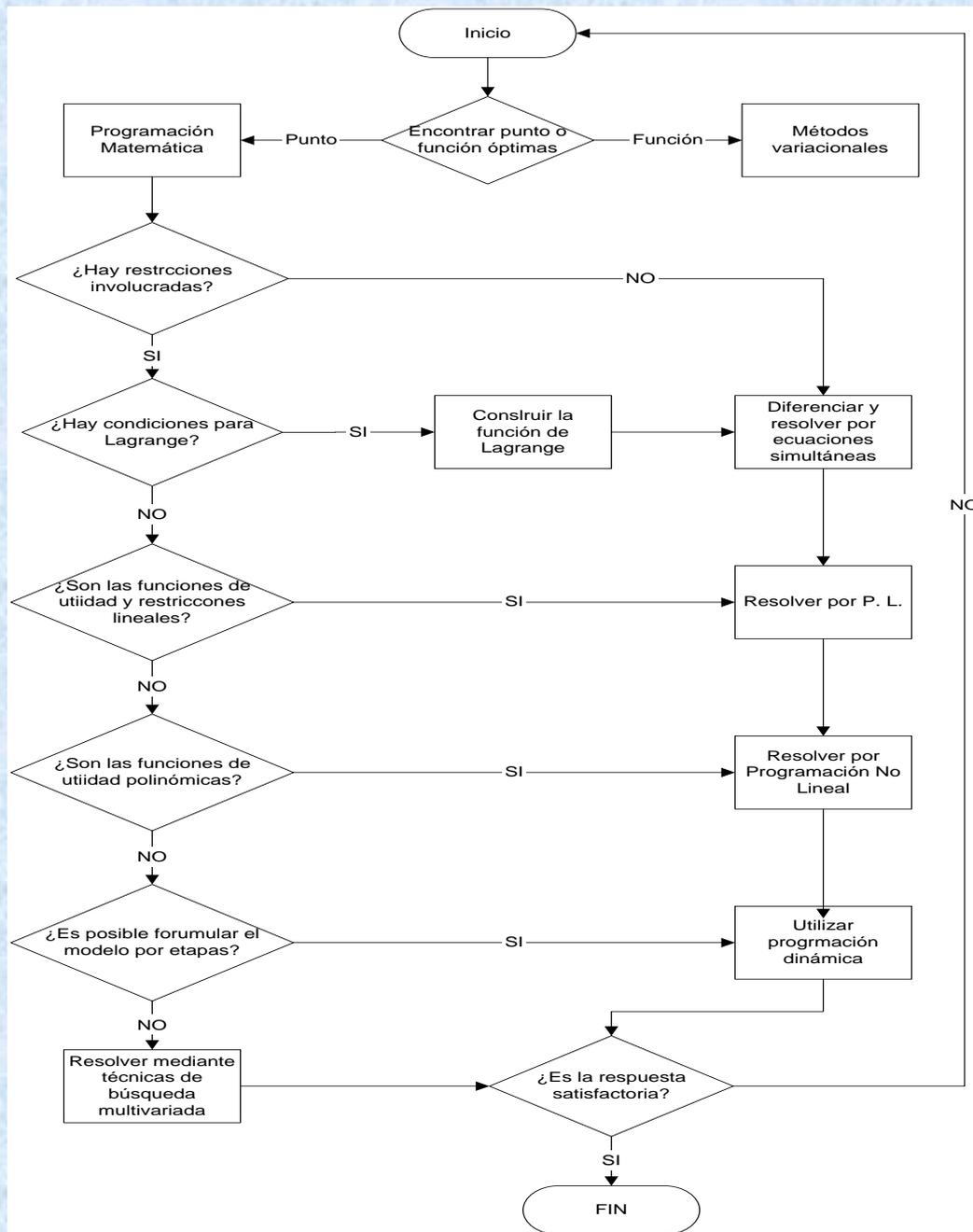


Tópicos en optimización: Métodos variacionales

- Objetivo:
 - Encontrar la mejor función que optimice el modelo económico
- Formulación matemática
 - Optimizar $I[y(x)] = \int F[y(x), y'(x)]dx$
Sujeto a las restricciones algebraicas de integración o matemáticas en general
- Métodos:
 - Cálculo de variaciones, modelos continuos.



