

MODELIZACION DEL RAZONAMIENTO INCOMPLETO EN LOS SERES HUMANOS CON TECNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL (*)

Asunción Gómez-Pérez, Juan Pazos Sierra

Departamento de Inteligencia Artificial de la Facultad de Informática (UPM).

1. INTRODUCCION

Una de las características más poderosas de la inteligencia humana consiste en extraer conclusiones correctas a partir del conocimiento incierto, y en especial incompleto, que, de la realidad, posee el ser humano. Dado que la incertidumbre, en sentido genérico, es parte integrante de la realidad, parece deseable, e incluso necesario, introducir este tipo de conocimiento y razonar con él en los modelos y técnicas de Inteligencia Artificial (IA), en vez de ignorar su existencia [Zimmermann, 92]. Si las conclusiones extraídas por los sistemas construidos sobre dichos modelos y, o, técnicas se asemejan a las proporcionadas por un ser humano inteligente, se puede decir que el sistema construido es inteligente, y, por consiguiente, no es aventurado afirmar que la(s) técnica(s) de IA utilizada(s) son adecuadas para modelar y razonar con el conocimiento incierto en general y, en particular, con el conocimiento incompleto que de la realidad poseen los seres humanos.

La presencia de conocimiento incierto en un determinado dominio puede ser un estorbo para la resolución de problemas en ciertas circunstancias por parte de seres humanos. Como ejemplo, considérese el juego de entretenimiento siguiente: Una persona se levanta y pide a los demás que actúen como detectives y resuelvan un “problema de misterio”. El problema, muy conocido, podría ser: “Martín y Sara yacen muertos en medio de una sala de estar rodeados de cristales rotos y agua. La ventana está abierta. ¿Quién los mató?”. Se permite que los “detectives” hagan preguntas a las que el narrador sólo puede responder “sí” o “no”. El diálogo que se da a continuación podría muy bien ser un ejemplo válido de esa investigación:

Detective 1: “¿Les apuñalaron?”.

Narrador: “No”.

Detective 2: “¿Les envenenaron?”.

Narrador: “No”.

Detective 3: “¿Tuvieron una pelea?”.

Narrador: “No”.

Detective 2: “¿Dijo que estaban rodeados de cristales rotos y agua?”.

(*) Conferencia pronunciada el 23 de noviembre de 1993

Narrador: “Sí”.

Detective 1: “¿Les ahogaron?”.

Narrador: “No”.

Detective 3: “¿Qué edad tienen Martín y Sara?”.

Narrador: “Sólo puede hacer preguntas cuya respuesta sea si o no”.

Detective 3: “¿Martín y Sara tenían alrededor de 20 años?”.

Narrador: “No”.

Detective 2: “¿Martín y Sara tenían entre 10 y 20 años?”.

Narrador: “No”.

Detective 1: “¿Martín y Sara tenían menos de un año de edad?”.

Narrador: “Sí”.

Tal diálogo podría continuar hasta que uno de los “detectives” dejara de emplear la suposición, por omisión, de que “Martín” y “Sara” son personas. El agua y los cristales podrían indicar el hecho de que “Martín” y “Sara” son pececillos de color y que el “asesino” fue un gato regordete que entró y salió por la ventana.

Cuando se ha practicado tal juego, se pueden resolver rápidamente otras variaciones de éste. Por ejemplo, “hay una historia acerca de Pepe que vive en el piso doce de un bloque de pisos. Cada mañana coge el ascensor en el piso doce y lo deja siempre en la planta baja. Cada tarde coge el ascensor en el primer piso, pero lo deja en el piso doce únicamente si hay otras personas en el ascensor. Si está solo en el ascensor, sale siempre en el piso ocho y sube cuatro tramos de escaleras hasta el piso doce”. Si no se hace la suposición de que Pepe es una persona adulta, entonces se podría determinar rápidamente que es un niño demasiado pequeño para alcanzar un botón más alto que el del piso ocho.

Algunas personas piensan que muchos problemas difíciles pueden ser resueltos solamente si se evita que valores por omisión bloqueen los pensamientos humanos. Las mesas redondas en las cuales se sugieren las soluciones más atrevidas a los problemas, y el pensamiento marginal en el cual se toman las alternativas menos probables, son intentos de poner este principio en práctica. La técnica del “brainstorming” o tormenta de ideas, creada por el padre de la Investigación Operativa, el premio Nóbel Blackett se fundamenta también en esa presunción. Parece que tiene sentido la intuición de que problemas muy difíciles que lo siguen siendo se resolverían si las personas los abordaran desde un punto de vista nuevo, cuestionando todas las suposiciones por defecto que han sido hechas por otras personas que han intentado solucionarlas en el pasado.

2. DEFINICIONES

Se dice que un hecho o proposición es incierto cuando es verdadero o falso, pero no se conoce su valor de verdad. Por ejemplo, el número de personas que construyeron la

muralla china fue uno determinado, pero, por falta de datos históricos, no es posible determinarlo. La incertidumbre puede ser estructural o coyuntural [Borrajo et al., 93].

La *incertidumbre estructural*, también llamada intrínseca, se supone imposible de eliminar y va asociada a los sistemas formales y dominios físicos. El principio de indeterminación de Heisenberg y el Teorema de Gödel [Gödel, 87] son los dos casos más importantes o representativos de este tipo de incertidumbre. El primero pone en relación la imprecisión con la incompletud. El segundo relaciona la imprecisión y la inconsistencia.

El segundo tipo de incertidumbre, *incertidumbre coyuntural* o extrínseca, afecta a la vida cotidiana y se palía añadiendo más información al sistema. Klir y Folger [Klir et al., 88] definen la incertidumbre en términos de vaguedad y ambigüedad. Para los autores, la vaguedad, también expresada mediante los términos: difuso, confuso, turbio y oscuro, se refiere a la dificultad de realizar distinciones precisas en el dominio, es decir, a delimitar perfectamente el dominio. Por otro lado, la ambigüedad, o no especificidad, variedad, generalidad, diversidad o divergencia, se produce en situaciones en las que la elección entre una o varias alternativas está sin especificar.

