

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



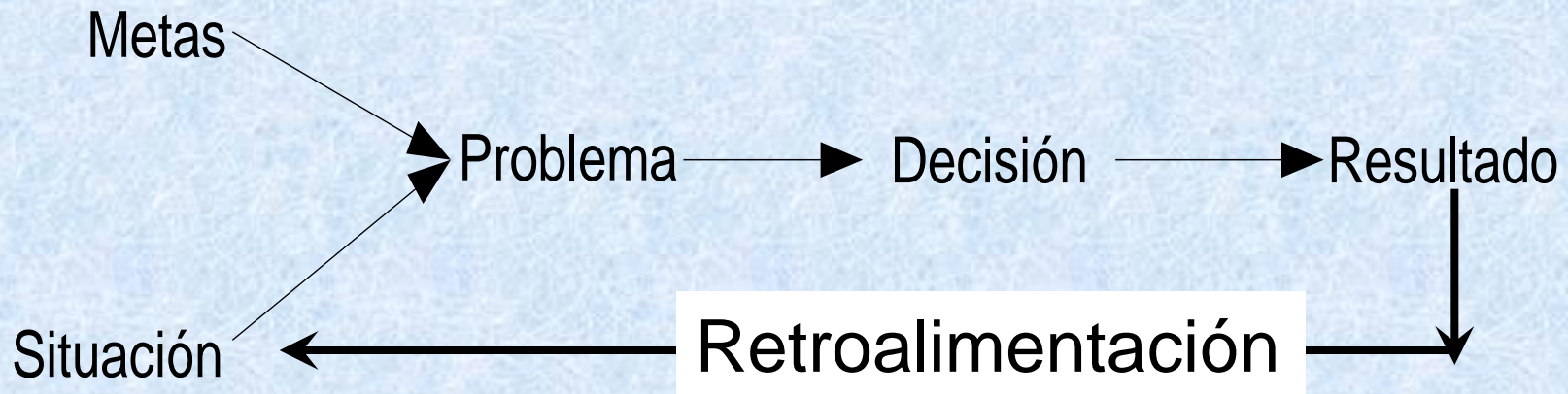
Complejidad dinámica

- 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



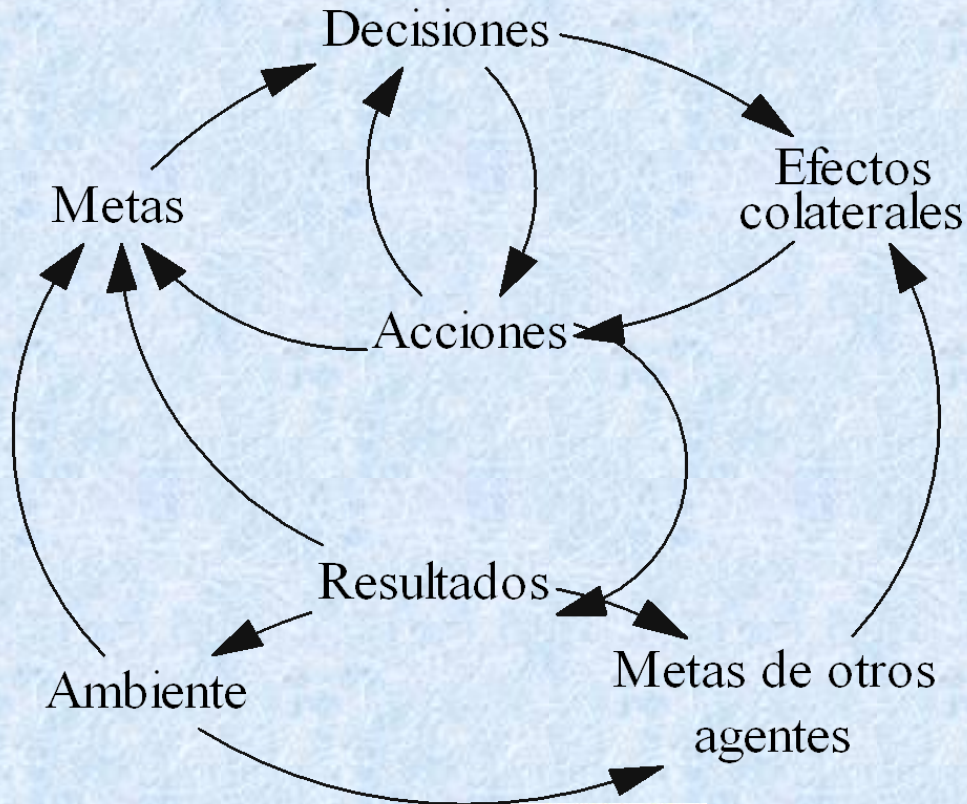
Como actuamos

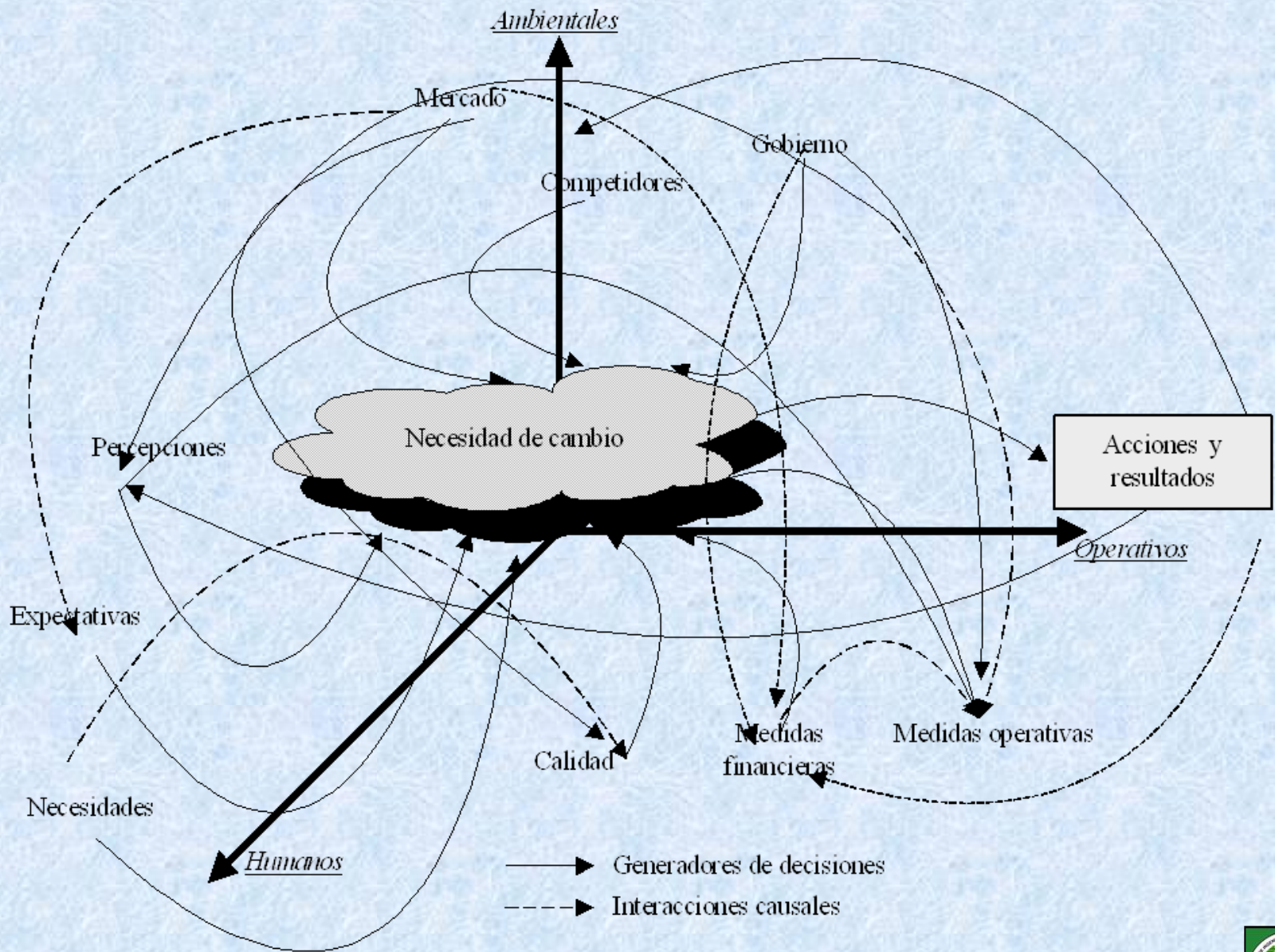
- Generalmente enfocamos los procesos de decisión como una serie de acciones secuenciales