Métodos de solución

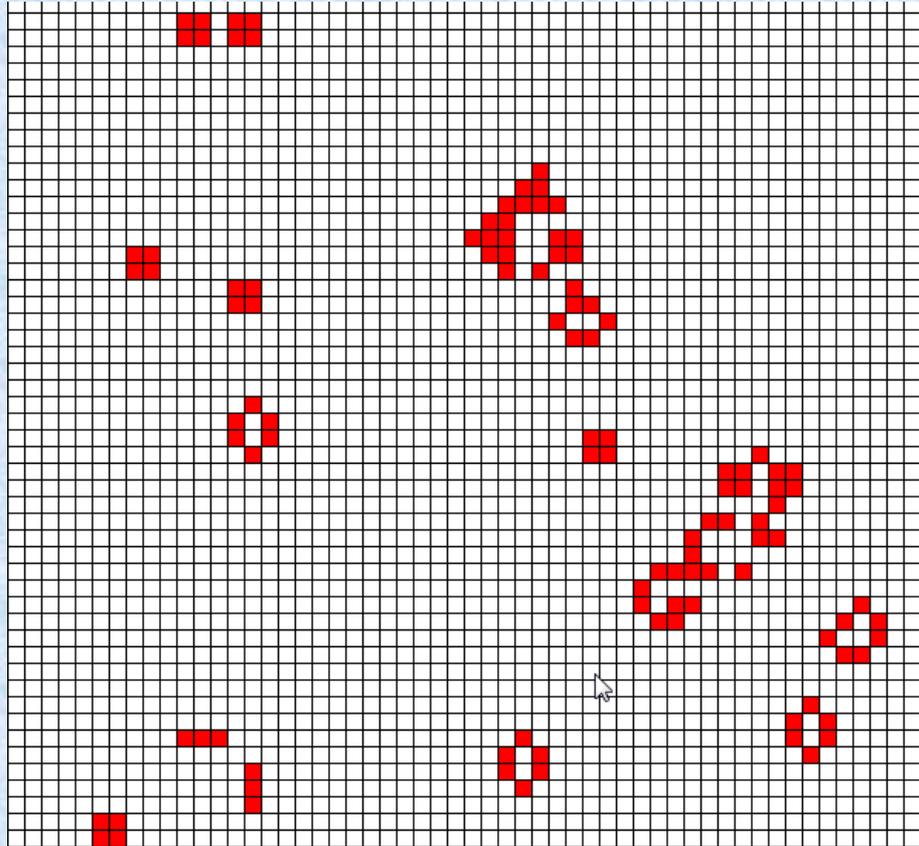


Solución del modelo de optimización

- Analítica
- Métodos numéricos
- Heurística
- Simulación
 - Discreta
 - Dinámica



Metodologías Radicales



Autómata celular

- Un **autómata celular** (A.C.) es un modelo matemático para un sistema dinámico que evoluciona en pasos discretos.
- Es adecuado para modelar sistemas naturales que puedan ser descritos como una colección masiva de objetos simples que interactúen localmente unos con otros.
- Fueron concebidos en los años 40 por Konrad Zuse y Stanislaw Ulam.
- Fueron puesto en práctica dentro del campo de la física computacional por John von Neumann en la década de 1950 con su libro *Theory of Self-reproducing Automata*.



Evolución

- La primera etapa la inicia von Neumann, quien una vez terminada su participación en el desarrollo y terminación de la primera computadora ENIAC tenía en mente desarrollar una máquina con la capacidad de construir a partir de sí misma otras máquinas (auto-reproducción) y soportar comportamiento complejo.
- En 1970, John Horton Conway dio a conocer el autómata celular que probablemente sea el más conocido: el Juego de la vida (*Life*).



