

Logica, Reglas de Producción y Representaciones Relacionales

Eduardo Morales, Enrique Sucar

INAOE

Contenido

- 1 Lógica
- 2 Reglas de Producción
- 3 Modelos Cualitativos
- 4 Representa. Relacionales
Temporales
Causales
Espaciales
Funcionales

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

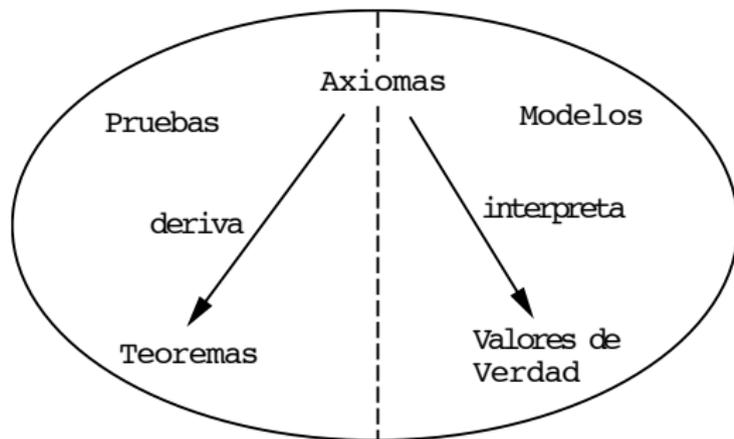
Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Lógica



Las dos caras de la Lógica

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Lógica

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Características:

- Sintáxis y semántica bien definidas
- Reglas de inferencia

En lógica queremos que las cosas que son verdaderas coincidan con las que podemos probar o que lo que nos implica la teoría es lo que podemos computar

Lógica Proposicional

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Permite expresar y razonar con declaraciones que son o verdaderas o falsas
- Ejemplo: *La maestría es lo mejor que me ha pasado en la vida o lógica es fácil*
- Este tipo de declaraciones se llaman *proposiciones* y se denotan con letras mayúsculas (e.g., P,Q,...)
- También se llaman *proposiciones atómicas* o *átomos*

Lógica Proposicional

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Los átomos se pueden combinar con *conectores lógicos*: negación (\sim, \neg), conjunción ($\&, \wedge$), disjunción (\vee), implicación (\rightarrow, \supset), doble implicación (\leftrightarrow)
- Ejemplo:
 G = “esto ya lo vi”
 P = “me estoy aburriendo”
 $G \wedge D$ = “esto ya lo vi” y “me estoy aburriendo”
- Sólo algunas combinaciones de átomos y conectores son permitidas: *fórmulas bien formadas* (wff)

Fórmulas bien formadas

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

En lógica proposicional:

- 1 Un átomo en una *wff*
- 2 Si P es *wff* entonces $\neg P$ también lo es
- 3 Si P y Q son *wffs* entonces: $P \wedge Q$, $P \vee Q$, $P \rightarrow Q$ y $P \leftrightarrow Q$ son *wff*
- 4 Ninguna otra fórmula es *wff*

Lógica

Lógica

Reglas de Producción

Modelos Cualitativos

Representa. Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- *wff* es sólo sintáxis, no dice si la fórmula es verdadera o falsa (semántica)
- El significado de una fórmula proposicional se puede expresar por medio de una función

$$w : prop \rightarrow \{true, false\}$$

- $w(\neg P) = true$ si $w(P) = false$
- $w(\neg P) = false$ si $w(P) = true$
- ...

Lógica

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

P	Q	$\neg P$	$P \wedge Q$	$P \vee Q$	$P \rightarrow Q$	$P \leftrightarrow Q$
T	T	F	T	T	T	T
T	F	F	F	T	F	F
F	T	T	F	T	T	F
F	F	T	F	F	T	T

Lógica

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Si w es una interpretación que asigna a una fórmula P el valor de verdad (*true*), entonces se dice que w es un *modelo* de P
- Una fórmula se dice *válida* si es verdadera bajo cualquier interpretación (tautología), e.g., $P \vee \neg P$ o $((P \rightarrow Q) \wedge P) \rightarrow Q$
- Una fórmula es *inválida* si no es válida
- Una fórmula es *insatisfascible* o *inconsistente* si es falsa bajo cualquier interpretación (contradicción), si no, es *satisfascible* o *consistente*
- E.g., *insatisfascibles*: $P \wedge \neg P$ o $(P \rightarrow Q) \wedge (P \wedge \neg Q)$

Lógica

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

válido	inválido	
siempre cierto	a veces T o F	siempre falso
satisfacible		insatisfacible

Lógica

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Dos fórmulas P y Q son equivalentes ($P \equiv Q$) si los valores de verdad de P y Q son iguales bajo cualquier interpretación
- Existen muchas leyes de equivalencia, por ejemplo:
$$P \rightarrow Q \equiv \neg P \vee Q$$

Lógica

Lógica

Reglas de Producción

Modelos Cualitativos

Representa. Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Una fórmula G se dice que es una *consecuencia lógica* de un conjunto de fórmulas $F = \{F_1, \dots, F_n\}$, $N \geq 1$, denotado por $F \models G$ si para cada interpretación w para la cual $w(F_1 \wedge F_2 \wedge \dots \wedge F_n) = true$, entonces $w(G) = true$
- Satisfactibilidad, validez, equivalencia y consecuencia lógica son nociones semánticas
- *Para derivar consecuencias lógicas también se pueden hacer por medio de operaciones exclusivamente sintácticas*

Lógica de Predicados o de Primer Orden

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Un *alfabeto* consiste de variables, símbolos de predicados y de funciones (la primera letra en minúscula).
- *Términos* = (i) Funciones (símbolo funcional + argumentos); funciones con aridad = 0 \Rightarrow constantes y (ii) Variables (x, y, z)
- *Un predicado* (símbolo + argumentos) es una fórmula atómica o simplemente un átomo. Si su aridad = 0 \Rightarrow proposiciones.

Lógica de Predicados o de Primer Orden

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Conectores lógicos: $\neg, \wedge, \vee, \rightarrow, \leftrightarrow$
- Cuantificadores: universal (para toda x) $\forall x$ y existencial (existe una x) $\exists x$
- Símbolos auxiliares: “(”, “)”, “,”

Fórmulas bien formadas

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

En lógica proposicional:

- 1 Un átomo en una *wff*
- 2 Si P es *wff* entonces $\neg P$ también lo es
- 3 Si P y Q son *wffs* entonces: $P \wedge Q$, $P \vee Q$, $P \rightarrow Q$ y $P \leftrightarrow Q$ son *wff*
- 4 Si P es *wff* y x es una variable libre en P , entonces $\forall xP$ y $\exists xP$ son *wff* (y la variable x se dice acotada o *bounded*)
- 5 Ninguna otra fórmula es *wff*

Semántica

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- En lógica de primer orden se asocia una estructura representando la “realidad” (básicamente el dominio)
- La estructura S tiene:
 - Un conjunto no vacío de elementos D llamado el dominio de S
 - Un conjunto de funciones de aridad n definidas en D^n , $\{f_i^n : D^n \rightarrow D\}$
 - Un conjunto no vacío de mapeos de predicados de D^m a $\{\text{true}, \text{false}\}$.

Semántica

Lógica

Reglas de Producción

Modelos Cualitativos

Representa. Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- No se puede saber el valor de verdad de una fórmula hasta que no se especifica con qué elementos de la estructura se deben de asociar los elementos de la fórmula
- Una *asignación* v al conjunto de fórmulas F dada una estructura S con dominio D es un mapeo del conjunto de variables en F a D
- $\exists xF$ es *true* si existe una asignación para cual F es verdadera
- $\forall xF$ es *true* si para toda asignación F es verdadera

Ejemplo

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
RelacionalesTemporales
CausalesEspaciales
Funcionales

$$P = C(x) \rightarrow A(x)$$

$$D = \{\text{tubería, caldera, pipa, \dots}\}$$

C = componente hidráulico

A = transporta agua

$$C(\text{tubería}) = T, C(\text{caldera}) = T, C(\text{pipa}) = T,$$

$$A(\text{tubería}) = T, A(\text{caldera}) = T, A(\text{pipa}) = T$$

Para las asignaciones $x = \text{tubería}$ y $x = \text{pipa}$, $P = T$, para $x = \text{caldera}$, $P = F$

Cláusulas

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Utilizada en prueba de teoremas y programación lógica
- Una literal: un átomo o su negación
- Cláusula: fórmula cerrada de la forma:

$$\forall X_1 \dots \forall X_s (L_1 \vee \dots \vee L_m)$$
 $L_i = \text{literal y } X_i = \text{todas las variables de las literales}$
- Equivalencias: $\forall x_1 \dots \forall x_s (A_1 \vee \dots \vee A_n \vee \neg B_1 \dots \vee \neg B_m) \equiv \forall x_1 \dots \forall x_s (B_1 \wedge \dots \wedge B_m \rightarrow A_1 \vee \dots \vee A_n)$
- Se escribe normalmente como:

$$A_1, \dots, A_n \leftarrow B_1, \dots, B_m$$

Cláusulas de Horn

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Una cláusula de Horn: a lo más una literal positiva.

$$\begin{array}{l} A \leftarrow \\ \leftarrow B_1, \dots, B_n \\ A \leftarrow B_1, \dots, B_n \end{array}$$

Una cláusula definitiva (*definite clause*) es una cláusula con una literal positiva ($A \leftarrow$ ó $A \leftarrow B_1, \dots, B_n$).