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

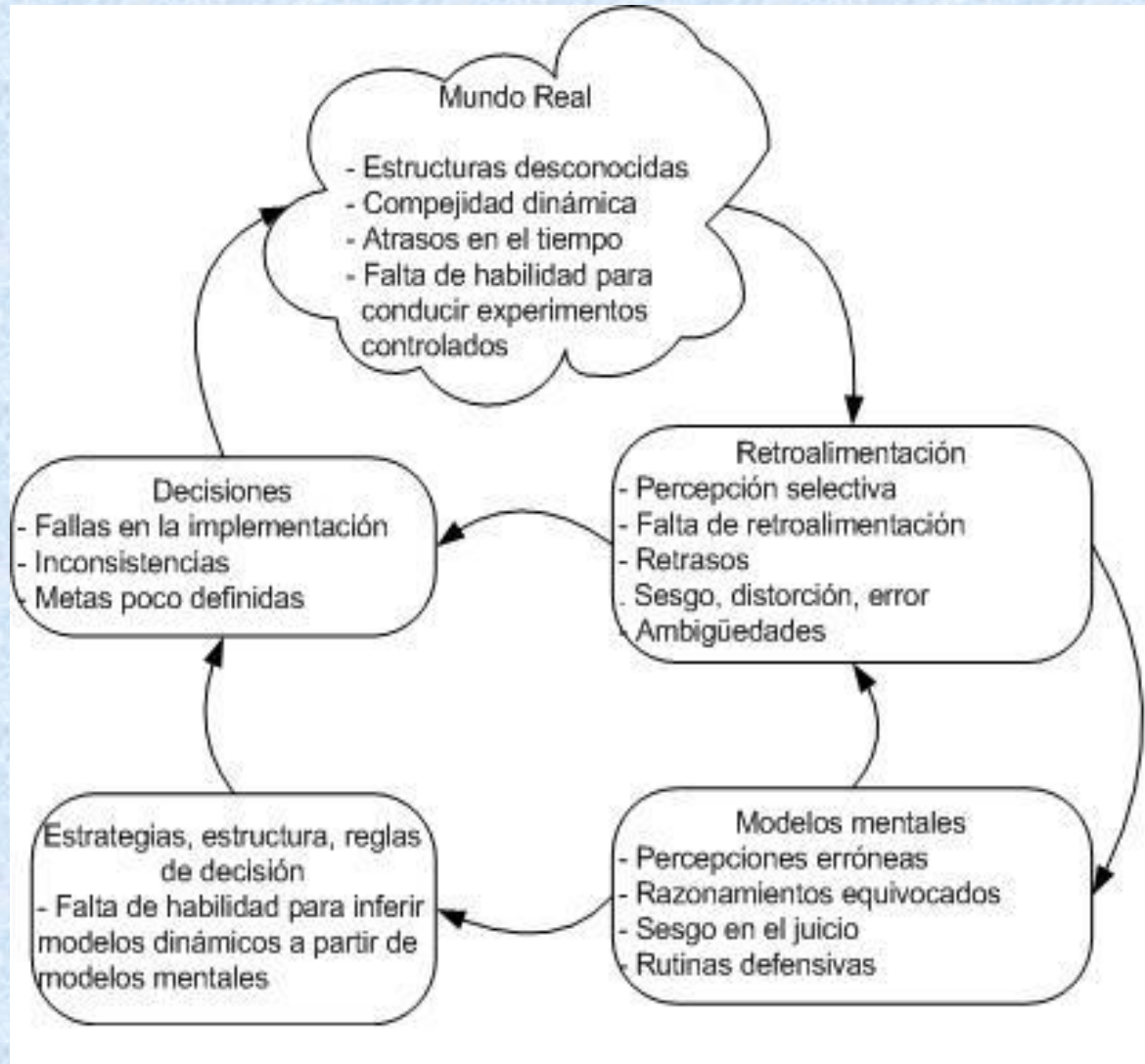


En resumen

- 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.