Juego de la vida

- Creado por el matemático británico John H. Conway en 1970.
- Es un autómata celular cuyo estado final dependerá únicamente de su estado inicial.
- El universo del juego es un arreglo de celdas de dos dimensiones, cada una de las cuales puede tener dos estados posibles: vida o muerte. Cada celda interactúa con sus ocho vecinos, que son las celdas adyacentes horizontales, verticales o diagonales.
- El siguiente estado del juego estará basado en el estado anterior de los vecinos de la celda.

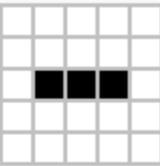
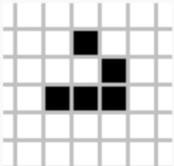
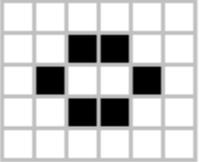
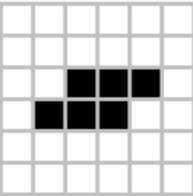
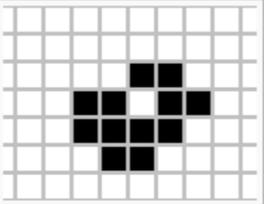
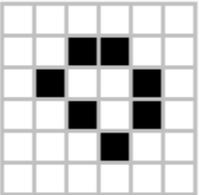
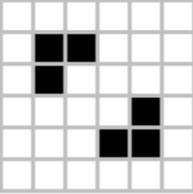
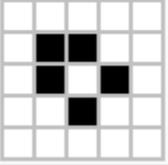
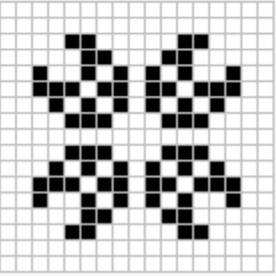


Reglas

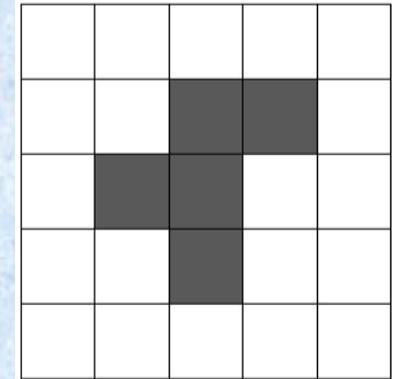
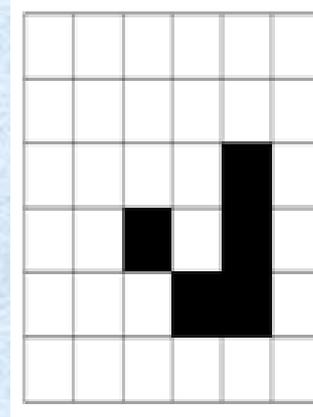
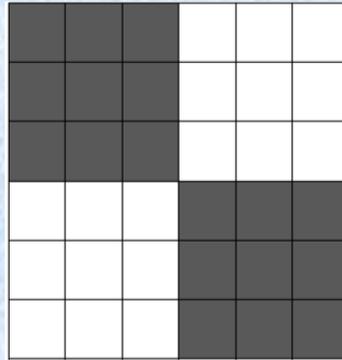
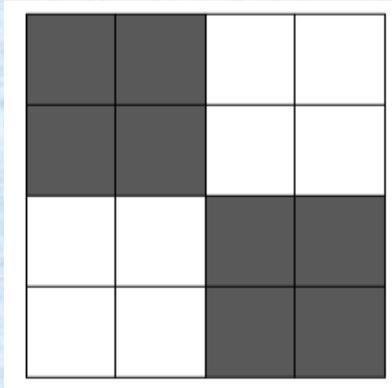
- Cualquier celda con menos de dos vecinos vivos, muere por inanición.
- Cualquier celda con dos o tres vecinos vivos, vive para la siguiente generación.
- Cualquier celda con más de tres vecinos vivos, muere por sobrepoblación.
- Cualquier celda muerta con exactamente tres vecinos vivos, vuelve a vivir, por reproducción.