Reglas de Inferencia

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Sólo hacen manipulación sintáctica (son formas procedurales).
- Lo interesante es ver cómo se relacionan las reglas semánticas con las sintácticas.
- Una regla de inferencia es *robusta/válida (sound)* si $S \vdash F$ entonces $S \models F$.
Preserva la noción de verdad bajo las operaciones de derivación
- Una regla de inferencia es *completa (complete)* si $S \models F$ entonces $S \vdash F$

Resolución

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

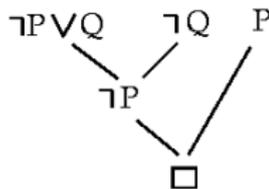
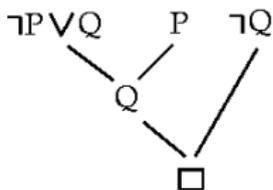
Funcionales

- Sólo sirve para fórmulas en forma de cláusulas
- Idea: prueba por refutación: Para probar: $P \vdash Q$, hacer $W = P \cup \{\neg Q\}$ y probar que W es insatisfactible (\square)
- Sean C_1 y C_2 dos cláusulas con literales L_1 y L_2 (donde L_1 y L_2 son *complementarias*). La resolución de C_1 y C_2 produce: $C = C'_1 \cup C'_2$ donde: $C'_1 = C_1 - \{L_1\}$ y $C'_2 = C_2 - \{L_2\}$

Ejemplos Derivación

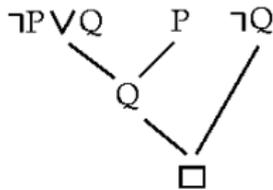
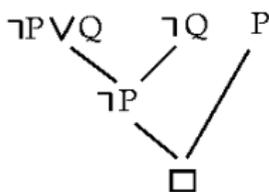
Modus Ponens:

$$\frac{P \rightarrow Q \quad P}{Q}$$



Modus Tollens:

$$\frac{P \rightarrow Q \quad \neg Q}{\neg P}$$



Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Unificación

Lógica

Reglas de Producción

Modelos Cualitativos

Representa. Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Para lógica de primer orden: *substitución* y *unificación*
- Una *substitución* $\Theta = \{X_1/t_1, \dots, X_k/t_k\}$ es una función de variables a términos. La aplicación $W\Theta$ de una *substitución* Θ a una *wff* W se obtiene al reemplazar todas las ocurrencias de cada variable X_j por el mismo término t_j
- Una *substitución* σ es un *unificador* de un conjunto de expresiones $\{E_1, \dots, E_m\}$ si $E_1\sigma = \dots = E_m\sigma$
- Un *unificador* θ , es el *unificador más general (mgu)* de un conjunto de expresiones E , si para cada *unificador* σ de E , existe una *substitución* λ tal que $\sigma = \theta\lambda$

Resolución

Lógica

Reglas de Producción

Modelos Cualitativos

Representa. Relacionales

Temporales

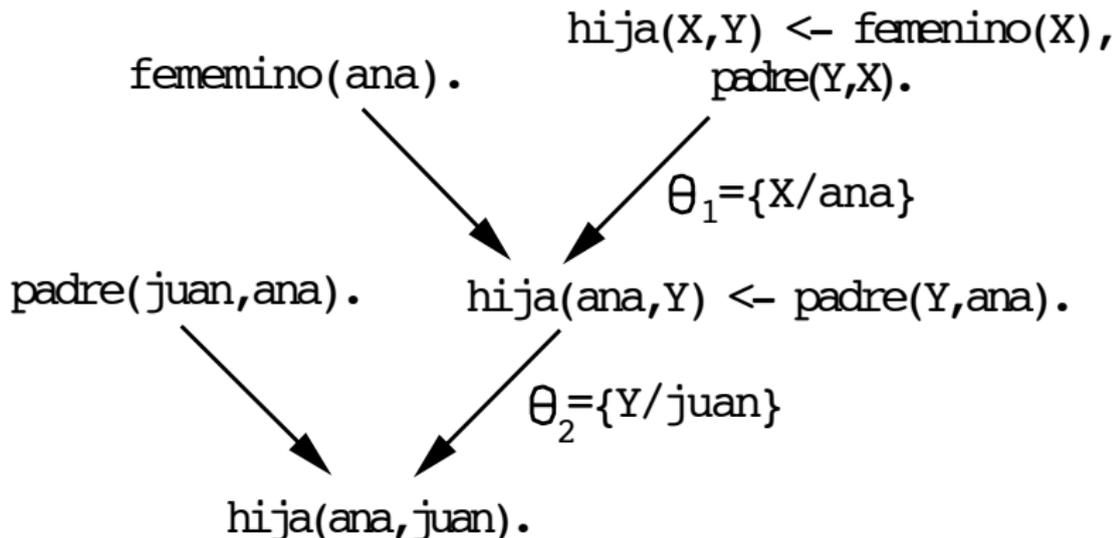
Causales

Espaciales

Funcionales

- Para hacer resolución en lógica de primer orden se buscan *unificaciones* (*mgu*) entre literales complementarias
- Sean C_1 y C_2 dos cláusulas con literales L_1 y L_2 respectivamente. Si L_1 y $\neg L_2$ tienen un *mgu* σ , el *resolvente* de C_1 y C_2 es la cláusula:
$$(C_1\sigma - \{L_1\sigma\}) \cup (C_2\sigma - \{L_2\sigma\})$$
- El algoritmo de unificación no es determinístico (se pueden seleccionar las cláusulas de varias formas)

Árbol de Derivación



Un árbol de derivación lineal de primer orden

Ejemplo de Unificación y *mgu*

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

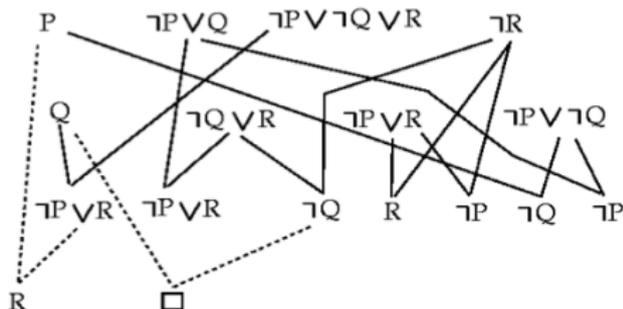
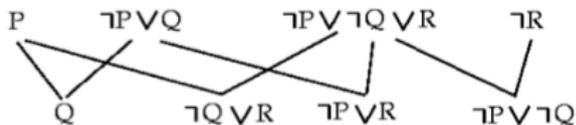
Funcionales

Para: $R(x, f(a, g(y)))$ y $R(b, f(z, w))$ podemos tener las siguientes unificaciones:

- $\sigma_1 = \{b/x, a/z, g(c)/w, c/y\}$
- $\sigma_2 = \{b/x, a/z, f(a)/y, g(f(a))/w\}$
- $\sigma_3 = \{b/x, a/z, g(y)/w\}$
- $\sigma_3\{c/y\} = \sigma_1$ y $\sigma_3\{f(a)/y\} = \sigma_2$

Estrategias de Resolución

- Existen diferentes estrategias de resolución, e.g., semántica, lineal, SLD, etc., para restringir el número de posibles cláusulas redundantes.
- E.g., $S = \{P, \neg P \vee Q, \neg P \vee \neg Q \vee R, \neg R\}$



Estrategias de Resolución

Lógica

Reglas de Producción

Modelos Cualitativos

Representa. Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- **Resolución lineal:** (i) El último resolvente se toma como cláusula padre y (ii) La otra cláusula padre se toma de otro resolvente o del conjunto original
- ***Input resolution:*** En cada paso de resolución, exceptuando el primero, se toma del último resolvente (cláusulas metas) y del conjunto original (cláusulas de entrada). Es *completa* para cláusulas de Horn.
- **Resolución SLD:** Seleccionar una literal, usando una estrategia **Lineal**, restringido a cláusulas **Definitivas**.

Resolución en Prolog

Lógica

Reglas de Producción

Modelos Cualitativos

Representa. Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Aunque resolución SLD es *sound* y *refutation complete* para cláusulas de Horn, en la práctica (por razones de eficiencia) se hacen simplificaciones:
 - Eliminar el “occur check” de unificación
 - Usar un orden específico
- Esto es lo que usa básicamente PROLOG

Lógica como Representación de Conocimiento

Lógica

Reglas de Producción

Modelos Cualitativos

Representa. Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Si se quiere representar conocimiento (i.e., correspondencia entre expresiones y el mundo real), cualquier formalismo debe de tener una semántica bien definida
- En este sentido la lógica es la técnica de representación de conocimiento usada en IA en donde más se ha trabajado al respecto
- Más que pensar en representaciones lógicas, hay que pensar en los atributos lógicos que se requieren, por ejemplo, representar el mundo en términos de objetos, sus propiedades y relaciones

Lógica como Representación de Conocimiento

- Nos interesa describir conocimiento incompleto
- En lógica:
 - Cuantificación existencial dice que algo tiene cierta propiedad sin especificar cuál
 - Cuantificación universal dice que todos tienen cierta propiedad sin tener que enumerarlos
 - Disjunción nos permite decir que al menos una (de dos) expresiones es verdadera sin especificar cual
 - Negación permite distinguir entre saber que algo es falso o no saber si es verdadero
 - Podemos tener expresiones sin saber que se refieren al mismo objeto a menos que lo digamos por medio de igualdad
- Algunos de estos atributos son generales y deben de estar en cualquier representación