Para Borrajo y colegas [Borrajo et al., 93] y González y Dankel [González et al., 93] este tipo de incertidumbre surge porque los datos sobre los que se basa el sistema son inciertos en sí mismos o porque los datos que se derivan al realizar inferencias no son completamente fiables. González y Dankel [González et al., 93] enumeran los problemas que originan datos inciertos, incertidumbre ocasionada por:

- * Pérdida de datos o por no estar estos disponibles.
- * Aún estando disponibles, pueden ser ambiguos o nada seguros debido a medidas erróneas, medidas conflictivas o ambas.
- * La representación de los datos en la computadora puede ser imprecisa o inconsistente.
- * Los datos pueden ser supuestos.
- * Los datos se basan en valores por omisión y estos presentan excepciones.

La incertidumbre coyuntural ocasiona el problema de la cuádruple I [Borrajo et al., 93], es decir, el conocimiento es incierto “per se”, o por ser: incompleto, y, o, impreciso, y, o, inconsistente.

Incompletud

Se produce al no observar o capturar todo el conocimiento del dominio, al no efectuar todas las inferencias potenciales con el conocimiento que se posee, y, o, al considerar las teorías del dominio como aproximaciones a la realidad. Ello obliga a introducir en los sistemas suposiciones que asocian respuestas por

omisión a los hechos, asumiendo dichas suposiciones ciertas a menos que exista evidencia suficiente que indique lo contrario. Por ejemplo, la mayoría de los ratones tienen cuatro patas, a excepción de Mickey Mouse que tiene dos. El uso de este conocimiento está justificado por la razón siguiente: si hay conocimiento de lo contrario y éste es significativo, entonces es probable que se de ese conocimiento. Así, si el número de patas que tiene un ratón es relevante para la aplicación, entonces se esperará que la BC contenga conocimiento de ratones que tienen tres, dos, una o cero patas. En este caso, si no se dispone de este tipo de conocimiento, entonces, el valor cuatro sería correcto en la mayoría de los casos. Sin embargo, si el número de patas de un ratón es irrelevante en la aplicación, entonces, la BC no almacenará conocimiento de ratones que tengan tres, dos, una o cero patas. Entonces, el valor por defecto cuatro, puede ser incorrecto en múltiples casos, pero, dado que para la aplicación el número de patas es irrelevante, las suposiciones por omisión realizadas incorrectamente no son importantes.

Inconsistencia

Se debe al manejo de la incompletud y aparece en el sistema cuando se realizan omisiones que originan contradicciones, cuando aún existiendo éstas en el sistema se ignoran, o cuando se introduce en el sistema información procedente de fuentes diversas y contradictorias. Ello obliga a introducir dependencias entre los hechos que permiten restablecer la consistencia o a razonar desde varios puntos de vista o contextos.

Imprecisión

Se produce cuando los valores de las variables no se definen con exactitud. En general, expresiones que se utilizan para cuantificar tamaños o cantidades de forma cualitativa como: “la mayoría”, “alguna”, “en ocasiones”, etc., introducen imprecisión en el sistema. El tratamiento de estos conceptos pasa por el uso de técnicas borrosas.

3. TECNICAS

En las dos últimas décadas, se han realizado esfuerzos importantes en la modelización del razonamiento de los seres humanos en modelos y teorías que reflejan la forma de pensar que éstos tienen cuando el conocimiento del dominio presenta incertidumbre coyuntural. Pionero en este área fue Zadeh, quién, en 1965, propuso la teoría de los conjuntos borrosos. Desde entonces, gran cantidad de técnicas “ad hoc” se han desarrollado para resolver problemas concretos. Así, existen medidas de información, que también son medidas de incertidumbre, que se utilizan para medir la cantidad de

información potencial que aporta una determinada situación. Aumentar la cantidad de información asociada a una situación implica reducir la incertidumbre asociada a ella. Ejemplos de medidas de información son: la Medida de Información de Hartley [Hartley, 28], la Entropía de Shannon [Shannon, 48], la U incertidumbre de Higashi y Klir [Higashi et al., 83], la Disonancia en Evidencia de Yager [Yager, 83], la Confusión en Evidencia de Höhle [Höhle, 81], [Höhle, 82], la No especificidad en Evidencia de Dubois y Prade [Dubois et al., 85] y las medidas de Borrosidad desarrolladas durante la década de los setenta y demostradas por Knopfmacher [Knopfmacher, 75] y Loo [Loo, 77]. Klir y Folger [Klir et al., 88] muestran la evolución de las diferentes medidas y exponen detalladamente cada una de ellas.

4. LA INCERTIDUMBRE EN LOS SISTEMAS INTELIGENTES

En los sistemas expertos y en general en los sistemas basados en el conocimiento, la gestión de la incertidumbre es especialmente importante. En ellos, la Base de Conocimientos (BC) del sistema es un Modelo Interno de la realidad, es decir, la BC es un sustituto [Davis et al., 93] de la realidad en la computadora, y, por consiguiente, es siempre inexacta e imperfecta. El conocimiento de la realidad o mundo externo que no se ha introducido en el modelo interno o BC del sistema origina incompletud en los datos en ella almacenados y, por consiguiente, incertidumbre en los resultados al aplicar técnicas de inferencia.

Evidentemente, dado que todas las técnicas de representación del conocimiento son imperfectas y dado que no se puede capturar en una estructura finita todo lo que se conoce de una realidad concreta, se debe elegir, como técnica de representación, aquella que mejor permita expresar el conocimiento del mundo externo y así se minimicen las pérdidas de conocimiento que se producen al formalizar la realidad en bases de conocimientos [Gómez-Pérez, 93 (b)]. Una de las clasificaciones que ayuda a seleccionar un formalismo de representación se basa en determinar si se desean representar conceptos, relaciones o acciones.

1. Los formalismos basados en conceptos representan las principales entidades del dominio, sus propiedades, y los posibles valores que puede tomar cada propiedad. Los principales formalismos son: Objeto-Atributo-Valor y Marcos [Minsky, 75].
2. Los formalismos basados en relaciones focalizan su atención en las relaciones que aparecen entre los conceptos o entidades del dominio. Los más importantes son: la Lógica, las Redes Semánticas [Quillian, 68] y la Teoría de la Dependencia Conceptual [Schank, 72].

3. Los formalismos basados en acciones describen el conocimiento del dominio como un conjunto de acciones básicas. Se expresan mediante Reglas de Producción y Guiones [Schank et al., 77].

Dado que actualmente no existe un formalismo que reúna todas las características deseables expuestas por David [David et al., 93] y por Rich [Rich et al., 91], se debe seleccionar el formalismo que más se adecue al conocimiento del dominio. El acercamiento del formalismo al dominio, aunque no garantiza BC completas, sí crea modelos formalizados cercanos a la realidad y, si estos se implementan con el paradigma adecuado, modelos internos cercanos al modelo formal.