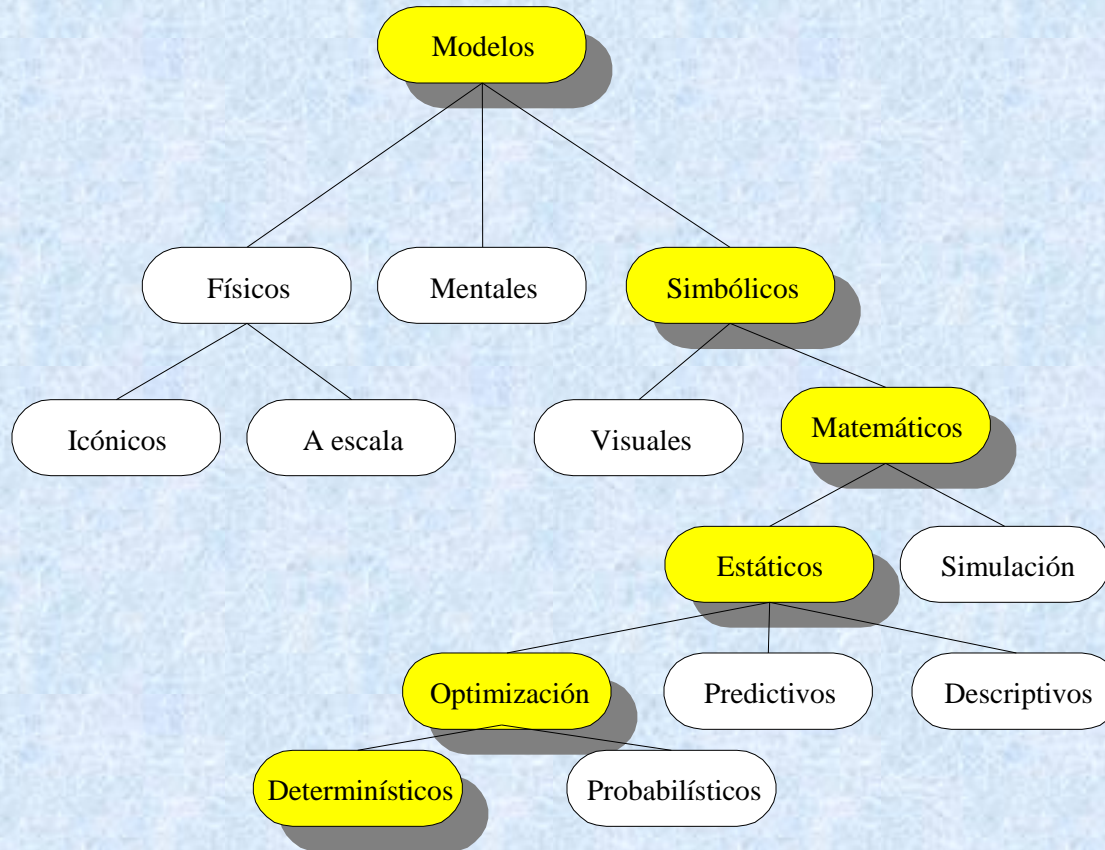


¿Por qué modelos?