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Lógica como Representación de Conocimiento

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales
Causales

Espaciales
Funcionales

- Lógica como formalismo para representar conocimiento ha sido muy criticado en IA
- Parte se debe a que los primeros sistemas (60's) trataron de usar probadores genéricos de teoremas como resolvedores generéricos de problemas
- El problema no está en la lógica sino en saber qué inferencias utilizar
- La eficiencia depende en gran medida en cómo formalizar las cosas y el tipo de razonamiento que se utiliza

Lógica como Representación de Conocimiento

- Lógica en general es adecuada, lo que se requiere son mejores procesos deductivos y/o extensiones
- Lógica proposicional es en general poco expresiva, pero es muy utilizada, por ejemplo, en árboles de falla, árboles de decisión, sistemas expertos, circuitos lógicos, etc.
- Lógica de primer orden es en general suficientemente expresiva pero el método de razonamiento es NP-completo
- Cláusulas de Horn, en general son adecuadas y permiten expresar funciones parcialmente recursivas (i.e., funciones computables por una máquina de Turing), es usado en programación lógica y para definir gramáticas

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Lógica como Representación de Conocimiento

Lógica

Reglas de Producción

Modelos Cualitativos

Representa. Relacionales

Temporales
Causales

Espaciales
Funcionales

Problemas:

- Expresar todo en fórmulas lógicas
- Razonar con tiempo, meta-inferencias
- Información incompleta o imprecisa
- Excepciones

Posibles soluciones, usar lógicas:

- No monotónicas
- Modales
- Temporales
- Difusas
- Combinar lógica y probabilidad

Artículos Relacionados con Lógica

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- J. McCarthy (1958). Programs with Common Sense
- R. Weyhrauch (1980). Prolegomena to a Theory of Mechanized Formal Reasoning.
- R. Moore (1982). The Role of Logic in Knowledge Representation and Commonsense Reasoning.

Reglas de Producción

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Normalmente se asocia la inteligencia con “regularidades” y el comportamiento inteligente parece que ejecuta reglas
- Newell y Simon 70’s proponen los sistemas de producción como un modelo psicológico del comportamiento humano
- En este modelo parte del conocimiento humano se representa en forma de producciones o reglas de producción
- Se asemeja al proceso de memoria humano: memoria a corto plazo (deducciones intermedias) y memoria a largo plazo (producciones)

Reglas de Producción

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Las reglas de producción se ven como un formalismo en el cual representar conocimiento y es el formalismo más usado en los sistemas expertos
- Credo: *los expertos tienden a expresar sus técnicas de solución de problemas en forma de reglas “situación - acción”*
- Las reglas de producción se usaron desde antes en teoría de autómatas, gramáticas formales y en el diseño de lenguajes de programación
- Originalmente las producciones eran reglas gramaticales para manipular cadenas de símbolos

Reglas de Producción

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
RelacionalesTemporales
CausalesEspaciales
Funcionales

- Post '43 estudió las propiedades de sistemas de reglas (que llamó sistemas canónicos).
- Ejemplo:
 - Alfabeto: $A = \{a,b,c\}$
 - Axiomas: a, b, c, aa, bb, cc
 - Producciones:
 - $\$ \rightarrow a\a
 - $\$ \rightarrow b\b
 - $\$ \rightarrow c\c

Reglas de Producción

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Estas reglas nos generan palíndromes, y podemos rastrear qué producciones se aplicaron (e.g., *bacab*)
- Las reglas de producción usadas en los sistemas expertos difieren un poco de las producciones, pero los principios son los mismos
- Reglas de producción manipulan estructuras de símbolos, como listas o vectores (más que *strings*)

Reglas de Producción

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Se tiene:

- Un conjunto N de nombres de objetos en el dominio
- Un conjunto P de propiedades que representan atributos de los objetos
- Un conjunto V de valores que los atributos pueden tener
- Generalmente se usa una tripleta:

(objeto atributo valor)

Reglas de Producción

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Por ejemplo: (juan edad 25), (juan edad X), (turbina capacidad 50)
- A veces las reglas se ponen: $P_1, \dots, P_m \rightarrow Q_1, \dots, Q_n$
- Que significa:
IF las condiciones P_1 y P_2 y ... y P_m se cumplen THEN
realiza las acciones (o concluye) Q_1 y ... y Q_n

Ejemplo

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

```
IF Animal es_un carnivoro AND  
   Animal color café AND  
   Animal tiene rayas  
THEN Animal es tigre
```

Propiedades de las Reglas

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- **Modularidad:** Cada regla define un pequeño y relativamente independiente pedazo de conocimiento
- **Incrementalidad:** Nuevas reglas pueden ser añadidas a la base de conocimiento relativamente independiente de las demás
- **Modificabilidad:** Como consecuencia de la modularidad, las reglas viejas pueden ser modificadas
- **Transparencia:** Se tiene la habilidad de explicar sus decisiones y soluciones

Reglas de Producción

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Un sistema de producción tiene:

- 1 Un conjunto de reglas (base de conocimiento)
- 2 Un interprete de reglas o máquina de inferencia (que decide qué regla aplicar, controla la actividad del sistema)
- 3 Una memoria de trabajo (guarda los datos, metas, y resultados intermedios)

Memoria de Trabajo

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Guarda inferencias/aseveraciones temporalmente.
- Es la estructura de datos que es observada y manipulada/cambiada por las reglas.
- Los datos de la memoria de trabajo son los que permiten cumplir las condiciones de las reglas y “dispararlas” (i.e., las reglas verifican la existencia de elementos en la memoria de trabajo para disparar).
- Las acciones de las reglas: Modifican, añaden o quitan elementos de la memoria de trabajo (o producen efectos secundarios).

Máquina de Inferencia

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Es quien controla qué reglas disparan.
- Generalmente el ciclo se empieza con unos datos iniciales y se para cuando no hay reglas aplicables (o por una regla).
- El interprete o máquina de inferencia realiza el ciclo *reconoce-actua*

Ciclo Reconoce Actua

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- 1 Aparea las condiciones (o acciones) de las reglas con los elementos de la memoria de trabajo
- 2 Si existe más de una regla que puede disparar, selecciona una (*resolución de conflictos*)
- 3 Aplica la regla (ejecuta las acciones/conclusiones) que puede involucrar cambios la memoria de trabajo

Reglas de Producción

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- El sentido/importancia/contribución de cada regla depende de su contribución dentro de todas las reglas para solucionar el problema.
- Existen diferentes estrategias de razonamiento: A nivel global la estrategia de inferencia puede ser en un *encadenamiento hacia adelante* o en un *encadenamiento hacia atrás*.

Estrategias de Razonamiento

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Encadenamiento hacia adelante (*forward chaining/data driven/event driven/bottom-up*) parte de hechos para cumplir condiciones y ejecutar acciones (creando nuevos hechos).
- Encadenamiento hacia atrás (*backward chaining/goal driven/expectation driven/top-down*) parte de los estados meta y trata de cumplir las condiciones necesarias para llegar a ellos.

Estrategias de Razonamiento

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Aunque se llame *goal-driven* el encadenamiento hacia atrás y *data-driven* el hacia adelante ésto no es completamente cierto, se puede proceder de metas hacia hechos con encadenamiento hacia adelante y viceversa.
- Una es la técnica de razonamiento (aparear lados izquierdos o derechos) y otra el proceso (de metas a hechos o viceversa).

Estrategias de Razonamiento

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Se pueden tener estrategias que hacen combinación de ambos: oportunístico.
- Ejemplo:
P1: $\$ - > a\a
P2: $\$ - > b\b
P3: $\$ - > c\c
- Podemos dado c usar las reglas P1, P1, P3, P2, P3 y llegar a: $cbcaacaacbc$
- Otra forma es tomar $cbcaacaacbc$ y ver qué reglas se aplican hasta llegar a algo conocido (i.e., c).

Proceso de Inferencia

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

El proceso de inferencia se puede ver como un espacio de búsqueda AND/OR:

- Con nodos AND siendo todas las condiciones/ acciones que se tienen que cumplir y
- Los nodos OR siendo las posibles reglas a disparar/ considerar

Ejemplo: Sistema de créditos

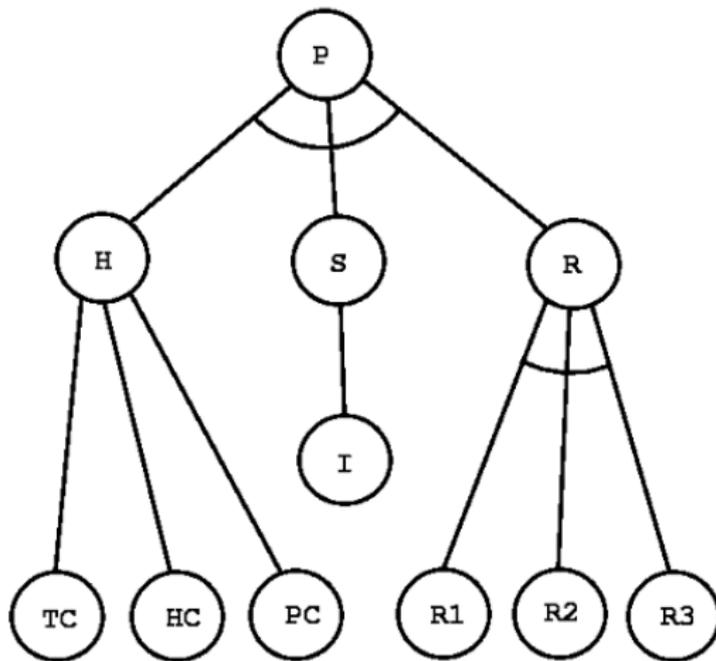
Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
RelacionalesTemporales
CausalesEspaciales
Funcionales

IF hist-crédito & solvente & refer
 Then otorga-préstamo
 IF tarjetas-crédito > 2
 Then hist-crédito
 IF hipoteca-casa OR prest-auto
 Then hist-crédito
 IF ingresos > pago-mensual x 3
 Then solvente
 If ref1 & ref2 & ref3
 Then refer

Memoria de Trabajo
 ingresos=1000
 pago-mensual=200
 hipoteca-casa
 ref-María
 ref-Juan
 ref-Pedro

Árboles AND/OR



Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
RelacionalesTemporales
Causales
Espaciales
Funcionales

Ejemplo de Encadenamientos

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Forward:

- $HC \rightarrow H$
- $I \rightarrow S$
- $R1, R2, R3 \rightarrow P$
- $H, S, R \rightarrow P$

Backward:

- $P \leftarrow H, S, R$
- $H \leftarrow HC$
- $S \leftarrow I$
- $R \leftarrow R1, R2, R3$

¿Cuándo usamos cada uno?