Algunos patrones iniciales

Still lifes		Oscillators		Spaceships	
Block		Blinker (period 2)		Glider	
Beehive		Toad (period 2)		Lightweight spaceship (LWSS)	
Loaf		Beacon (period 2)			
Boat		Pulsar (period 3)			

Otros patrones



<http://psych.hanover.edu/JavaTest/Play/Life.html>

Evolución

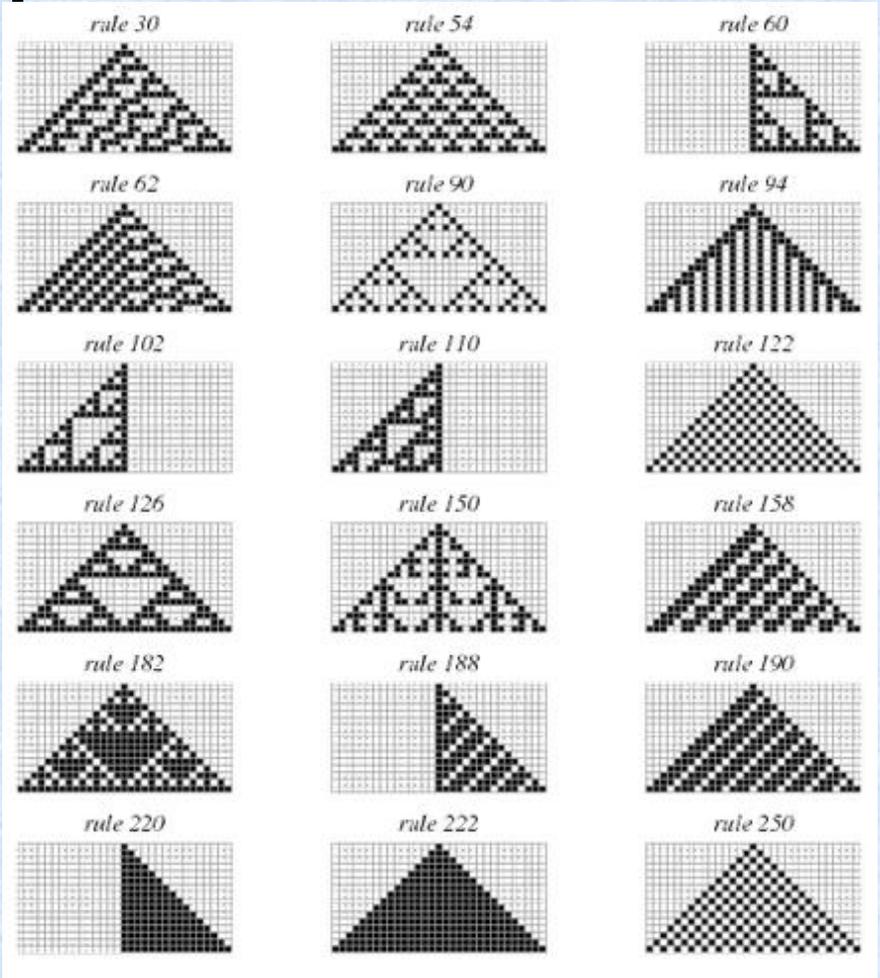
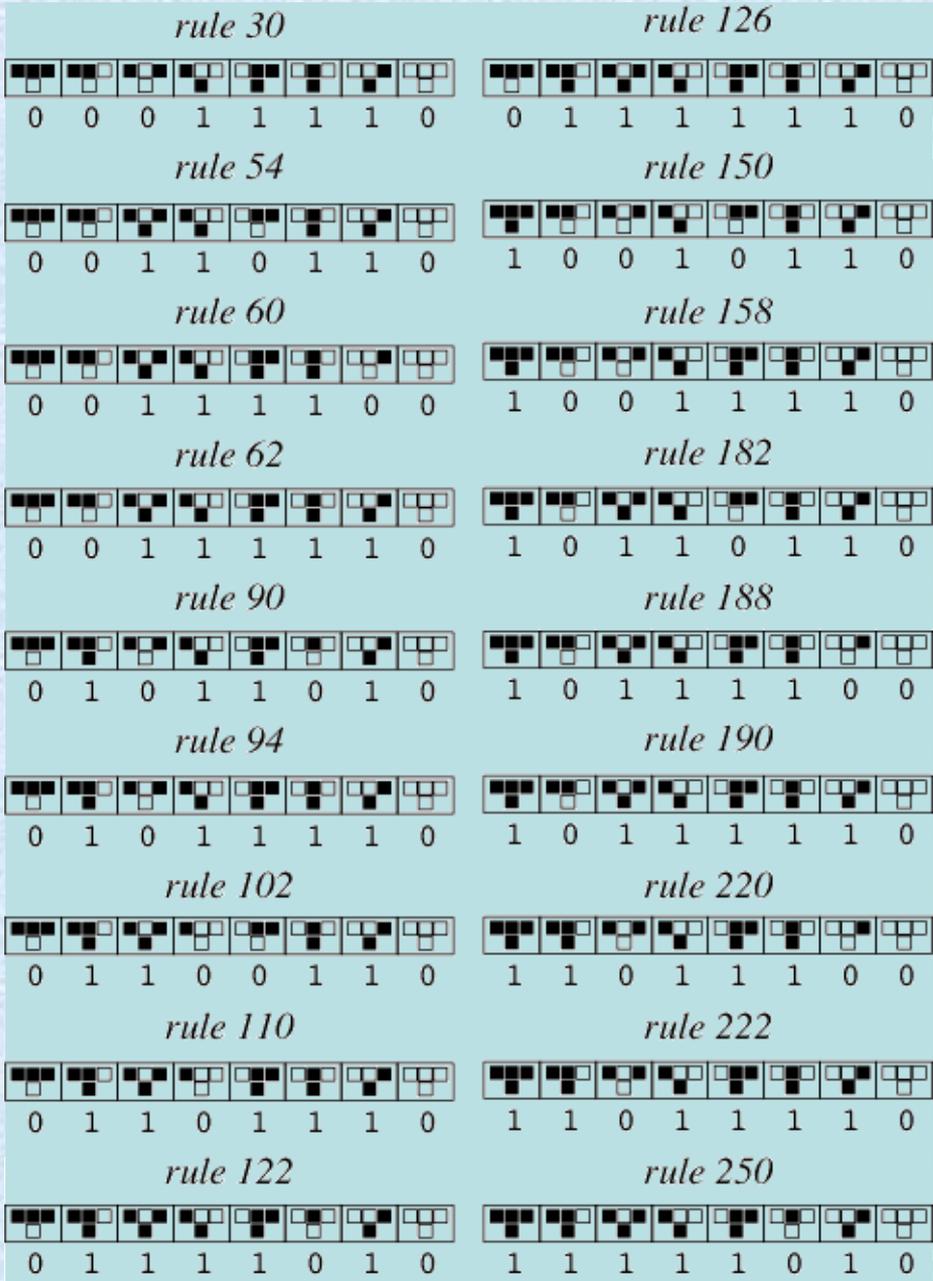
- En épocas recientes, Stephen Wolfram ha realizado numerosas investigaciones sobre el comportamiento cualitativo de los A. C.
- Con base en su trabajo observó sus evoluciones para configuraciones iniciales aleatorias.
- Así, dada una regla, el A. C. exhibe diferentes comportamientos para diferentes condiciones iniciales.



Evolución

- De esta manera, Wolfram clasificó el comportamiento cualitativo de los A. C. unidimensionales. De acuerdo con esto, un A. C. pertenece a una de las siguientes clases:
 - **Clase I.** La evolución lleva a una configuración estable y homogénea, es decir, todas las células terminan por llegar al mismo valor.
 - **Clase II.** La evolución lleva a un conjunto de estructuras simples que son estables o periódicas.
 - **Clase III.** La evolución lleva a un patrón caótico.
 - **Clase IV.** La evolución lleva a estructuras aisladas que muestran un comportamiento complejo (es decir, ni completamente caótico, ni completamente ordenado, sino en la línea entre uno y otro, este suele ser el tipo de comportamiento más interesante que un sistema dinámico puede presentar).