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



Taxonomía

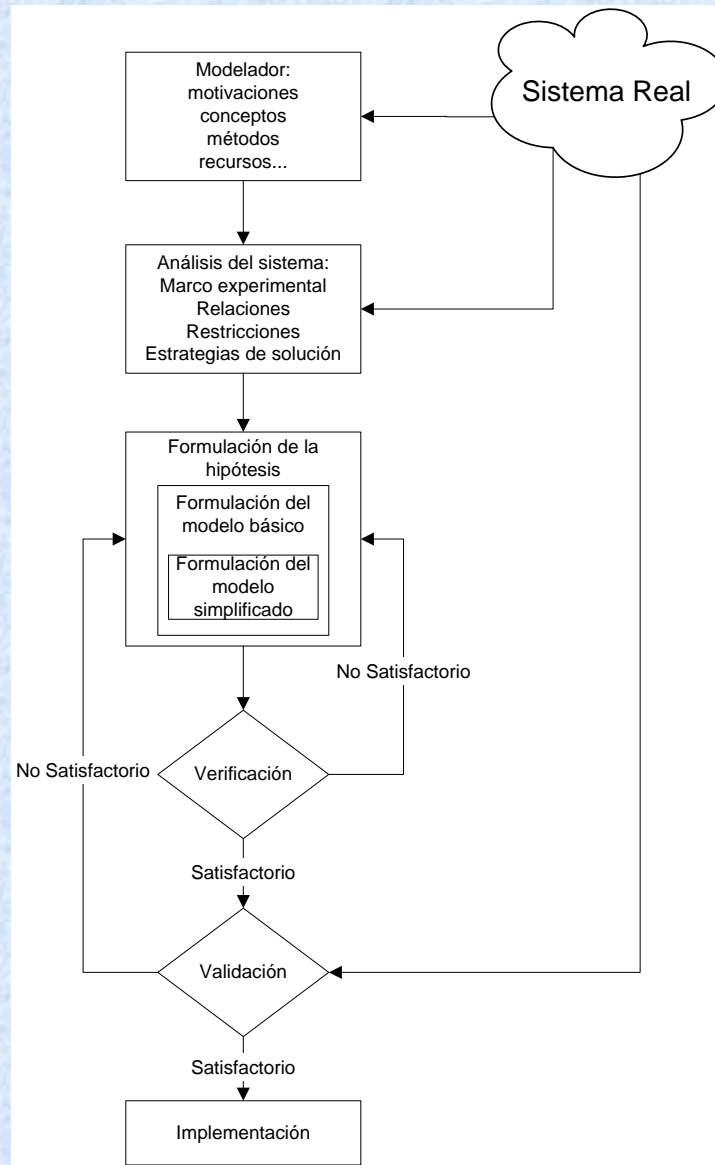


El Modelado

- 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

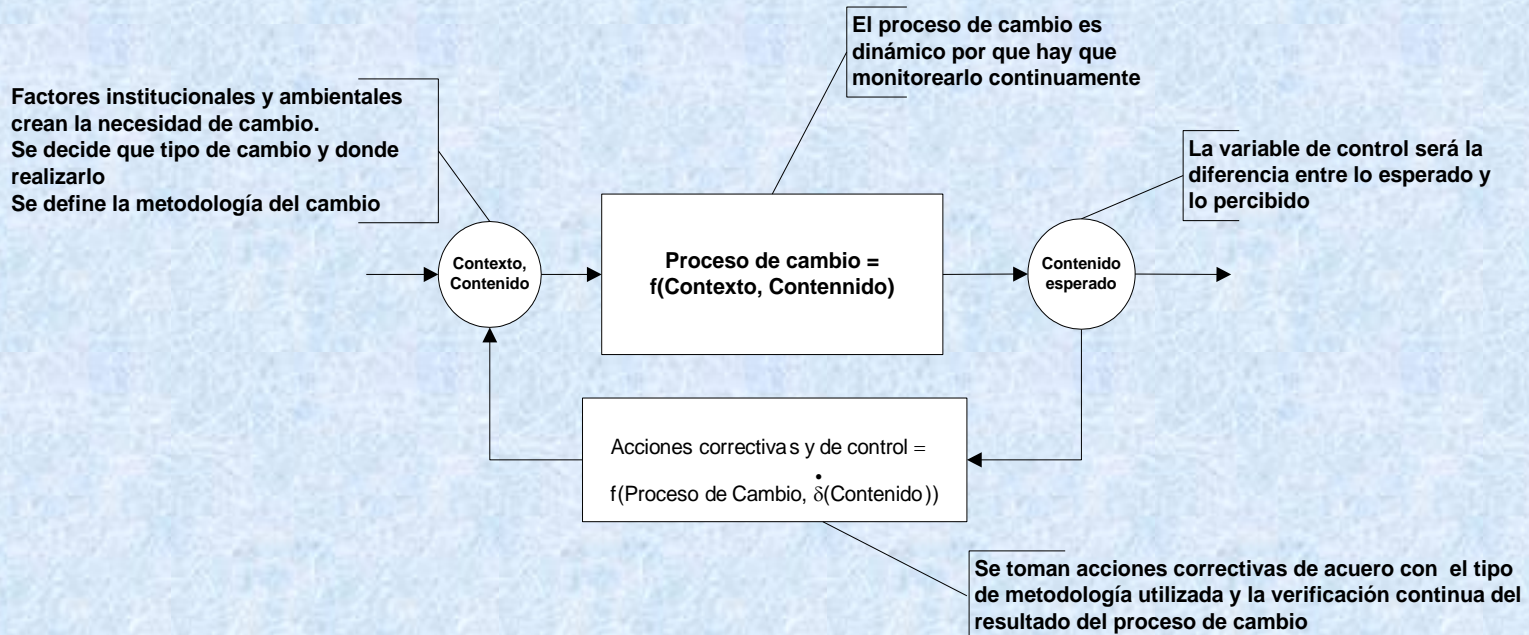


Enfoques para modelar

- 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

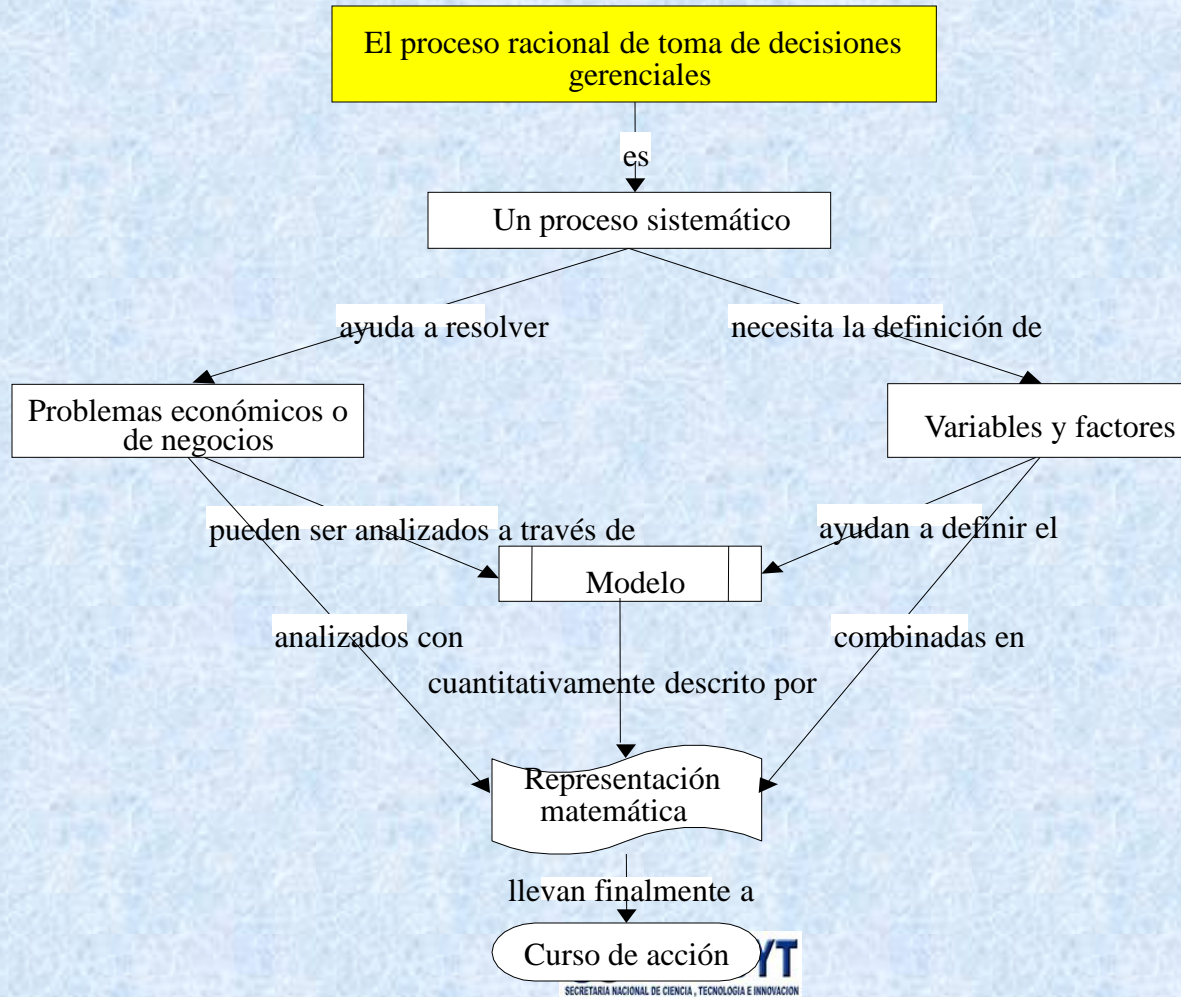


$$\Theta_o(t) = \frac{\text{Proceso de cambio}}{f(\text{Proceso de Cambio, Control y acciones correctivas})} \Theta_i(t_o)$$