- Depende del propósito y la forma del espacio de búsqueda.
- Si el propósito es descubrir todo lo que se pueda deducir de un conjunto de hechos, el árbol se “achica”, tenemos claras las entradas pero no las conclusiones, entonces encadenamiento hacia adelante.
- Si el propósito es verificar/negar una conclusión, el árbol se “ensancha”, tenemos claras las metas pero no las entradas, entonces encadenamiento hacia atrás.
- Si tenemos claras las entradas y metas, no necesitamos nada.

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Reglas de Producción

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Con las reglas podemos resolver preguntas:
How, e.g., ¿cómo supiste N?
- *WHY*, e.g., ¿porqué quieres saber A?

Ejemplo

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

R1: If verde Then vegetal

R2: If en-caja-pequeña Then delicado

R3: If refrigerado Or vegetal Then se-descompone

R4: If pesado And barato And Not se-descompone Then
ladrillo

R5: If se-descompone And pesado Then pozole

R6: If pesado And vegetal Then melón

Ejemplo

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Si tenemos en la memoria de trabajo: *verde* y *pesado*
- [verde, pesado]
[verde, pesado, vegetal] (R1)
[verde, pesado, vegetal, se-descompone] (R3)
[verde, pesado, vegetal, se-descompone, pozole] (R5)
[verde, pesado, vegetal, se-descompone, pozole,
melón] (R6)

Ejemplo

Reglas:

R1: If una persona tiene \$30,000 y
tiene grado de licenciatura

Then debe de invertir a plazo fijo

R2: If una persona gana más de \$120,000 al año
y tiene licenciatura

Then debe de invertir en acciones

R3: If una persona es menor de 30 y
está invirtiendo a plazo fijo

Then debe invertir en acciones

R4: If una persona es menor de 30
Then tiene nivel licenciatura

R5: If una persona quiere invertir en acciones
Then debe de invertir en Telmex

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Ejemplo

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Hechos:

Tiene \$30,000 y tiene 25 años

Quiere saber si debe de invertir en Telmex?

A = tiene \$30,000

B = menos de 30 años

C = educación nivel licenciatura

D = salario anual mayor de \$120,000

E = invertir a plazo fijo

F = invertir en acciones

G = invertir en Telmex

Ejemplo

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- ¿Cuál es tu ingreso anual?
- ¿Porqué?
- Quiero saber si es mayor a \$120,000, porque como sé que tienes nivel de licenciatura, si ganas más de \$120,000 te recomiendo invertir en acciones

Ejemplo

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Invierte en Telmex
- ¿Cómo?
- Como tienes \$30,000 y eres menor de 30, yo se (R4) que tienes nivel licenciatura. Si es así, yo se (R1) que debes invertir a plazo fijo. Por otro lado si inviertes a plazo fijo yo se (R3) que debes invertir en acciones. Si quieres invertir en acciones yo te recomiendo (R5) que inviertas en Telmex.

Explicaciones

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Las explicaciones sirven para:

- Mostrar deficiencias de las reglas
- Clarificar suposiciones de la máquina
- Explicar situaciones no anticipadas
- Hacer sentir al usuario más seguro
- Hacer ver la máquina más “inteligente”

Reglas de Producción

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Las condiciones nos proporcionan todo el contexto de las acciones.
- Esto hace que las reglas sean modulares, **si** se definen apropiadamente.

Resolución de Conflictos

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- En razonamiento hacia adelante puede existir más de una regla que puede disparar.
- En razonamiento hacia atrás puede existir más de una regla que cumple con las metas.
- Lo que se necesita es una estrategia de resolución de conflictos que guíe (decida cuál de las posibles reglas disparar) y evite que el proceso sea exponencial.

Resolución de Conflictos

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
RelacionalesTemporales
CausalesEspaciales
Funcionales

- Existen casos de reglas *determinísticas* donde sólo una regla puede disparar a la vez (rara vez).
- Para controlar ésto se utilizan: *control global* (indep. del dominio) y *control local* (dependiente del dominio).
- El control local puede ser por medio de meta-reglas (reglas que controlan reglas).
- Puntos a considerar: (i) *Sensibilidad* (responder rápidamente a cambios en el medio) y (ii) *Estabilidad* (mostrar cierta continuidad en la línea de razonamiento).

Estrategias Globales

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Las estrategias globales más populares (pero hay más) son:

- No se permite disparar una regla más de una vez con los mismos datos (*refractorines*)
- Preferir reglas que utilizan datos más recientes (la idea es de seguir una línea de razonamiento) (*recency*)
- Preferir reglas que son más específicas, i.e., reglas que tienen una mayor cantidad de condiciones y por lo tanto son más difíciles de disparar (*specificity*)

Estrategias Globales

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Otras estrategias son:

- Dar prioridad en las reglas u ordenarlas
- Dar prioridad en los hechos
- Uso de contextos

Meta-Reglas

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Algunos sistemas permiten tener reglas que razonan sobre qué reglas disparar (meta-reglas)
- Las meta-reglas tiene el rol de dirigir el razonamiento (más que realizar el razonamiento)
- Ejemplo: IF edad paciente $>$ 65 Then aplica reglas de enfermedades de la vejez

Apareamiento de Patrones

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Normalmente existen variables en las reglas y se tiene que hacer un “apareamiento de patrones”.
- Notación: $?x$ aparea un elemento, $!x$ aparea varios elementos, e.g.,
 - If Persona nombre $?x$ edad $?y$
 - And $?y > 12$
 - And $?y < 20$
 - Then $?x$ es un adolescente
- Hecho: Persona nombre Juan edad 25.

Apareamiento de Patrones

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- El apareo de condiciones en general es más fácil en encadenamiento hacia adelante que en encadenamiento hacia atrás
- En Fwd: Datos hechos (sin variables) apareamos con condiciones (con variables) y producimos nuevos hechos (sin variables)
- En Bwd: Hipótesis (con variables) apareamos consecuencias (con variables) y producimos nuevas hipótesis (con variables) se acerca más a unificación

Ejemplo

[(lista a b f g h) (elemento g)]

Reglas:

R1: If (lista ?x !y)

and not (elemento ?x)

Then remove (lista ?x !y)

and add (lista ?y)

R2: If (lista ?x) Or (lista ?x !)

and (elemento ?x)

Then write (?x es elemento de lista)

R3: If (lista ?x)

and not (elemento ?x)

Then write (?x no pertenece a lista)

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Apareamiento Bwd.-Chn.

Pasos de encadenamiento hacia atrás: El proceso trata de establecer valores para las variables de las reglas

Establece variables	(procedimiento principal)
Infiere	(trata de inferir los valores)
Selecciona reglas	(selecciona reglas aplicables)
“look-ahead”	(busca condiciones que aplican)
Ejecuta	(ejecuta la condición)
Aplica regla	(aplica la regla seleccionada)
Evalúa condiciones	(checa las condiciones)
Establece variables	(llamada recursiva)
Ejecuta	(ejecuta las condiciones)
Evalúa Conclusiones	(evalúa las conclusiones)
Ejecuta acción	(ejecuta acciones)
Pregunta	(no inferible y “preguntable”)

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Reglas de Producción

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

E.g., vars. múltiples y preguntables: $\{x,u,w\}$, vars. múltiples no preguntables: $\{y, v\}$, meta valor único, no preguntable: $\{z\}$.

R1: If $w = a$ and $x = b$ Then $v = c$

R2: If $w = d$ and $v = c$ Then $y = e$

R3: If $v = c$ Then $z = k$

R4: If $x = j$ and $y = e$ Then $z = h$

R5: If $u = f$ and $x = g$ Then $z = i$

Apareamiento Fwd.-Chn.

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Pasos de encadenamiento hacia adelante: se utiliza más “remove”

Infiere	(proceso global para disparar reglas)
Selecciona reglas	(selecciona las reglas aplicables)
Resuelve conflictos	(decide qué regla aplicar)
Aplica regla	(aplica reglas)

Extensiones

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Contexto (estructura, jerarquía, meta-reglas, ...)

IF: condiciones “clásicas”

THEN: consecuencias

Acciones: mensajes, etc.