En definitiva, la clave de la representación del conocimiento se encuentra en construir modelos internos cercanos al mundo externo. Si esto se consigue, las respuestas y el comportamiento del sistema inteligente serán lo más parecidos posible a las respuestas que se producen en la realidad y las interacciones entre ambos mundos se realizarían de manera más natural.

5. LOS MARCOS Y EL CONOCIMIENTO INCOMPLETO

En los últimos años, el formalismo de Marcos se ha convertido en el paradigma más utilizado en la representación del conocimiento, si el conocimiento del dominio está organizado en base a conceptos y, la orientación a objetos como el paradigma que mejor implementa las estructuras taxonómicas de representación del conocimiento [Woods, 91]. Minsky [Minsky, 75] definió los marcos como una estructura de datos que representa situaciones estereotipadas en la que se integra el conocimiento declarativo y procedimental del dominio. Básicamente, existen dos tipos de Marcos [Reichgelt, 91], [Rich et al., 91], [Winston, 92]: Marcos Clase y Marcos Instancias. Los Marcos Clase representan conceptos, clases y situaciones y, los Marcos Instancias son entidades o elementos concretos de la clase representado por un Marco Clase. Ambos, Marcos Clase y Marcos Instancias están unidos en la BC mediante relaciones, formando una taxonomía o jerarquía de conceptos. Las relaciones más utilizadas en la taxonomía son la relación Subclase, que une un Marco Clase con su superclase representada por otro Marco Clase, y la relación Instancia, que une un elemento o Marco Instanciado con su Marco Clase.

Una clasificación [Gómez-Pérez, 93 (a)] de las relaciones distingue relaciones estándares y relaciones no estándares, según permitan aplicar, o no, la herencia de propiedades. Las primeras incluyen a las relaciones Subclase e Instancia, y, las segundas, a las relaciones Fraternal, Disjunto, No Disjunto, Compuesto de, y todas aquellas que defina “ad hoc” el usuario.

El concepto o clase que el marco representa se describe utilizando un conjunto de atributos. Los atributos pueden describir propiedades de la clase como tal o propiedades de

las instancias, recibiendo el nombre de propiedades de clase o de instancia respectivamente. La distribución de las propiedades en los Sistemas Basados en Marcos (SBM) debe favorecer que unos Marcos compartan propiedades con otros Marcos, evitando la presencia de conocimiento redundante en la jerarquía.

Ambos, atributos y relaciones, reciben en el marco el nombre de ranuras, en inglés "slots". Las ranuras de un marco se describen utilizando un conjunto de Facetas. Algunas de las más utilizadas son: Nexo, Tipo, Valor Permitido, Valor por Omisión, Si Necesito, Si Modifico, Si Borro y Si Añado.

Gráficamente, los marcos se representan en forma de tabla. Las filas de la tabla representan las ranuras, las columnas las facetas, y el cruce de una fila con una columna, el valor de la ranura en esa faceta, tal y como se ve en la figura 1.

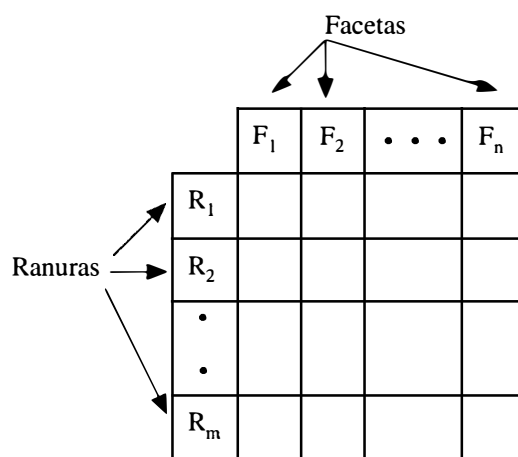


Figura 1. Representación gráfica de un marco genérico.

El formalismo de Marcos tiene asociado un conjunto de técnicas que permiten realizar importantes y poderosas inferencias con el conocimiento almacenado y distribuido en toda la taxonomía. Estas técnicas son: Equiparación [Frost, 86], [Reichgelt, 91], Herencia [Touretzky, 84] y Valores Activos [Barr et al., 82] y Métodos [Fikes et al., 85].

Sin embargo, el razonamiento con conocimiento incierto en un SBM es a medida. La incertidumbre se puede introducir en el SBM al construir la BC pues el IC construye BB.CC. incompletas al no introducir en la BC todo el conocimiento que de la realidad posee el experto. El motor de inferencia, al razonar con el conocimiento incompleto de la BC, produce conocimiento incierto.

Todo ello lleva a proponer nuevos elementos dentro del formalismo de Marcos que incrementan su expresividad sin complicar su notación, y disminuyen, por consiguiente, las pérdidas de conocimiento que se producen al formalizar la realidad en BB.CC. El concepto que se propone, concepto que captura conocimiento de la realidad que antes no se podía representar y que, sin embargo, sí poseía el experto, recibe el nombre de **representatividad**.

Se define la propiedad P como una **propiedad más representativa** que la propiedad Q en un marco clase si la propiedad P proporciona mayor información que la propiedad Q en la descripción del concepto que el marco clase representa. Por ejemplo, la propiedad *Número de Patas* definida en el marco *Perro* es más representativa que la propiedad *Nombre*, pero menos que la propiedad *Ladra*.

EL conjunto de características asociadas a este nuevo concepto son:

1. La representatividad de una propiedad la proporciona el experto al IC.
2. La representatividad es un criterio independiente al criterio de compartición de propiedades. Las propiedades almacenadas en el marco raíz de una jerarquía son compartidas por todos los marcos de niveles inferiores. Sin embargo, estas propiedades pueden ser muy representativas o poco representativas.
3. La representatividad de una propiedad depende del contexto en el que se construye el SBM y del uso que se va a hacer de la propiedad en el sistema.
4. La representatividad captura conocimiento de sentido común, evita pérdidas de conocimiento y establece un orden en las propiedades de cada marco clase.
5. Las propiedades representativas que toman el valor uno se utilizarán para especializar un marco clase en otros marcos clase.
6. La representatividad de una propiedad se utiliza para realizar inferencias. Concretamente, se utiliza en el proceso de equiparación.
7. La representatividad se cuantifica en una medida que toma valores en el intervalo $[0, 1]$ con el siguiente significado:
 - * Si la *Representatividad* de una propiedad toma el valor cero, entonces, la propiedad es meramente descriptiva en el marco en el que se ha definido y no discrimina entidades de la clase de las que no lo son.