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



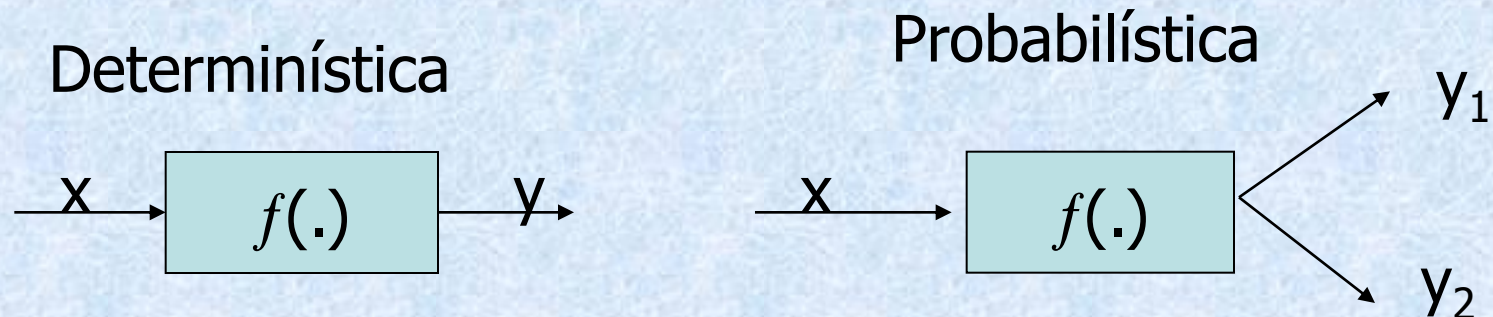
Categorías de los Modelos

Características

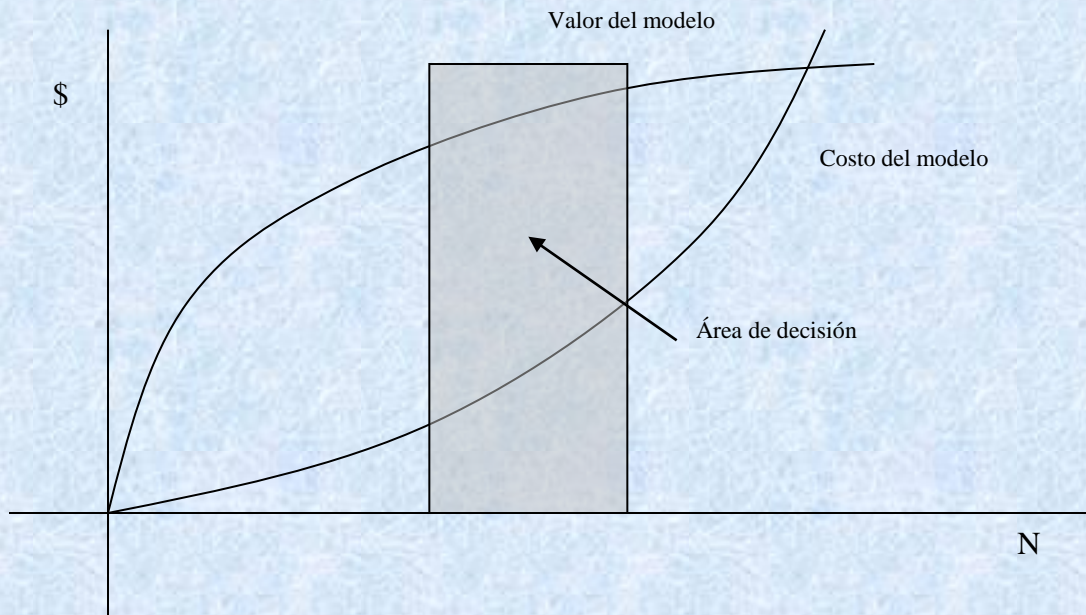
| Categoría | Forma de $f(.)$ | Variable independiente | Técnica cuantitativa |
|-----------------------------|---------------------------|---|--|
| Prescriptivo u optimización | Conocida, bien definida | Conocida o bajo el control de tomador de decisiones | Programación lineal, entera o no lineal; Redes; 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:

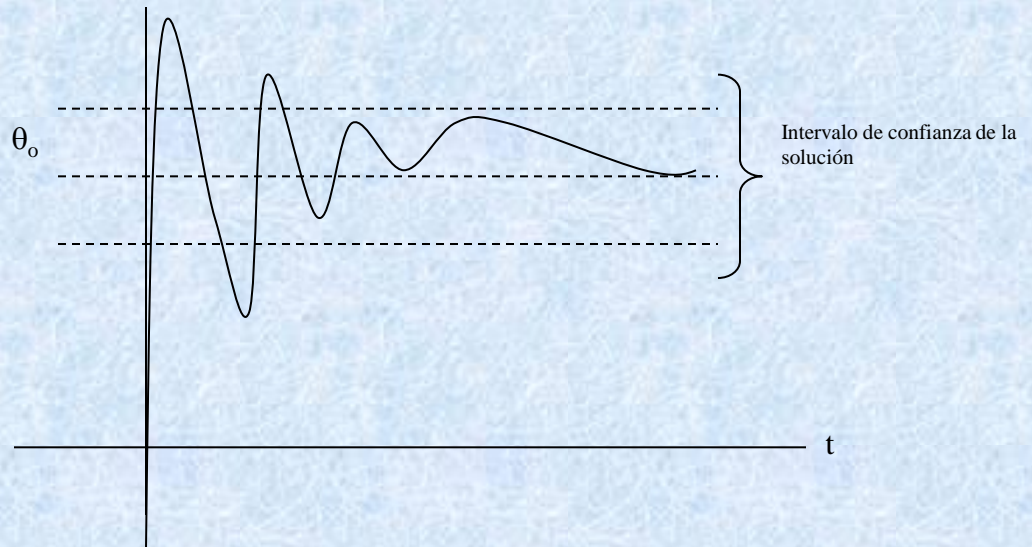


Costo vs. valor



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.