Datos: 6/10/17, clase del INAOE, etc.

Explicación: Esta regla es de ejemplo y sólo sirve
para ilustrar algunas extensiones

Compilación: ...

Extensiones

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Pueden incluir incertidumbre:
 - En cada regla
 - En cada condición
 - En cada conclusión

Ventajas de Reglas de Producción

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Permiten representar el conocimiento en forma adecuada para las computadoras
- Modularizan pedazos de conocimiento
- Permiten el desarrollo incremental
- Las decisiones son entendibles y explicables
- Abren nuevas posibilidades computacionales (paralelismo)
- Representación homogénea de conocimiento
- Permiten interacciones no planeadas y útiles

Desventajas de Reglas de Producción

- No hay fundamento para decidir qué problemas tiene solución
- Problemas de verificación / consistencia / completez de conocimiento
- Escalamiento sin perder entendimiento / eficiencia
- Permiten interacciones no planeadas y no deseadas
- No saben cuando romper sus propias reglas
- No tienen acceso al razonamiento que hay detrás de las reglas
- Inadecuadas para describir conocimiento declarativo
- Tienen fuerte sabor operacional, por lo que deben de pensarse tomando en cuenta esto
- Bases de reglas grandes son difíciles de mantener y desarrollar

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Herramientas de Desarrollo

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Existen diferentes herramientas de desarrollo para construir sistemas basados en reglas
- Las podemos dividir en 3 niveles:
 - *Shells*: Exsys, Nexpert, ...
 - Lenguajes de reglas: OPS5, CLIPS, ...
 - Lenguajes simbólicos: Lisp, Prolog

Modelos Cualitativos

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Conocimiento superficial vs. profundo.
- Normalmente los SE tienen conocimiento superficial en forma de reglas de producción.
- El conocimiento superficial representa conocimiento que puede utilizarse en situaciones específicas, en donde las conclusiones se derivan directamente de las observaciones, e.g.,

IF el tanque está vacío
Then el coche no arranca

Modelos Cualitativos

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

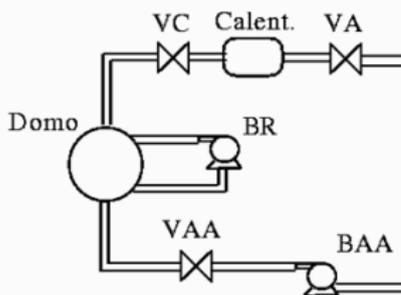
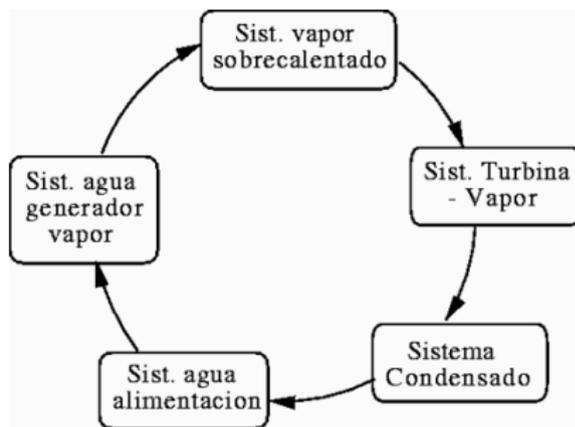
Causales

Espaciales

Funcionales

- Un sistema físico puede describirse en términos de sus componentes y conexiones.
- La motivación es capturar conocimiento de sentido común de los expertos.
- El conocimiento profundo se refiere a las estructuras internas y causales de un sistema y considera las interacciones entre sus componentes.

Modelos Cualitativos



Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Modelos Cualitativos

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

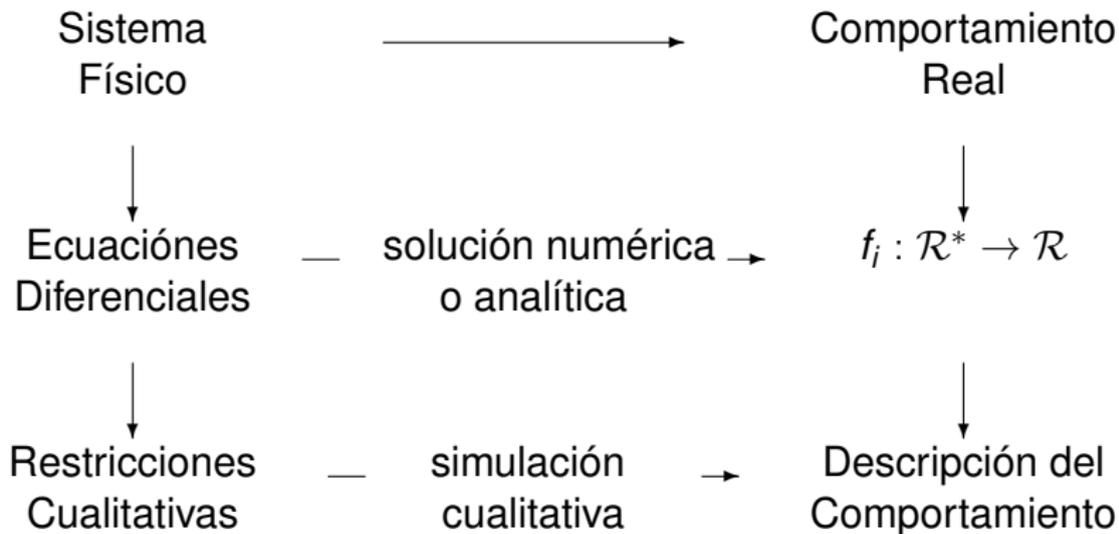
Causales

Espaciales

Funcionales

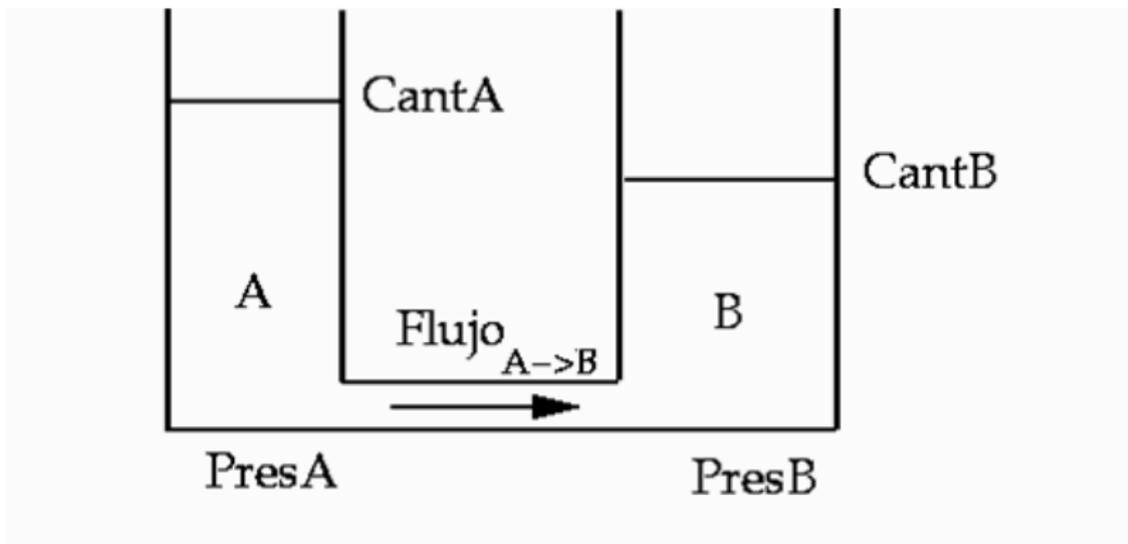
- Una forma de representar conocimiento profundo es por medio de modelos cualitativos.
- Normalmente se hace una simulación cualitativa.
- Surgió al tratar de resolver problemas de ingeniería y dándose cuenta que simuladores más grandes o mejores resolvedores de ecuaciones no resolverían totalmente el problema.

Modelos Cualitativos



Modelos Cualitativos

- Un modelo cualitativo consiste en un conjunto de variables de estado (o parámetros) del sistema y un conjunto de restricciones que relacionan las variables.