- * Si la *Representatividad* de una propiedad toma cualquier valor comprendido entre cero y uno, entonces, la propiedad discrimina en el valor asignado a las instancias de la clase.
- * Si es uno, la propiedad recibe el nombre de **Propiedad Específica**. Conocida la presencia de una propiedad P en una entidad E, si esta propiedad es específica de un marco clase, entonces, la entidad se puede clasificar como una instancia de dicha clase. En cualquier marco clase se puede definir cualquier número de propiedades específicas. Ejemplos de propiedades específicas de los marcos *Perro* y *Gato* son, respectivamente, las propiedades *Ladra* y *Maula*.
- * Si el IC no introduce la *Representatividad* de algunas o de todas las propiedades, por omisión, la *Representatividad* de las propiedades no definidas toma el valor 0,2.

6. INFERENCIA EN MARCOS: EQUIPARACION

Conocidos los valores de un conjunto de propiedades que describen parcialmente una entidad E y sus certezas asociadas, la técnica de inferencia basada en equiparación tiene que encontrar el marco de la BC más consistente en su descripción con la descripción de la situación actual. Encontrado el/lo(s) marco(s) clase, la entidad se convierte en un marco instanciado de dicho(s) marco(s) clase. El problema es el siguiente, si los valores de todas las propiedades de una entidad E fueran conocidos y dichas propiedades se encontraran almacenadas en un único marco clase de la jerarquía, la equiparación de la entidad con el marco clase sería perfecta. Sin embargo, esta situación raramente ocurre debido a que:

1. El conocimiento se encuentra distribuido en el SBM por todos los marcos de la jerarquía.
2. No todas las propiedades de una entidad E son conocidas al empezar la equiparación.
3. Aún siendo conocidos los valores de algunas propiedades en una entidad E, se pueden tener distintos grados de seguridad sobre los valores que toman dichas propiedades en la entidad E.
4. No todas las propiedades aportan el mismo grado de conocimiento a la hora de realizar la equiparación.

La técnica de equiparación que se describe [Gómez-Pérez, 93 (b)] trabaja con el conocimiento incierto presente en el dominio. Esta técnica de equiparación, utiliza la

representatividad de las propiedades de los marcos clase, la certeza de los valores de las propiedades de las entidades y la herencia de propiedades para calcular el valor de equiparación de una entidad E con un marco clase. Este valor determina en qué medida los marcos clase seleccionados son consistentes con la descripción de la situación actual dada por la entidad. Los pasos que intervienen en el proceso de equiparación de una entidad E con un marco clase, se muestran gráficamente en la figura 2 y son:

1. Asignación del grado de certeza a las propiedades definidas en la entidad E.
2. Selección del conjunto de marcos clase candidatos con los que la entidad E se puede equiparar.
3. Para cada marco clase candidato, se calcula el Valor de Equiparación (VE) de la entidad en él.
4. Selección del o de los marco(s) clase equiparable(s).

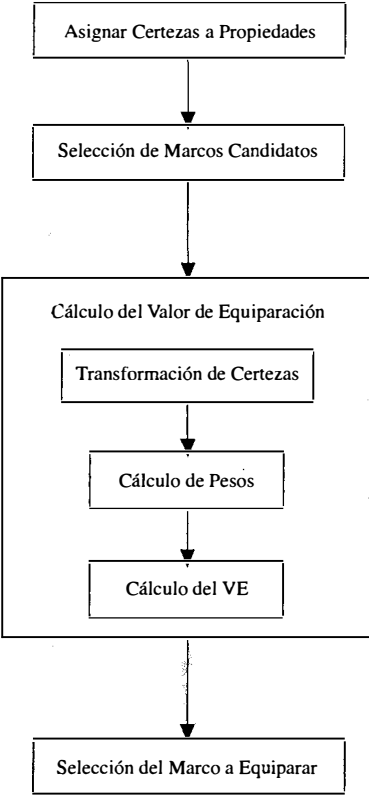


Figura 2. Pasos en el proceso de Equiparación

En la descripción de cada uno de ellos se ha tomado como BC la mostrada en la figura 3.