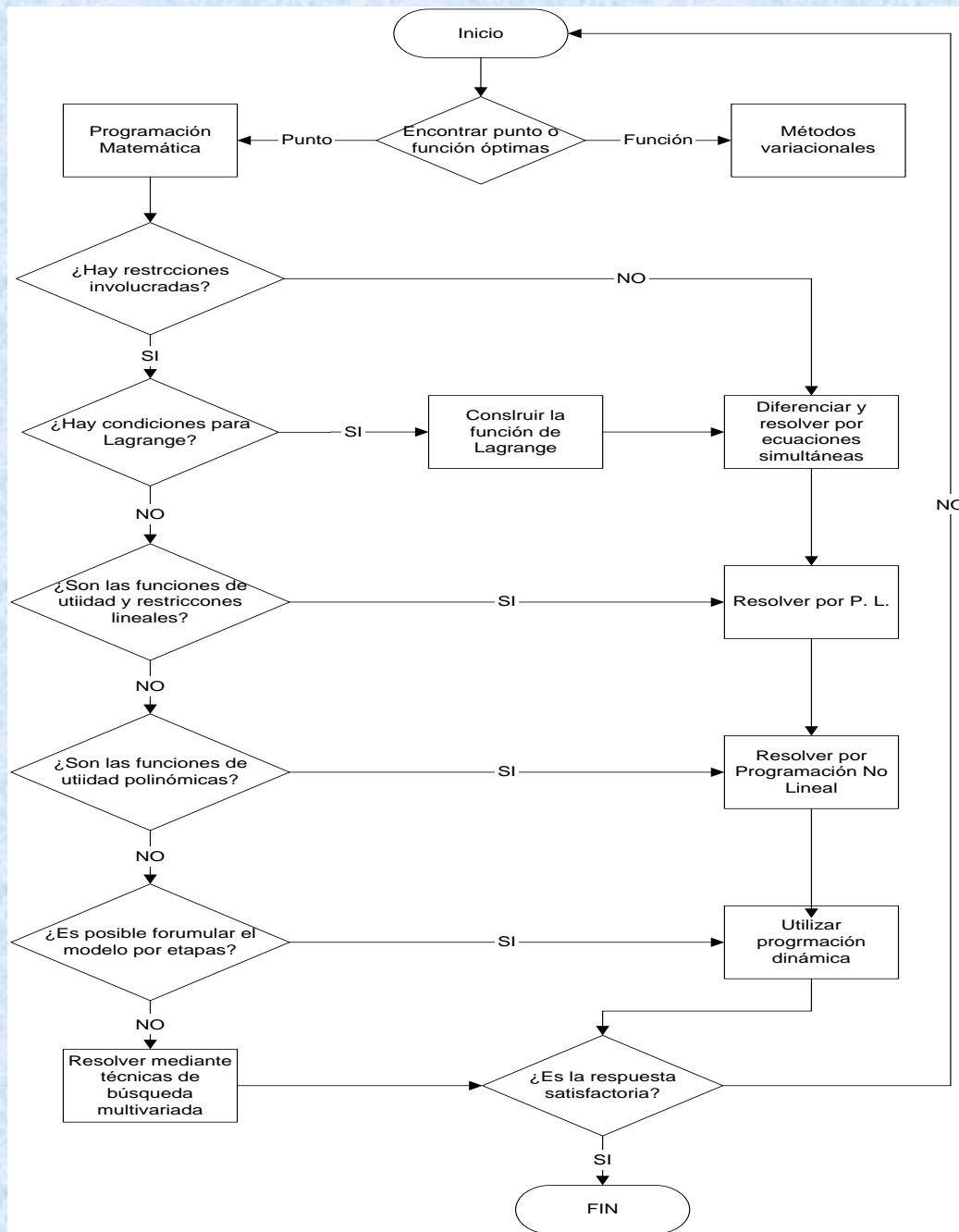


Tópicos en optimización: Métodos variacionales

- 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

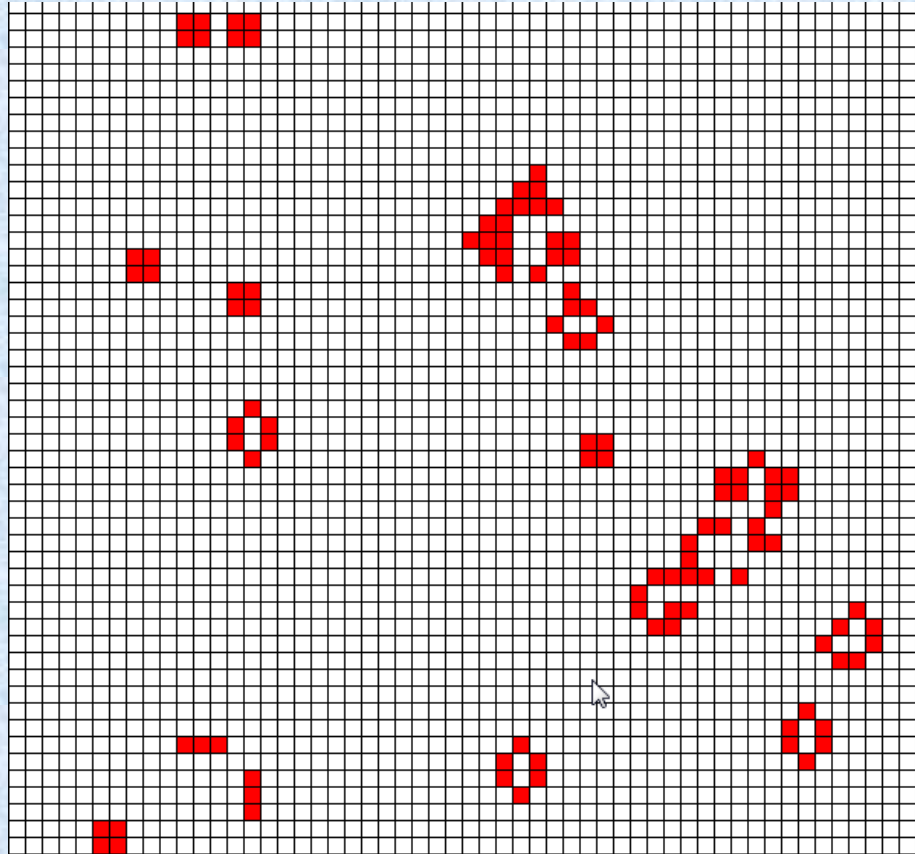


Solución del modelo de optimización

- 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 autómeta celular que probablemente sea el más conocido: el Juego de la vida (*Life*).



Juego de la vida



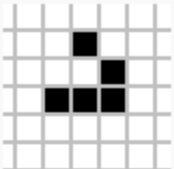
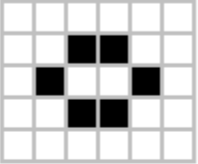
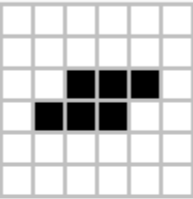
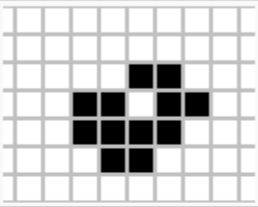
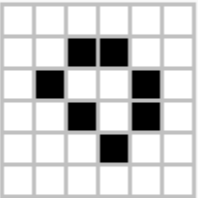
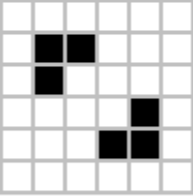
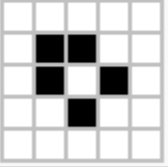
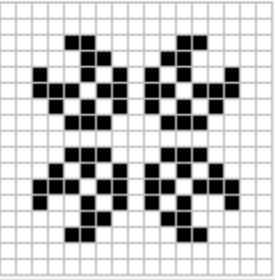
- Creado por el matemático británico John H. Conway en 1970.
- Es un autómata celular cuyo estado final dependerá únicamente de su estado inicial.
- El universo del juego es un arreglo de celdas de dos dimensiones, cada una de las cuales puede tener dos estados posibles: vida o muerte. Cada celda interactúa 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.