Modelos Cualitativos y QSIM

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

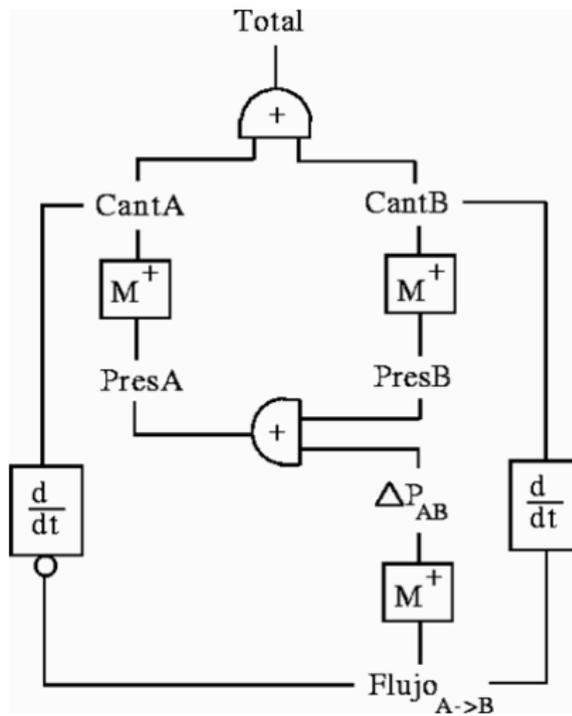
Espaciales

Funcionales

Restricciones	Valores Corresp.	Variables
$\text{CantA} + \text{CantB} = \text{Total}$		$\text{CantA} (0 \text{ AMax } \infty)$
$\text{PresA} = M^+(\text{CantA})$	$(0 \ 0) (\infty \infty)$	$\text{CantB} (0 \text{ BMax } \infty)$
$\text{PresB} = M^+(\text{CantB})$	$(0 \ 0) (\infty \infty)$	$\text{PresA} (0 \ \infty)$
$\text{PresA} - \text{PresB} = \Delta\text{PAB}$		$\text{PresB} (0 \ \infty)$
$\text{flujo}_{A \rightarrow B} = M^+(\Delta\text{PAB})$	$(-\infty \ -\infty)$	$\Delta\text{PAB} (-\infty \ 0 \ \infty)$
	$(0 \ 0)(\infty \ \infty)$	
$d \text{ CantB}/dt = \text{flujo}_{A \rightarrow B}$		$\text{flujo}_{A \rightarrow B} (-\infty \ 0 \ \infty)$
$d \text{ CantA}/dt = - \text{flujo}_{A \rightarrow B}$		$\text{Total} (0 \ \infty)$

Dada una descripción inicial queremos predecir el comportamiento.

Modelos Cualitativos y QSIM



Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Modelos Cualitativos y QSIM

Lógica

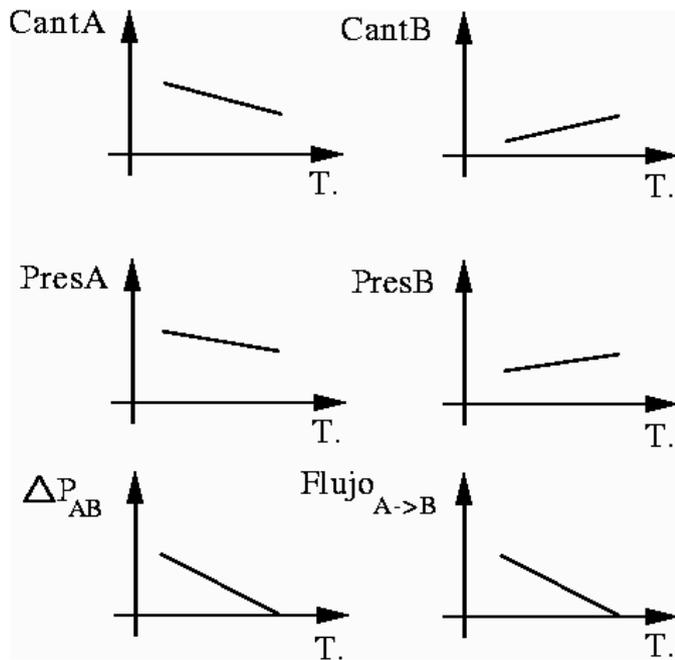
Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales



QSIM

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- QSIM es un sistema para simulación cualitativa desarrollado por B. Kuipers y otros
- Dado un conjunto incompleto de estados de variables y un conjunto de restricciones, QSIM determina todos los posibles estados que son consistentes con las restricciones.
- El estado cualitativo de un variable es una lista con su valor cualitativo (en o entre valores característicos) y la derivada cualitativa: aumentando (*inc*), decreciendo (*dec*) o constante (*std*).

Estado Cualitativo

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Defn: Sean $l_1 < \dots < l_k$ los valores característicos de $f : [a, b] \rightarrow \mathcal{R}^*$, para cualquier $t \in [a, b]$. Un estado cualitativo de f en t , $QS(f, t)$, en un par $\langle qval, qdir \rangle$ definido como:

$$qval = \begin{cases} l_j & \text{if } f(t) = l_j; \text{ un } \textit{landmark} \\ (l_j, l_{j+1}) & \text{if } f(t) \in (l_j, l_{j+1}) \end{cases}$$

$$qdir = \begin{cases} \textit{inc} & \text{if } f'(t) > 0 \\ \textit{std} & \text{if } f'(t) = 0 \\ \textit{dec} & \text{if } f'(t) < 0 \end{cases}$$

Restricciones Cualitativas

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- El estado cualitativo se expresa en términos de los valores de las variables. Las relaciones entre las variables está dado por las restricciones cualitativas: *suma, mult, menos, deriv, M^+ , M^- y constante.*
- Dada cualquier ODE (ecuaciones diferenciales ordinarias), éstas las podemos traducir a su equivalente QDE (ecuaciones diferenciales cualitativas), pero una QDE puede mapear a un número infinito de ODE.

Ejemplo

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

$$d^2u/dt - du/dt + \arctanku = 0$$

$$f_1 = du/dt \quad \text{deriv}(u, f_1)$$

$$f_2 = df_1/dt \quad \text{deriv}(f_1, f_2)$$

$$f_3 = ku \quad \text{mult}(k, u, f_3)$$

$$f_4 = \arctanf_3 \quad M^+(f_3, f_4)$$

$$f_2 - f_1 + f_4 = 0 \quad \text{suma}(f_2, f_4, f_1)$$

Simulación

Lógica

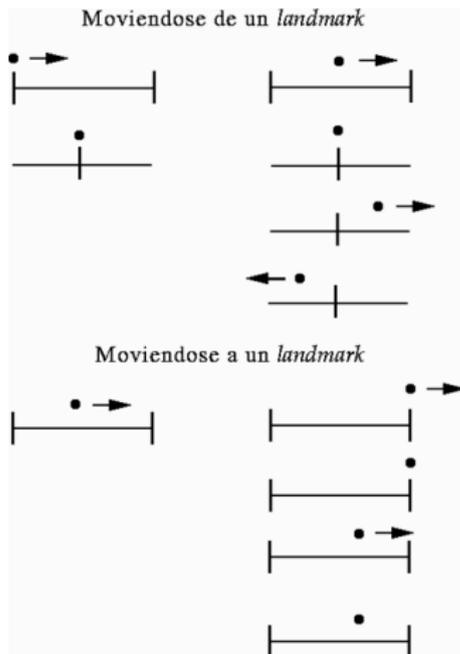
Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales



Modelos Cualitativos y QSIM

- Se puede demostrar que QSIM garantiza incluir todos los comportamientos que exhiben las ecuaciones diferenciales originales (*sound*), pero no garantiza incluir sólo esas (*no complete*) y normalmente genera comportamientos que no representan realidades físicas.
- Uno de los problemas es ambigüedad en la derivada de expresiones complejas. Por ejemplo: $z = xy$, $x = \text{inc}$, $y = \text{dec}$, entonces $z = \text{inc}$, dec o std .
- Las derivadas sólo están restringidas por consideraciones de continuidad y no por valores característicos.
- Se han realizado extensiones para tratar de resolver algunos de estos problemas

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Representaciones Relacionales

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Abarcan la representación de relaciones que normalmente no se incluyen en las formas de representación clásicas:

- Temporales
- Causales
- Espaciales
- Funcionales

Representaciones Temporales

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

La manipulación de datos acerca del tiempo involucra la selección de datos y capacidades de inferencia sobre esos datos.

El razonamiento temporal es relevante para:

- Bases de Datos y de Conocimiento
- Inteligencia Artificial
- Ingeniería de Software

Representaciones Temporales

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Los problemas típicos que involucran tiempo son:

- Razonamiento sobre eventos del pasado para analizar el presente
- Planeación de acciones futuras y predicción de consecuencias
- Trabajar dentro de las restricciones de tiempos de respuestas
- Manejo de datos imprecisos e incompletos

Representaciones Temporales

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

El razonamiento temporal incluye:

- Manejo de dependencias entre diferentes datos sobre el tiempo
- Razonamiento acerca del período de validez de valores de los datos
- Manejo de datos acerca del tiempo incompletos

Representaciones Temporales

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Dentro de Inteligencia Artificial se ha trabajado con razonamiento temporal en:

- Interpretación de datos y sus relaciones temporales, por ejemplo en Procesamiento de Lenguaje Natural
- Planificación de tareas bajo restricciones de tiempo
- Diagnóstico considerado el tiempo de ocurrencia de eventos
- etc.

Representaciones Temporales

Puntos importantes:

- Selección de las entidades primitivas de tiempo: tiempos puntuales vs. intervalos de tiempos
- Ordenamiento del tiempo: Orden total (“flujo” lineal) vs. orden parcial (ramificación en diferentes posibles evoluciones) vs. circularidad (eventos/procesos recurrentes)
- Estructura del tiempo: Números racionales, reales, enteros
- Intervalos abiertos/cerrados en tiempos puntuales
- Métrica de tiempo: Operaciones sobre el tiempo, distancias temporales, diferente granularidad o niveles de abstracción

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Representaciones Temporales

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

El razonamiento temporal requiere considerar:

- La especificación de mecanismos para derivar información adicional.
- Muchas veces los datos acerca del tiempo son incompletos.
- La información temporal puede ser sobre tiempos absolutos y/o relativos
- El desarrollo del lenguaje temporal
- El diseño de mecanismos de consistencia y persistencia

El *Frame* y *Qualification Problem*

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- El *frame problem* surge al tratar de razonar rigurosa y efectivamente acerca del futuro.
- El problema general es cómo razonar *eficientemente* acerca de lo que es verdadero sobre períodos extendidos de tiempo.
- Balance entre: Evitar riesgos y economizar el proceso de predicción.