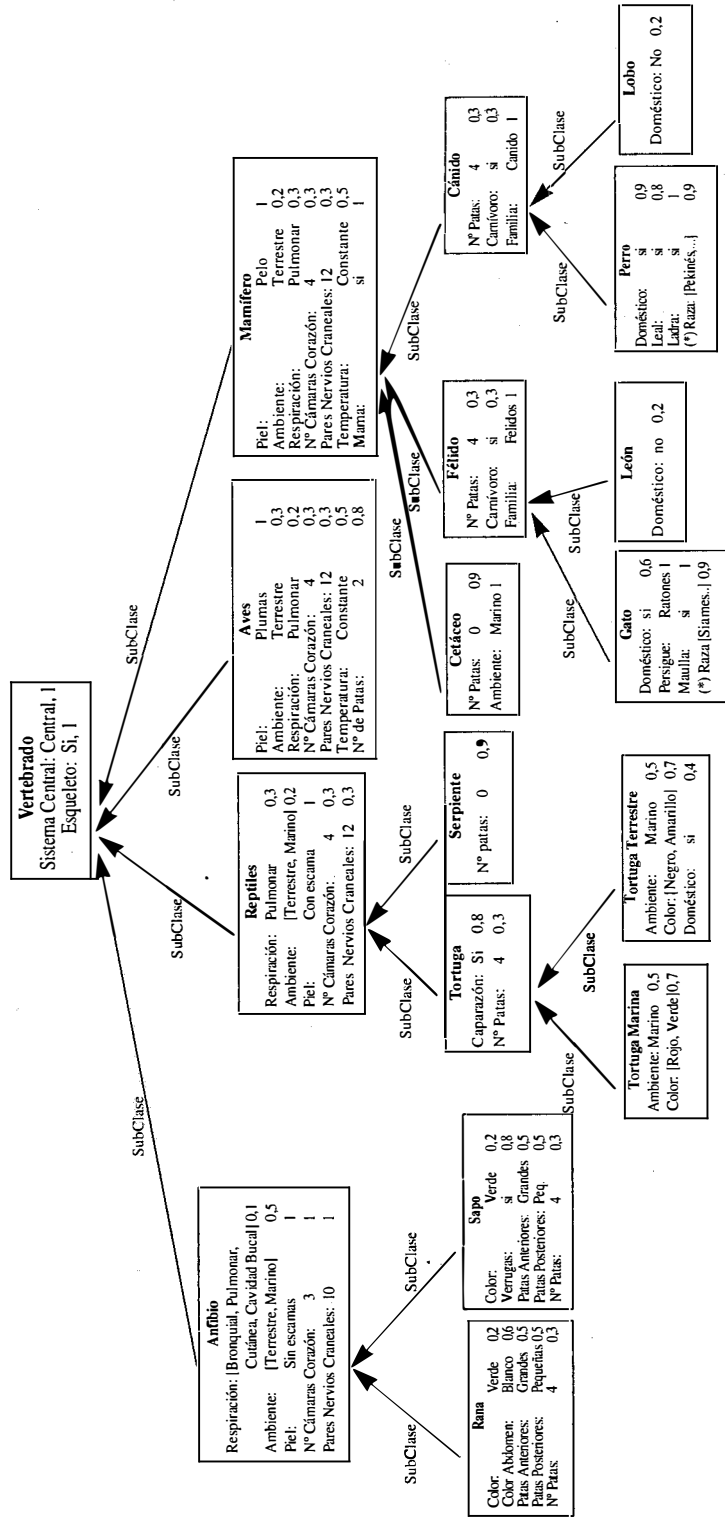


Figura 3. Jerarquía de Vertebrados

6.1. Asignación de Certezas a Propiedades

En el tratamiento del grado de certeza que presentan los valores de una propiedad P en una entidad se han hecho las siguientes suposiciones:

1. El grado de certeza c de una propiedad P en una entidad la proporciona, opcionalmente, el usuario del SBC nada más introducir los valores de la propiedad P en la entidad.
2. La certeza c es un número comprendido en el intervalo $[-1,1]$ que indica la seguridad con la que el usuario conoce el valor de una propiedad P en una entidad E. En la figura 4, se muestran los valores asignados a la certeza.

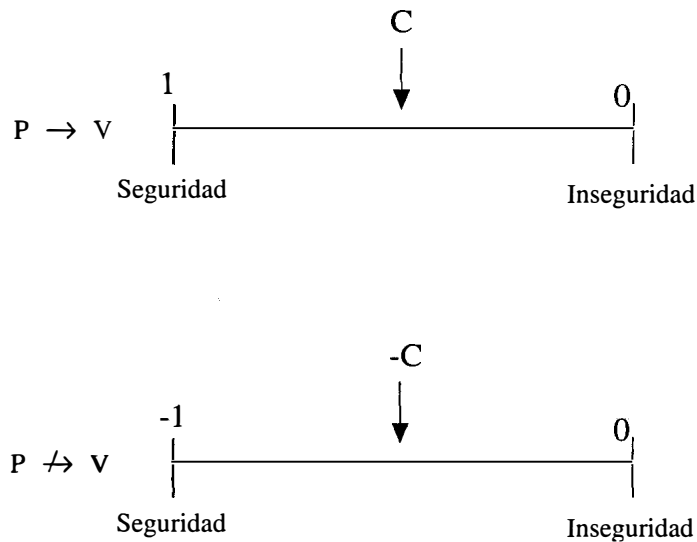


Figura 4. Significado de la Certeza.

En este trabajo el significado de esta medida es el siguiente:

- 2.1. Si la certeza toma el valor uno, el usuario tiene una seguridad absoluta en el valor V con el que se ha rellenado la propiedad P en la entidad E.
- 2.2. Si la certeza toma un valor comprendido en el intervalo abierto $(0,1)$, entonces, la certeza del valor V con el que se ha rellenado la propiedad P en la entidad es función de dicho valor.

- 2.3 Si la certeza toma el valor cero, entonces, el usuario no tiene ninguna seguridad, ni a favor ni en contra, en el valor V asignado a la propiedad P de la entidad E.
- 2.4 Si la certeza toma valores en el intervalo abierto (-1,0), entonces, se conoce con el valor de certeza asignado que la entidad E *no* posee el valor V en la propiedad P.
- 2.5 Si la certeza toma el valor -1, entonces, el usuario está totalmente seguro de que la entidad no posee el valor V en la propiedad P, pero no se conocen los valores que realmente toma dicha propiedad.
3. La precisión máxima permitida para la certeza *c* es de dos decimales.
4. El valor por omisión asociado a la certeza de los valores de cualquier propiedad P almacenada en una entidad E es 0,2. (1)

Por ejemplo, supóngase que el IC ha observado una entidad con las siguientes propiedades y grados de certeza:

E1	Valor	Certeza
Esqueleto	Sí	1
Mama	Sí	1
Respiración	Pulmonar	0,8
Nº Patas	4	1
Ambiente	Marino	-1
Raza	Pekinés	-0,5

El significado de los valores de certeza de las propiedades de la entidad E1 es el siguiente:

- * El usuario está totalmente seguro de que la propiedad *Esqueleto* toma el valor *sí*, que la propiedad *Mama* también, y que el *Nº de Patas* de la entidad es *cuatro*.
- * El usuario tiene seguridad alta sobre que la entidad tiene *Respiración pulmonar*.
- * El usuario está parcialmente seguro de que la propiedad *Raza* no toma el valor *Pekinés*, pero desconoce los valores que puede tomar la propiedad.

(1) Empíricamente se ha demostrado que asignando este valor por omisión a la certeza, los resultados obtenidos al final del proceso de equiparación se aproximan a las respuestas que daría un ser humano en las mismas circunstancias.

- * El usuario está totalmente seguro de que la entidad no vive en *Ambiente marino*.

6.2. Selección de Marcos Candidatos

La selección del conjunto de marcos clase candidatos con los que la entidad E se puede equiparar, se realiza buscando en la BC marcos clase en los que al menos se encuentre definida una propiedad conocida en la entidad. Aquellos marcos clase que no tengan como mínimo una propiedad común con la entidad, no son equiparables.

Por ejemplo, dada la BC de la figura 3, el conjunto de marcos clase equiparables con la entidad E1 serían todos: *Vertebrado, Anfibio, Reptiles, Aves, Mamíferos, Ranas, Sapos, Tortugas, Tortugas Terrestres, Tortugas Marinas, Serpiente, Cetáceo, Félidos, Cánidos, Gato y Perro*.