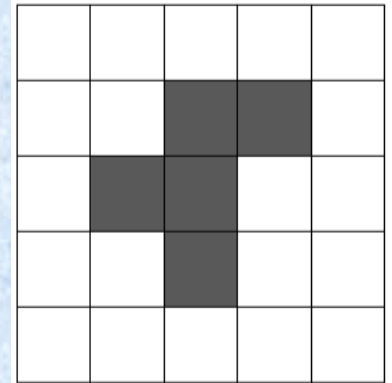
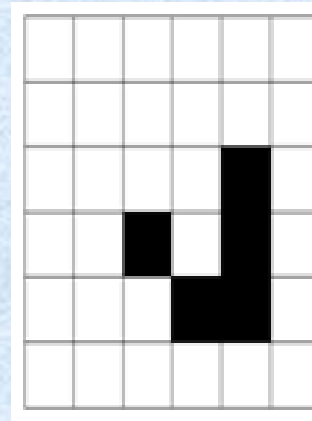
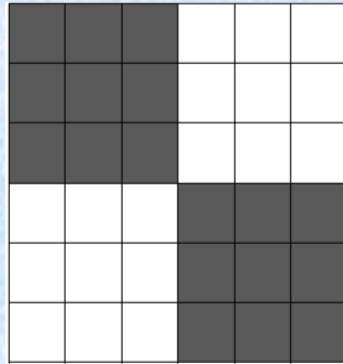
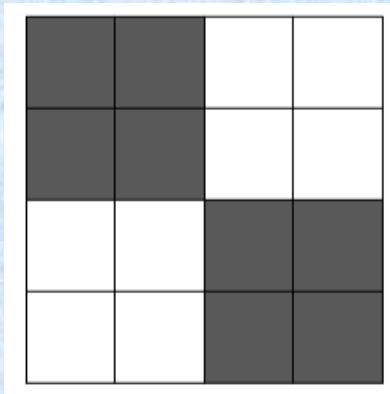
Reglas

- 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

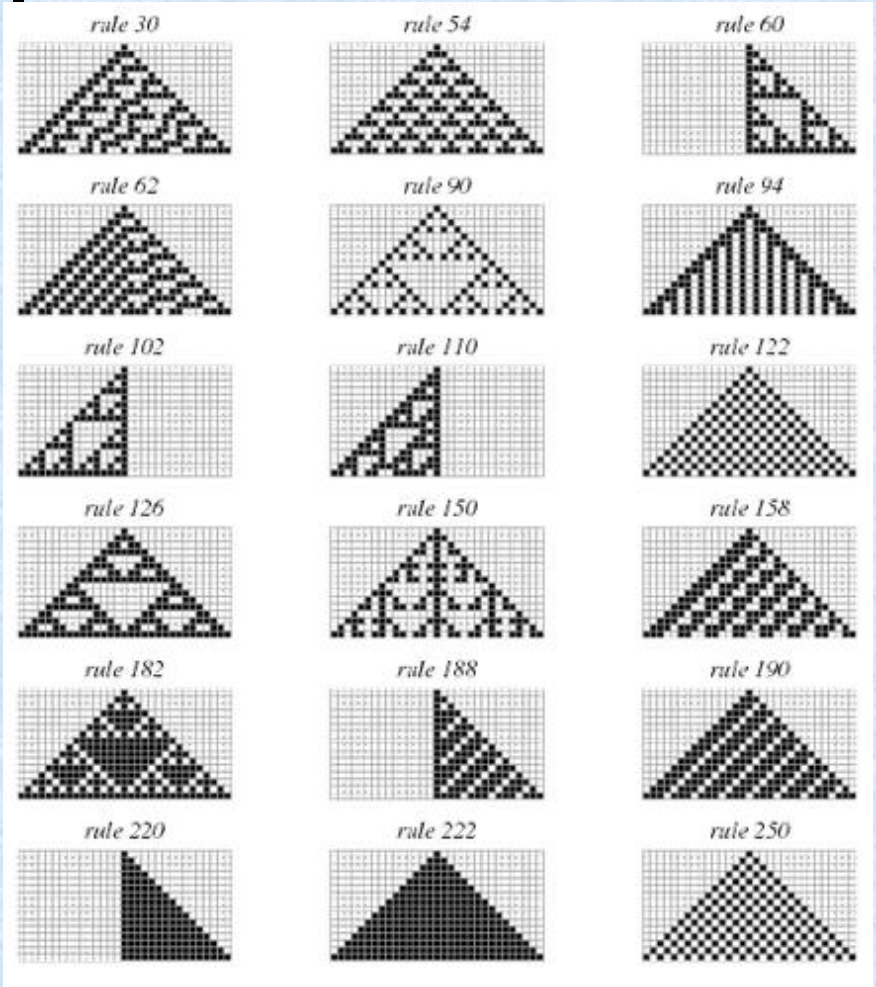
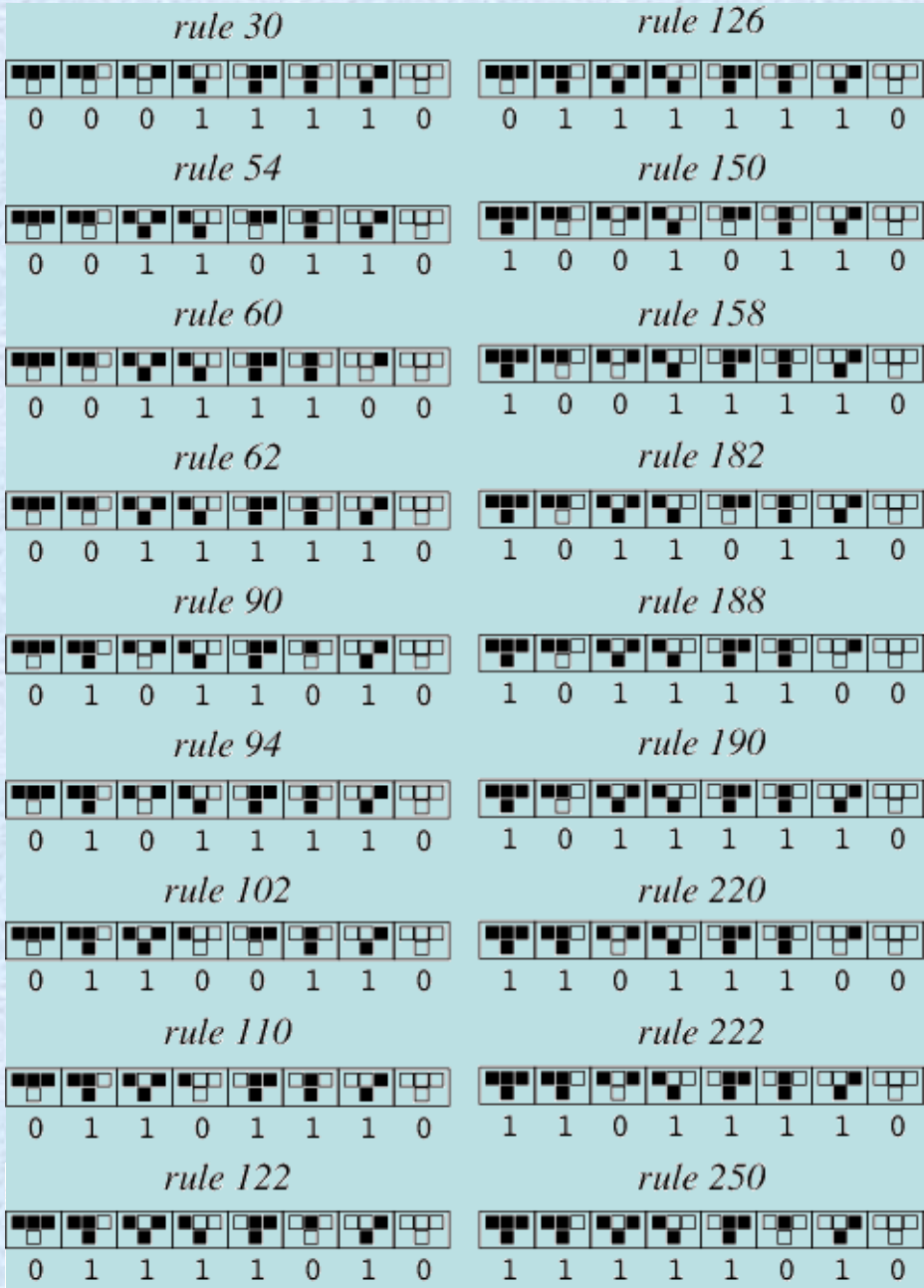
- En épocas recientes, Stephen Wolfram ha realizado numerosas investigaciones sobre el comportamiento cualitativo de los A. C.
- Con base en su trabajo observó sus evoluciones para configuraciones iniciales aleatorias.
- Así, dada una regla, el A. C. exhibe diferentes comportamientos para diferentes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