El *Frame* y *Qualification Problem*

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- El problema es si tenemos: IF *algo* es verdadero en un cierto tiempo THEN *ésto* es verdadero en éste tiempo.
- El *qualification problem* es el problema de hacer predicciones válidas acerca del futuro sin tener que considerar todo el pasado.

Representaciones Temporales

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Se han propuesto varias formas de representación para razonar acerca del tiempo

Entre estas se encuentran:

- Cálculo de situaciones
- Lógica temporal de McDermott
- Lógica de Allen
- Redes Bayesianas Dinámicas

Lógica Temporal de Allen

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- J. Allen '83, R. Pelavin y J. Allen '86
- Utiliza una lógica temporal basada en intervalos de tiempo con un mecanismo de propagación de restricciones.
- Meta: Usar una lógica que permita considerar eventos externos, su interacción en los planes y acciones concurrentes.
- Un evento es un conjunto de intervalos temporales sobre el cual el cambio asociado al evento ocurre.

Lógica Temporal de Allen

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Existe una noción de lo que está pasando mientras ocurre el evento
- Pueden existir varios eventos ocurriendo en el mismo intervalo (concurrentes)
- Existen 13 formas (mutuamente exclusivas) en que dos intervalos pueden relacionarse.
- Las relaciones entre intervalos están guardadas en una red (nodos = intervalos, arcos = relaciones).
- Cada vez que una nueva relación es añadida, se hace una propagación de restricciones para calcular nuevas relaciones.

Relaciones Temporales

Relación	Símbolo	Inverso	Representación
X before Y	<	>	XXX YYY
X equal Y	=	=	XXX YYY
X meets Y	m	mi	XXXYYY
X overlaps Y	o	oi	XXX YYY
X during Y	d	di	XXX YYYYY
X starts Y	s	si	XXX YYYYY
X finishes Y	f	fi	XXX YYYYY

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Propagación de Restricciones

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Cuando se introduce un nuevo intervalo, se actualiza la red calculando todas sus consecuencias
- Para ello se utilizan las relaciones de transitividad entre pares de relaciones temporales
- Estas relaciones se propagan a través de la red obteniendo nuevas relaciones entre los intervalos

Relaciones de Transitividad

B r2 C		<	>	d	di	o	oi	m	mi	s	si	f	fi
A r1 B													
"before"	<	<	no info	< o m d s	<	<	< o m d s	<	< o m d s	<	<	< o m d s	<
"after"	>	no info	>	> oi m d f	>	>	> oi m d f	>	> oi m d f	>	>	>	>
"during"	d	<	>	d	no info	< o m d s	> oi m d f	<	>	d	> oi m d f	d	< o m d s
"contains"	di	< o m di fi	> oi di mi si	o oi dur con =	di	o di fi	oi di si	o di fi	oi di si	di fi o	di	di si oi	di
"overlaps"	o	<	> oi di mi si	o d s	< o m di fi	< o m	o oi dur con =	<	oi di si	o	di fi o	d s o	< o m
"over-lapped-by"	oi	< o m di fi	>	oi d f	> oi mi di si	o oi dur con =	> oi mi	o di fi	>	oi d f	oi > mi	oi	oi di si
"meets"	m	<	> oi mi di si	o d s	<	<	o d s	<	f fi si =	m	m	d s o	<
"met-by"	mi	< o m di fi	>	oi d f	>	oi d f	>	s si =	>	d f oi	>	mi	mi
"starts"	s	<	>	d	< o m di fi	< o m	oi d f	<	mi	s	s si =	d	< m o
"started by"	si	< o m di fi	>	oi d f	di	o di fi	oi	o di fi	mi	s si =	si	oi	di
"finishes"	f	<	>	d	> oi mi di si	o d s	> oi mi	m	>	d	> oi mi	f	f fi =
"finished-by"	fi	<	> oi mi di si	o d s	di	o	oi di si	m	si oi di	o	di	f fi =	fi

FIGURE 4. The Transitivity Table for the Twelve Temporal Relations (omitting "=").

Lógica

Reglas de Producción

Modelos Cualitativos

Representa. Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Análisis

- Para N de nodos el número de modificaciones es:

$$13 \times \frac{(N - 1)(N - 2)}{2}$$

- El algoritmo no genera inconsistencias, pero no las detecta en la entrada.
- Para reducir requerimientos de espacio, introduce *intervalos de referencia* (intervalo que agrupa intervalos).
- Con esto se puede construir una jerarquía y encontrar relaciones entre ella.

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

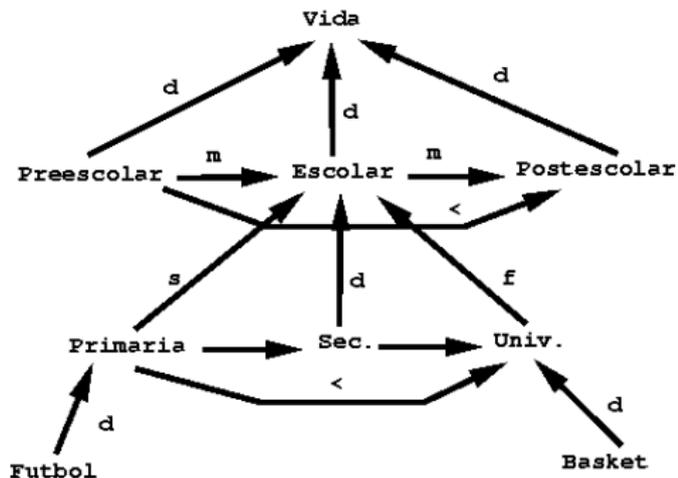
Causales

Espaciales

Funcionales

Representaciones Temporales

Intervalos de Referencia



Relación Futbol - Basket?

Redes Bayesianas Dinámicas (DBNs)

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- 1 Representan procesos dinámicos
- 2 Tienen una representación del estado de un proceso en un tiempo (red base) y de sus relaciones temporales (red de transición)
- 3 Son una generalización de los Modelos ocultos de Markov (HMM)

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

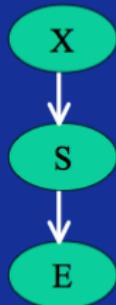
Temporales

Causales

Espaciales

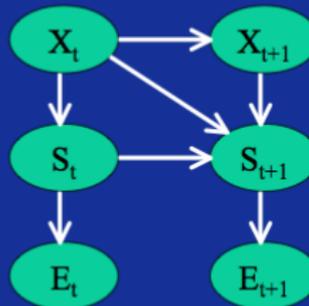
Funcionales

Red base



T

Red de Transición



T

T + 1

Lógica

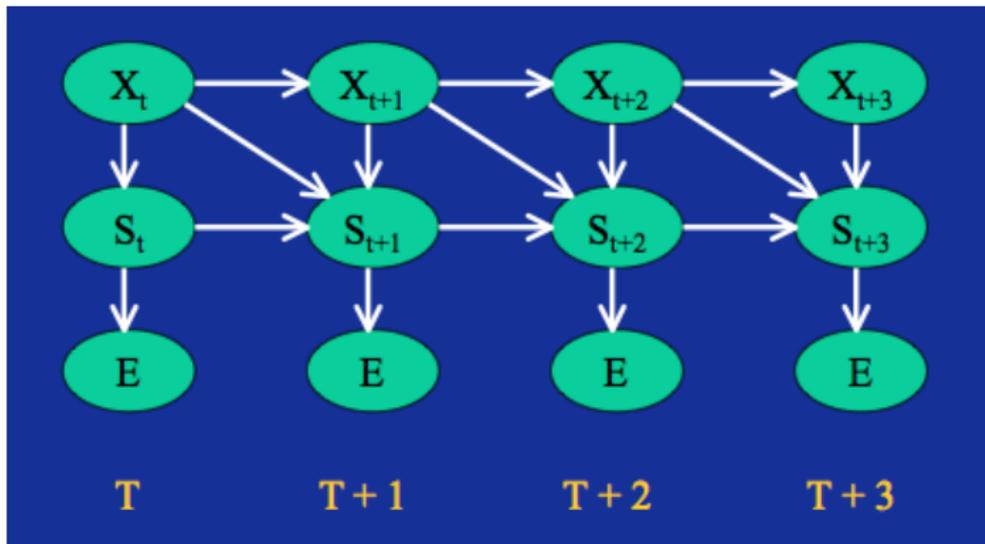
Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales



Suposiciones

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- 1 **Proceso Markoviano:** El estado actual sólo depende del estado anterior (sólo hay arcos entre tiempos consecutivos)
- 2 **Proceso Estacionario:** Las probabilidades de transición no cambian en el tiempo

Inferencia

- 1 Se puede predecir el siguiente estado dadas las observaciones pasadas
- 2 Se pueden predecir estados futuros dadas las observaciones pasadas
- 3 Se puede estimar el estado actual dadas observaciones pasadas (y futuras)
- 4 Se puede encontrar la secuencia más probable de los valores de las variables dadas las observaciones
- 5 La inferencia es más compleja y a veces se usan técnicas aproximadas basadas en simulación (e.g., filtros de partículas)

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Representaciones Causales

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- El concepto de “causalidad” es controversial
- En muchos casos es muy difícil saber cuál es la *causa* y cuál es el *efecto*.
- Incluso algunas personas afirman que en realidad no existe objetivamente la causalidad, sino es una invención humana que existe sólo en la mente.
- Sin embargo, es importante poder representar y razonar acerca de causalidad, en particular en sistemas que intenten representar el “sentido común”.