6.3. Cálculo del Valor de Equiparación

Realizada la selección del conjunto de marcos candidatos con los que la entidad E se puede equiparar, se pasa a calcular el valor de equiparación de la entidad E en cada uno de ellos. Antes de explicar la métrica utilizada por la técnica de equiparación se expone el significado del VE en este trabajo.

6.3.1. Definición del Valor de Equiparación

El VE es una métrica cuantitativa que determina en qué medida se puede afirmar que un marco clase es consistente con la descripción de la situación actual dada por la entidad E. El VE es un número comprendido en el intervalo $[-1, 1]$. El significado de esta medida es el siguiente:

1. Si el VE es cero o es negativo, se tiene una inconsistencia en la equiparación de la entidad E con el marco clase en cuestión. Bajo ningún concepto la entidad E se convierte en una instancia de dicha clase.
2. Si es uno, significa que la equiparación es perfecta, es decir, totalmente consistente. En este caso, el marco clase es uno de los marcos seleccionados en el proceso de equiparación y la entidad E puede convertirse en un marco instanciado de dicha clase.
3. Si está comprendido entre cero y uno, el grado de consistencia en la equiparación es directamente proporcional al valor de equiparación obtenido y la entidad E puede convertirse en un marco instanciado del marco clase con VE más alto.

6.3.2. Métrica del Valor de Equiparación

Para cada uno de los marcos candidatos seleccionados en el paso anterior, se calcula el VE de la entidad E en ellos. Supóngase un marco clase MC en el que se han definido un conjunto de propiedades con sus valores y representatividades asociados, como gráficamente se muestra en la figura 5.

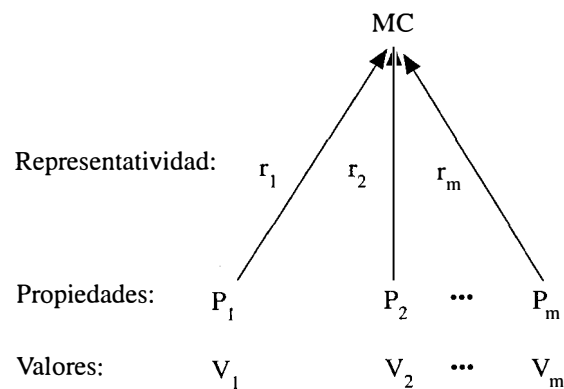


Figura 5. Propiedades, valores y representatividades en un marco clase.

Para cada marco clase se realizan las operaciones que a continuación se citan en el cálculo del VE.

- A) Transformar las certezas asociadas a una entidad E en certezas de la clase a equiparar.
- B) Para cada propiedad definida en el conjunto de marcos clase seleccionados, se calcula su *Peso*. Si la propiedad no se encuentra definida en el marco, aplicando herencia, se busca la propiedad en sus ascendientes. En caso de encontrarla, se adapta el peso al marco con el cual se intenta la equiparación.
- C) Para cada marco clase seleccionado se calcula el VE en función de los pesos anteriores.

A) Transformación de las Certezas

Se transforman las certezas asociadas a las propiedades de la entidad en certezas asociadas a las propiedades de la clase con la que se intenta equiparar. Se pueden dar tres casos que, abreviadamente, se representan en la figura 6.

1. La propiedad P toma el valor V con certeza positiva: $P \rightarrow V$

Si la certeza asociada al valor V de la propiedad P de la entidad E toma valores comprendidos en el intervalo $[0, 1]$, entonces, la asignación de certezas a la clase se realiza de acuerdo a las siguientes reglas:

- 1.1 Si el valor con el que se rellena la propiedad P en la entidad está incluido o es igual a el/los valor(es) permitido(s) o asignado(s) a la propiedad P en el marco clase, entonces, la certeza de los valores de la propiedad en el marco clase es la proporcionada por el usuario en la entidad o el valor asignado por omisión.

Al transformar el grado de certeza de la propiedad *Nº de Patas* de la entidad $E1$ en certezas de la propiedad *Nº de Patas* en la clase *Cánidos*, *Félidos*, *Rana*, *Sapo* y *Tortuga*, el valor que toma la certeza en las clases es el proporcionado por el usuario. En estos casos se rellenaría la certeza asociada a la propiedad *Nº de Patas* con el valor uno.

- 1.2 Si el valor asignado a la propiedad P en la entidad no está incluido o no es igual a el/los valor(es) permitido(s) o asignado(s) a la propiedad P en el marco clase, entonces, se tiene certeza en contra en la equiparación de la entidad como una instancia del marco clase. Por este motivo, la certeza de la propiedad P en la entidad, se convierte en una certeza negativa en la clase, tomando el valor $-c$ o el valor $-0,2$ si éste ha sido asignado por omisión.

Así, al intentar equiparar la entidad $E1$ con los marcos clase *Cetáceos* y *Serpiente*, la certeza que toman la propiedad *Nº de Patas* en dichos marcos es el valor negado de la certeza asignada por el usuario en la propiedad de la entidad. En este caso, para los marcos clase anteriormente mencionados la certeza de la propiedad *Nº de Patas* se rellenaría con el valor menos uno.