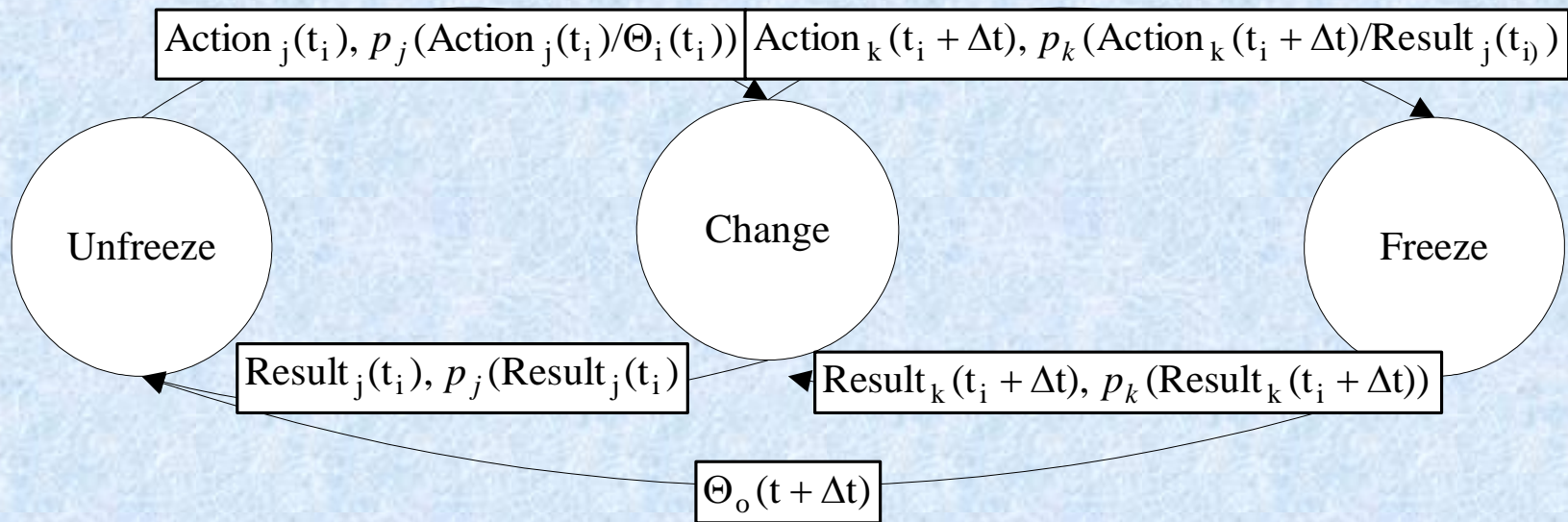
<http://kidojo.com/~yebb/cellauto/>

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



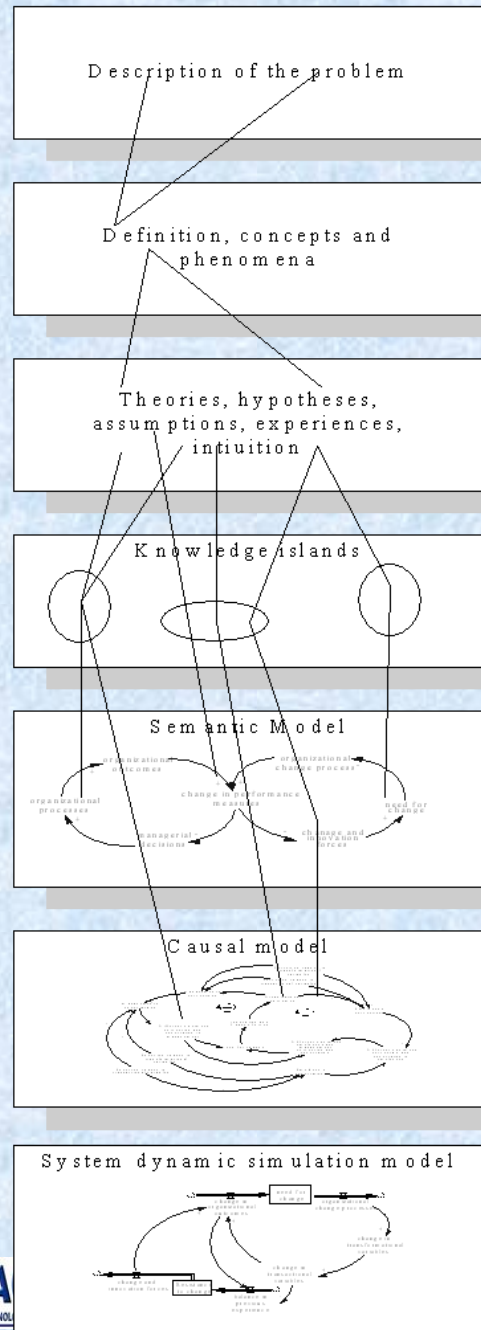
Utilidad

- 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



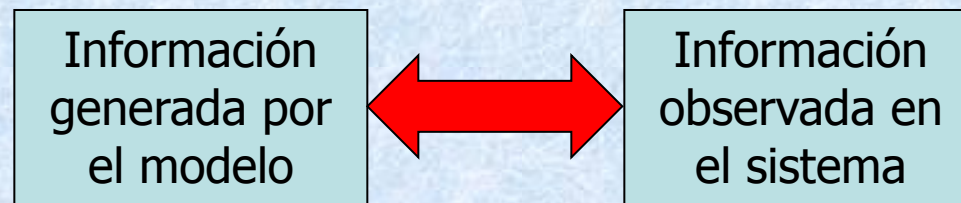
Utilidad y validez

- 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.”