Causales

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Uno tiene que preguntarse ¿cómo adquirir información causal?
- ¿Cómo procesarla?
- Ejemplo:
 - I1: Si el pasto está mojado, entonces llovió
 - I2: Si rompemos una botella, entonces se moja el pasto
 - O1: Si rompermos esta botella, entonces lloverá

Causales

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

CYC [Lenat 90] distingue dos significados para “Evento 1 *causa* Evento 2”:

- 1 Precedencia temporal: Evento 1 precede temporalmente a Evento 2 (E1 empieza antes que E2).
- 2 Implicación mecánica: Evento 1 *ocasiona* Evento 2 mediante algún mecanismo, posiblemente desconocido.

Causales

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

CYC representa los diferentes tipos de causalidad y los utiliza de dos formas:

- 1 Predicción: Si ocurre E1 predice que E2 ocurrirá.
- 2 Abducción: Si ocurre E2 *posiblemente* ocurrió E1.

Redes Causales

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Recientemente se han desarrollado nuevas formas de representación de causalidad que se originan de modelos gráficos probabilísticos, en particular, las redes bayesianas
- En éstas, normalmente se interpreta que la variables al inicio de una arco *causa* la variable al final del arco. Esto es:

$$E1 \longrightarrow E2$$

Redes Causales

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Un modelo causal M es una DAG en el que se tienen variables exógenas, variables endógenas y funciones
- Modelos Causal: $M = \langle U, V, F \rangle$, donde:
 - U - variables exógenas
 - V - variables endógenas
 - F - funciones, $v_i = f(pa_i, U_k)$, donde pa_i son los padres de la variable endógena i , U_k son las variables exógenas que la afectan
 - Las funciones pueden ser determinísticas o probabilísticas

Redes Causales

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

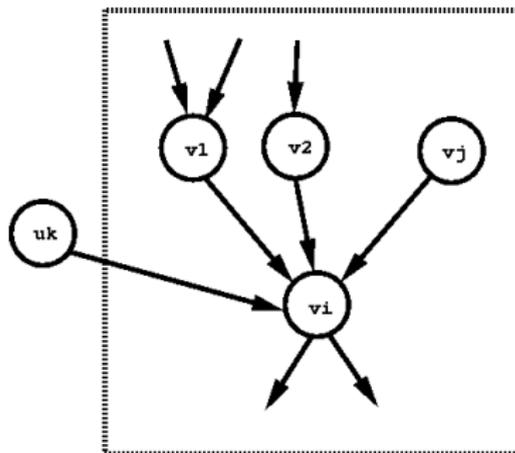
Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Modelo Causal



Redes Causales

Lógica

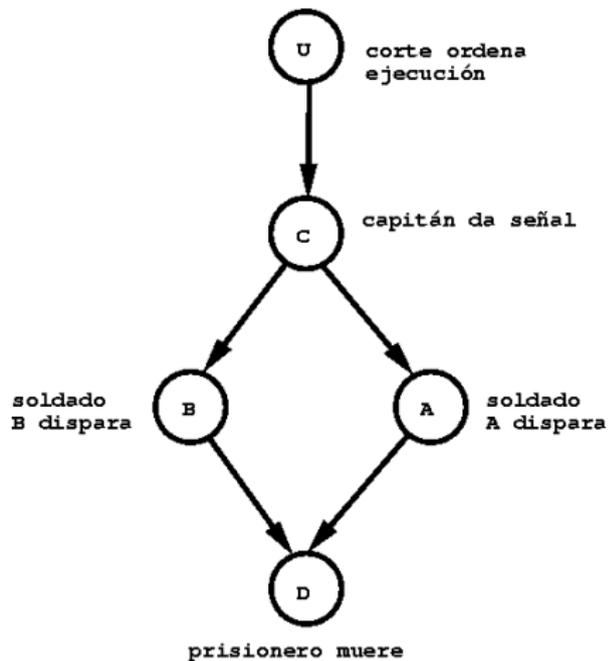
Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
RelacionalesTemporales
CausalesEspaciales
Funcionales

Con base en un modelo causal se pueden contestar varios tipos de preguntas que tienen que ver con causalidad:

- Efecto de acción: Si $X = x$, ¿qué pasa con las demás variables (M_x)?
- Respuesta potencial: Si $X = x$ ¿qué pasa con otra variable (Y)?
- *Couterfactual*: ¿Cómo sería Y si hubiera sido $X = x$?

Ejemplo

Ejemplo de Modelo Causal



Posibles Preguntas

- Si el soldado “A” no dispara, ¿el prisionero vive?
($\neg A \Rightarrow \neg D$)
- Si el prisionero está vivo, ¿el capitán no dió la señal?
($\neg D \Rightarrow \neg C$)
- Si el soldado “A” disparó, ¿también disparó “B”?
($A \Rightarrow B$)
- Si el capitán no dió la señal y “A” decide disparar, ¿muere el prisionero y “B” no dispara?
($\neg C \wedge A \Rightarrow D \wedge B$)
- Si el prisionero está muerto, ¿lo estaría aunque “A” no hubiera disparado? ($D \Rightarrow D \wedge \neg A$)

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

Posibles Preguntas

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Las primeras 3 preguntas pueden ser expresadas y resueltas en lógica clásica, pero las otras 2 requieren de un modelo causal y otras técnicas de inferencia
- ¿Cómo realizar conclusiones probabilísticas y no solo lógicas?

Causales

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales
Causales

Espaciales
Funcionales

- Recientemente se han hecho importantes avances en la representación y razonamiento con conocimiento causal
- Estos tienen implicaciones para diversas áreas como la estadística, la economía, la medicina y la inteligencia artificial
- Actualmente se desarrollan representaciones deterministas y probabilistas basadas en modelos gráficos, así como técnicas para obtener modelos causales a partir de datos

Representaciones Espaciales

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Las representaciones espaciales se refieren a representar y razonar acerca de la posición en el espacio de los objetos y las relaciones espaciales entre dos o más objetos.
- En principio se puede pensar en hacer una analogía espacio-tiempo y considerar una representación similar a las de tiempo. Sin embargo, existen dos diferencias fundamentales:
 - 1 El tiempo es unidimensional mientras que el espacio es tridimensional.
 - 2 El tiempo tiene cierta dirección mientras que en el espacio no hay esta distinción.

Representaciones Espaciales

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales
Causales

Espaciales
Funcionales

CYC [Lenat 90] define una “Ontología sobre modelos espaciales” que incluye dos aspectos:

- Objetos (categorías)
- Relaciones entre los objetos

Representaciones Espaciales

- El objeto básico de la representación espacial de CYC es el “punto”; el cual puede ser descrito por su posición (x, y, z) respecto a un sistema de coordenadas de referencia.
- Un conjunto de puntos, descritos por ecuaciones o restricciones, describen un objeto en el espacio.
- Hay dos tipos básicos de relaciones espaciales en CYC:
 - ① Relaciones espaciales: Relaciones espaciales básicas, análogas a las temporales, como – abajo, encima, a la izquierda, a la derecha, etc.
 - ② Relaciones espacio-temporales: Se refieren a los cambios en relaciones espaciales respecto al tiempo, como – conectados fuertemente y conectados libremente (tiene que ver con los concepto de sólido, líquido, etc.).

Lógica

Reglas de
ProducciónModelos
CualitativosRepresenta.
RelacionalesTemporales
CausalesEspaciales
Funcionales

Representaciones Espaciales

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- Un problema es que se tiene una explosión de relaciones, en particular si las combinamos.
- Se puede minimizar, si se restringe el número de combinaciones o si considera una sola dimensión.

Representaciones Espaciales

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales
Causales

Espaciales
Funcionales

CYC considera 4 formas de utilizar el conocimiento espacial:

- 1 Predicción: Predecir el comportamiento de un dispositivo.
- 2 Diagnóstico: Determinar la estructura del objeto con base en el comportamiento observado.
- 3 Manufactura: Sintetizar una secuencia que produzca cierto objeto.
- 4 Diseño: Sintetizar un objeto (forma) que produzca cierto comportamiento.

Representaciones Espaciales

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales
Causales

Espaciales
Funcionales

Se pueden considerar una serie de abstracciones o simplificaciones como el restringirse a objetos sólidos, el considerar ciertas formas regulares y su composición, etc.

Representaciones Funcionales

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales

Causales

Espaciales

Funcionales

- La representación de funcionalidad se refiere a representar la forma en que un dispositivo *funciona*; es decir, los mecanismos o secuencia de eventos que hacen que el objeto realice cierta función.
- Esto es en contraste con la *estructura* del objeto, que tiene que ver más bien con su representación espacial.
- Un enfoque para representar funcionalidad o comportamiento consiste en describir los mecanismos causales que producen dicho comportamiento [Iwasaki 94]. Este conocimiento se puede utilizar de diversas formas

Representaciones Funcionales

Lógica

Reglas de
Producción

Modelos
Cualitativos

Representa.
Relacionales

Temporales
Causales

Espaciales
Funcionales

- **Formulación:** Transformar ciertos requerimientos a un comportamiento esperado
- **Síntesis:** Transformar el comportamiento a una estructura
- **Análisis:** Obtener el comportamiento de la estructura
- **Evaluación:** Comparar el comportamiento actual con el predicho

El aspecto de funcionalidad está muy relacionado con los aspectos temporales, causales y espaciales; así como las representaciones basadas en modelos.