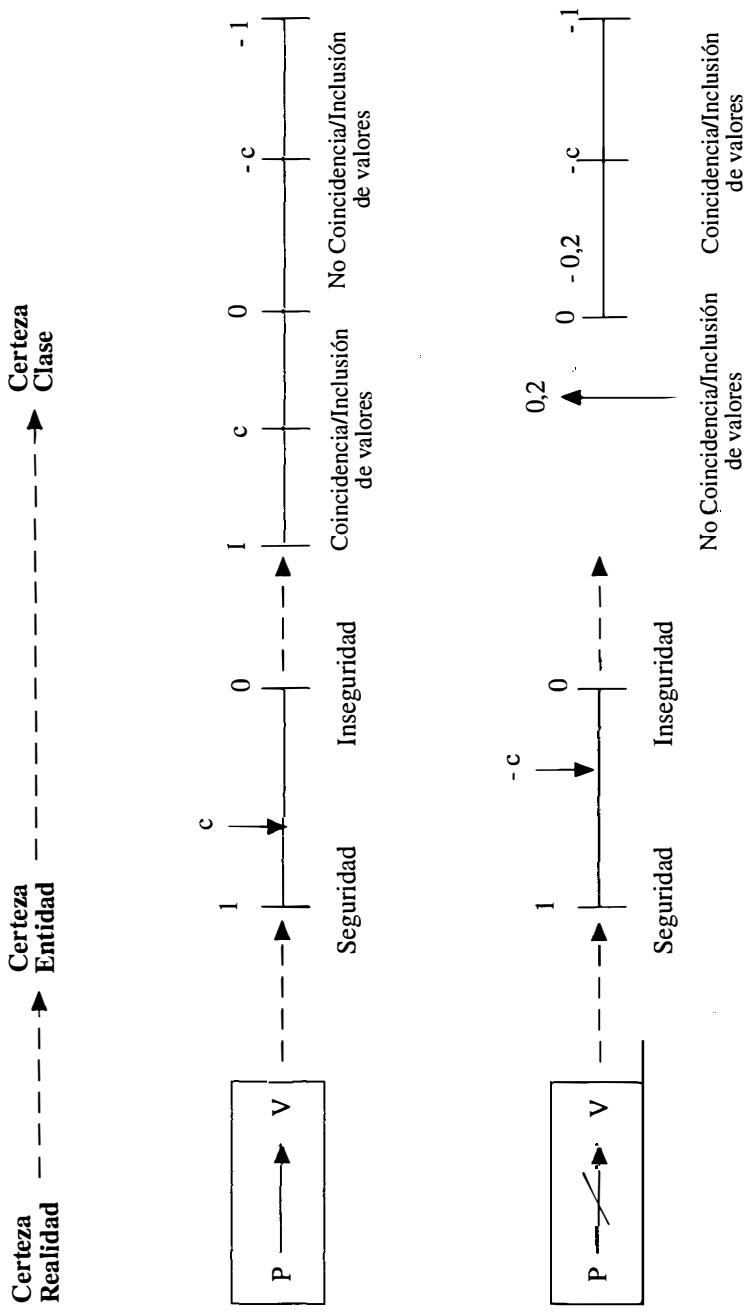


Figura 6. Transformación de Certezas

2. *La propiedad P toma el valor V con certeza negativa: $P \nrightarrow V$*

Si la certeza asociada al valor V en la propiedad P de la entidad E toma valores comprendidos en el intervalo $[-1, 0]$, entonces, se sabe, con una determinada certeza, que la propiedad P no toma el valor V en la entidad E, pero se desconocen los valores que realmente puede tomar esta propiedad y que tendrían asignado una certeza positiva. La transformación de la certeza de la entidad en certeza de la clase se realiza de acuerdo a las siguientes reglas.

- 2.1 Si los valores de la propiedad en la entidad coinciden, o están incluidos en los valores de la propiedad de la clase, entonces, se mantiene la certeza negativa, pues se sabe explícitamente, por el valor negativo de la certeza, que la propiedad no aporta información positiva a favor de la equiparación de la entidad con la clase.

Por ejemplo, si se sabe con seguridad media que la *Raza de* una entidad E *no es Pekinés*, entonces, al intentar la equiparación de la entidad E con el marco *Perro*, el valor de certeza negativo se mantiene pues se conoce parcialmente que esta entidad no es un *Perro*.

- 2.2 Si los valores de la propiedad de la entidad no coinciden, o no están incluidos en los valores de la propiedad de la clase, entonces, no se conoce en qué medida la entidad pertenece o no a la clase. Por ello, se asigna el valor por omisión a la certeza de la propiedad en la clase al desconocerse los valores que toma la propiedad y la certeza asignada a dichos valores.

Sin embargo, al intentar equiparar la entidad anterior con el marco clase: *Gato, Lobo, León, o Tortuga Terrestre*, el sistema no es capaz de discriminar si la entidad pertenece o no a estas clases, pues el único dato que tiene el sistema es que la entidad no es un *Perro*. Por este motivo, se asigna a la certeza de la propiedad *Raza* de los marcos anteriormente mencionados el valor por omisión.

3. *La Propiedad P es desconocida en la entidad*

El resto de las propiedades desconocidas en la entidad, pero definidas en el marco clase tendrán certeza cero en la clase, pues no influyen ni a favor ni en contra en la equiparación de la entidad con la clase.

Supóngase la entidad E1 anterior y la BC de *Vertebrados* de la figura 3. La tabla 1, muestra cómo la técnica de Equiparación transforma la certeza de cada propiedad en certeza de la propiedad en cada una de las clases con las que la entidad E1 se puede equiparar según los criterios establecidos en esta sección.

Entidad				
	Propiedad	Valor	Certeza	
	Esqueleto:	Sí	1	
	Mama:	Sí	1	
	Respiración:	Pulmonar	0,8	
	Nº de Patas:	4	1	
	Ambiente:	Marino	- 1	
	Raza:	Pekinés	- 0,5	
Marco Clase	Propiedad:	Valor	Certeza	Criterio
Vertebrado	Esqueleto:	Sí	1	P→V
Anfibio	Respiración:	Pulmonar Bronquial, Cutánea Pulmonar	0,8	P→V
	Ambiente:	Marino, Terrestre	- 1	P↔V
Reptil	Respiración:	Pulmonar	0,8	P→V
	Ambiente:	Marino, Terrestre	- 1	P↔V
Ave	Respiración:	Pulmonar	0,8	P→V
	Ambiente:	Terrestre	0,2	P↔V
	Nº de Patas:	2	- 1	P→V
Mamífero	Mama:	Sí	1	P→V
	Respiración:	Pulmonar	0,8	P→V
	Ambiente:	Terrestre	0,2	P↔V
Rana	Nº de Patas:	4	1	P→V
Sapo	Nº de Patas:	4	1	P→V
Tortuga	Nº de Patas:	4	1	P→V
Tortuga Terrestre	Ambiente:	Terrestre	0,2	P↔V
Tortuga Marina	Ambiente:	Marino	- 1	P↔V
Serpiente	Nº de Patas:	0	- 1	P→V
Cetáceo	Nº de Patas:	0	- 1	P→V
	Ambiente:	Marino	- 1	P↔V
Félido	Nº de Patas:	4	1	P→V
Cánido	Nº de Patas:	4	1	P→V
Gato	Raza:	[Siamés, ...]	0,2	P↔V
Perro	Raza:	[Pekinés, ...]	- 0,5	P↔V

Tabla 1. Transformación de las Certezas de la Entidad en la Clase

B) El Peso de una Propiedad: Certeza y Representatividad

Convertida la certeza de una propiedad P de una entidad E en una certeza a favor o en contra en el marco clase con el que se intenta equiparar, y conocida la representatividad de la propiedad P en dicho marco, es el momento de combinar la certeza con la representatividad para calcular el *Peso* que tendría la propiedad P en la equiparación de la entidad con el marco clase.