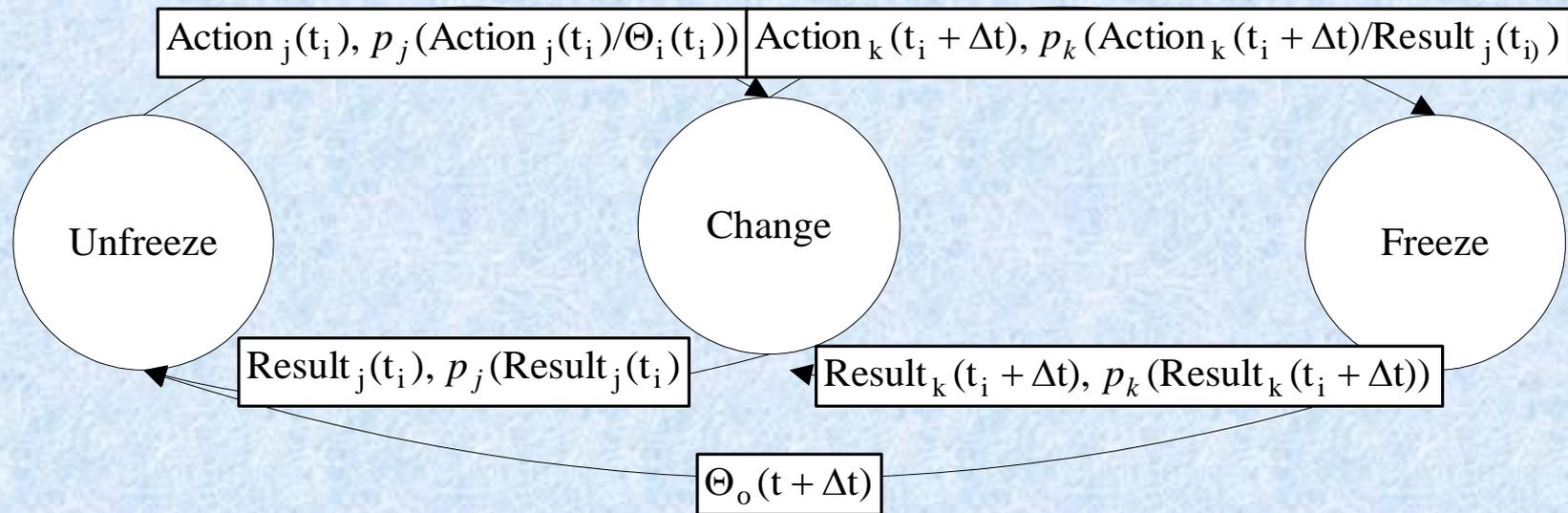
<http://kidojo.com/~yebb/cellauto/>

Contribución

- Debido a su analogía con el nacimiento, caída y alteraciones de una sociedad de organismos vivos, el juego pertenece a lo que se conoce como un juego de simulación.
- Debido a las diferentes maneras en que los patrones iniciales del juego puede evolucionar, el juego provee ejemplos de sistemas auto organizados y emergentes, los que son de interes para físicos, biólogos, científicos computacionales, matemáticos, filósofos, etc., a quienes les interesa conocer la manera en que patrones complejos pueden nacer de estados iniciales relativamente simples.



Metodologías interpretativas



La Dinámica de Sistemas

- Cae dentro de la última categoría
- Un enfoque para representar de una manera más dinámica los aspectos fluctuantes de la toma de decisiones
- Hace posible explicar las relaciones entre el contexto de la decisión, los comportamientos asociados y los posibles resultados y su efecto en el sistema.



¿Qué es?

- La investigación de las características de la información de retroalimentación de sistemas organizacionales y el uso de modelos como guía para el rediseño de organizaciones.
- Es la rama de la Teoría de Control relacionada con los sistemas socio-económicos y la controlabilidad de los mismos.
- Combina áreas de Teoría de Control, Toma de Decisiones, Simulación y Tecnología de la Información
- Se considera a Forrester como su principal exponente



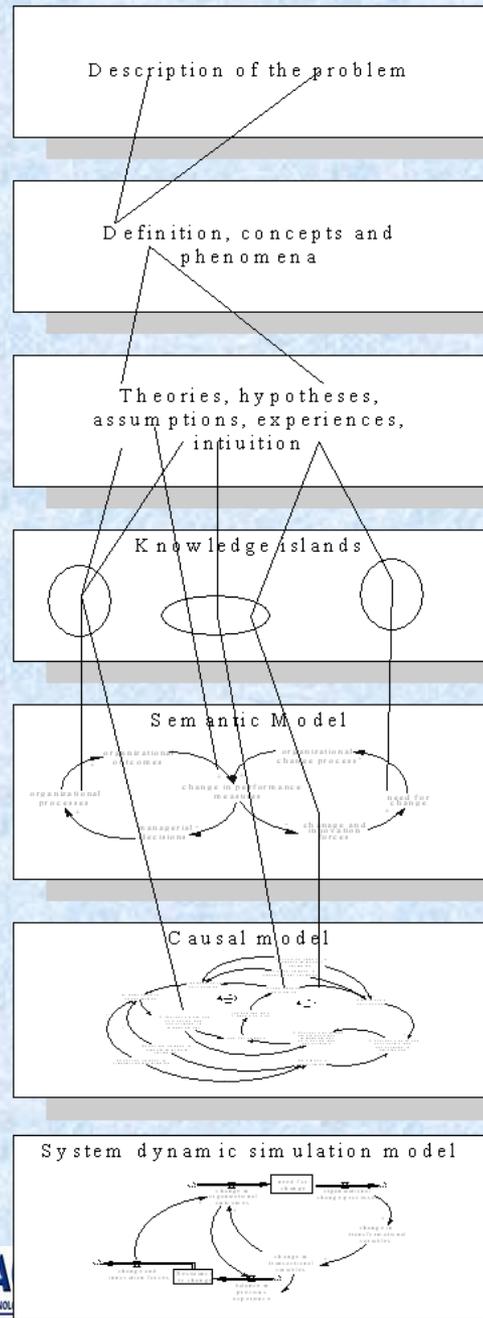
Utilidad

- Ayuda a entender la interacción de las variables críticas que dominan un sistema social en función del tiempo, la interacción total del sistema y su ambiente.
- Apoya en explicar las complejidades que aparecen en la ejecución de los procesos de cambio y toma de decisiones.
- Es posible mostrar como los sistema complejos funcionan utilizando diagramas que delinean el flujo de información, actividades y decisiones, y sus influencias en los diferentes componentes del sistema.



El proceso de modelado

La Metodología COMPRAM



En detalle

- Definición y articulación del Problema:
 - Definir el problema y justificar su solución
 - Definir los conceptos y variables claves
 - Definir el horizonte de tiempo
 - Definir, analizar y conocer las relaciones dinámicas del modelo
- Formulación de la Hipótesis Dinámica
 - Generación de una hipótesis general
 - Formular una hipótesis dinámica que explique las dinámicas del sistema en función de las estructuras de retroalimentación, variables y agentes representados por el modelo.
 - Desarrollar mapas de la estructura causal basados en las hipótesis iniciales, variables claves, etc.



- **Formulación del Modelo de Simulación**
 - Especificar las estructuras y reglas de decisión.
 - Estimar los parámetros, relaciones y condiciones iniciales.
 - Probar la consistencia de las relaciones.
- **Validación y prueba**
 - Comparación con los modelos de referencia y el sistema real.
 - Robustez bajo condiciones extremas
 - Análisis de sensibilidad
- **Diseño de políticas y evaluación**
 - Diseño de políticas.
 - Análisis de sensibilidad de políticas
 - Interacción de políticas



Principios para su aplicación exitosa

- Desarrollar un modelo para resolver un problema, no para modelar la totalidad del problema.
- El modelado debe integrarse al proyecto desde un inicio.
- Definir claramente la aplicabilidad de la Dinámica de Sistemas.
- Integrar la Dinámica de Sistemas con otros métodos.
- Enfocarse en la implementación de la solución desde un inicio.
- Utilizar la consulta de manera iterativa.



Principios para su aplicación exitosa

- Evitar el enfoque de la caja negra.
- Enfocarse en la validación desde un principio.
- Desarrollar un modelo preliminar lo antes posible.
- Es preferible un modelo amplio pero factible que en detalle pero que no trabaje.
- Utilizar expertos no novatos.
- El proceso no termina con la implementación



Modelos y teorías

- Conjunto organizado de reglas, conocimientos y principios de una ciencia, doctrina o actividad.
- Ese conjunto organizado de ideas explican un fenómeno basadas en observación, experiencia o razonamiento lógico.
- Viene del griego “theoria”: contemplación abstracta.



Un modelo articula una teoría

- Revisa su coherencia lógica
- Deriva hipótesis para comprobarla
- Evalúa intervenciones
- Deriva recomendaciones



Ventajas del modelado

- Permite la organización del conocimiento sobre el sistema
- Permite deducciones lógicas sobre el sistema y su comportamiento
- Proporciona un marco para contrastar el sistema y posible modificaciones
- Proporciona una idea sobre detalles y aspectos relevantes
- Posibilita mayor y mejor manipulación
- Facilita el análisis
- Descripción concisa del problema
- Permite un mejor control de las fuentes de variación
- Menos costos de experimentar



Desventajas del modelado

- El desarrollo de un modelo, gasta y quita tiempo y es costoso
- El modelo no representa con exactitud la situación real
- Relaciones no adecuadas generan errores por resultado imprecisos



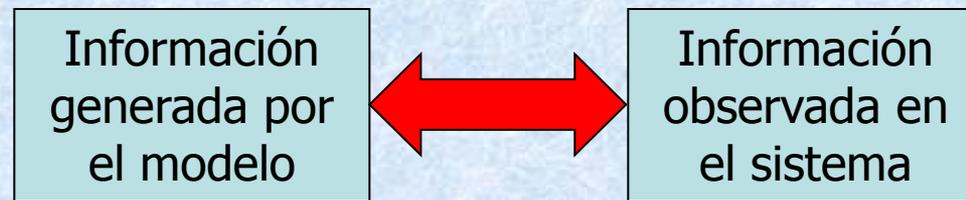
Utilidad y validez

- Se busca entender un problema o una oportunidad y determinar una política de decisión o estrategia.
- No se busca la verdad universal
- Se define un propósito y un comportamiento de referencia.
- Es modelo debe tener:
 - Coherencia estructural
 - Coherencia dimensional
 - Coherencia de comportamiento



Validez del modelo

- El modelo busca ser una representación válida de la realidad combinando realismo y simplicidad
- Se desea determinar:



- A través
 - Reexaminar la formulación del modelo
 - Verificar las expresiones y dimensionalidad
 - Variar parámetros de entrada
 - Utilización de datos históricos

Limitaciones para modelar sistemas sociales complejos

- Sus relaciones no son físicas
- No es posible definirlas de antemano
- No son norma
- El efecto de retroalimentación es dinámico



Modelo vs. el proceso de modelado

- De acuerdo a Forrester:
 - “ Un modelo es sólo una fotografía de un determinado momento: refleja un instante de un conjunto evolucionado de ideas acerca de un sistema social.”
 - “En lugar de poner énfasis en el modelo, deberíamos considerar el proceso de modelar como compañero permanente y como herramienta para mejorar el juicio y la toma de decisiones.”