Básicamente, en la técnica que se propone, se pueden dar dos situaciones en el cálculo del peso de las propiedades conocidas en la entidad E en el marco Clase:

1. Si la propiedad P, se encuentra definida en el marco clase con el que se intenta la equiparación, entonces, se calcula el peso de la propiedad P en dicho marco como:

$$\text{Peso}_P = \text{Certeza}_P * \text{Representatividad}_P \quad (1)$$

2. Si la propiedad P, no se encuentra definida en el marco clase MC₁ con el que se intenta la equiparación, entonces, si dicha propiedad se encuentra en el marco clase MC₂, marco accesible desde el marco clase MC₁ aplicando herencia, se calcula el peso de la propiedad P en el marco MC₁ de acuerdo a las siguientes reglas:

- 2.1) Si la certeza de la propiedad P en la nueva clase MC₂ es positiva, el peso de la propiedad en el marco MC₁ se calcula como:

$$\text{Peso}_P = \frac{(\text{Certeza}_P * \text{Representatividad}_P)}{\text{número de arcos} + 1} \quad (2)$$

Se introduce el factor corrector (N° de arcos +1) porque propiedades muy representativas en marcos clase van perdiendo representatividad a medida que la clase se especializa en otros marcos clase. Por ejemplo, en la BC de la figura 3, la propiedad *Esqueleto* es una propiedad específica, es decir, altamente representativa, de la clase *Vertebrado*. Sin embargo, esta propiedad apenas es representativa si se define en los marcos: *Perro, Gato, Rana, Sapo*, etc., pues no se podría utilizar para discriminar individuos que pertenecen a una clase u otra. Es decir, la representatividad de una propiedad en un marco clase, se va perdiendo o difuminando en la jerarquía a medida que dicha clase se va especializando en otras clases. No obstante, aunque el peso obtenido sea mínimo, siempre aportará alguna información al valor de equiparación de la entidad en la clase.

- 2.2) Si la certeza de la propiedad en la nueva clase MC_2 es negativa, entonces, el peso de la propiedad en el marco clase MC_1 se calcularía como:

$$Pesop = Certeza_P * Representatividad_P \quad (3)$$

En este caso, $Pesop$ toma valores en el intervalo $[-1, 0]$ y no es necesario aplicar ningún factor corrector porque si éste se aplicara, se estaría aumentando el peso de la propiedad P al aproximar éste al valor cero.

Dado que $Pesop$ toma valores en el intervalo cerrado $[-1, 1]$, el significado de este parámetro en este trabajo es el siguiente:

1. Si el peso de la propiedad P en el marco clase es uno, entonces, se sabe que los valores almacenados en la propiedad P de la entidad coinciden con los valores de dicha propiedad en la clase y, que la propiedad P es una propiedad específica de la clase. Por ello, la compatibilidad de la propiedad de la entidad E con la propiedad específica de la clase es máxima. Por ejemplo, si se conoce que una entidad E vive en *Ambiente marino* con certeza 1, entonces, la compatibilidad de esta propiedad en la entidad con la propiedad del marco clase *Cetáceo* es absoluta.
2. Si el peso de la propiedad P en el marco clase es -1, entonces, se sabe que los valores almacenados en la propiedad P de la entidad no coinciden con los valores de la propiedad en la clase y, además, la propiedad P es una propiedad específica de la clase. También, puede suceder que se sepa explícitamente que una entidad no posee una propiedad específica de una clase.

Por ejemplo, si se conoce que una entidad vive en *Ambiente Terrestre* con certeza 1, entonces, esta propiedad en la entidad E es totalmente incompatible con la propiedad definida en el marco clase *Cetáceo*, o si se sabe que una entidad *no* tiene *esqueleto*, entonces, se sabe con total seguridad que la entidad no pertenece a la clase *Vertebrado*.
3. Si el peso de la propiedad P en el marco clase es cero, entonces, la propiedad P no influye en el proceso de equiparación de la entidad con el marco clase en cuestión.
4. Si el peso de la propiedad P en el marco clase pertenece al intervalo abierto $(0, 1)$, entonces la propiedad influye positivamente en el cálculo del valor de equiparación de la entidad con la clase.

5. Si el peso de la propiedad P en el marco clase está comprendido en el intervalo abierto $(-1, 0)$, entonces la propiedad P de la entidad influye negativamente en el cálculo del valor de equiparación de la entidad con la clase.

La tabla 2, muestra, para cada marco clase con el que se puede equiparar la entidad, el peso asociado a cada propiedad localizada en el marco u obtenida aplicando herencia (denotado por H) y el criterio con el cual se ha calculado. Se observa que este procedimiento propuesto trabaja con excepciones perfectamente y, por consiguiente, se puede utilizar en sistemas no monótonos. Por ejemplo, en la equiparación de la entidad con el marco *Tortuga Marina* y *Tortuga Terrestre* el peso asociado a la propiedad *ambiente* se calcula utilizando el valor local almacenado en estos marcos clase y no el valor heredado de la clase *Reptiles*. En la columna *Criterio* se indica la fórmula que se ha utilizado en el cálculo del Peso.

C) Cálculo del Valor de Equiparación

Habiendo calculado los pesos de cada una de las propiedades de cada marco clase, por fin, se procede a calcular el VE de la entidad E en cada marco clase. En este trabajo se utiliza en el cálculo del VE las fórmulas propuestas en MYCIN [Buchanan et al., 84].

Pueden darse tres situaciones:

1. Si los pesos p_i y p_j de las propiedades del marco clase son positivos la propagación se realiza utilizando la fórmula:

$$p_i + p_j - p_i * p_j$$

2. Si los pesos son negativos:

$$-(p_i + p_j - p_i * p_j)$$

3. Si uno es positivo y el otro es negativo:

$$\frac{p_i + p_j}{1 - \min \{ |p_i|, |p_j| \}}$$

El resultado final de combinar todos los pesos positivos entre sí, los negativos entre sí, y, por último, el peso positivo resultante con el peso negativo según las tres fórmulas anteriores, es el VE de la entidad con el marco clase.

La tabla 3, muestra los valores de equiparación obtenidos al equiparar la entidad en cada clase.

Abreviadamente, el proceso del cálculo del VE se ha mostrado en la figura 7. Conocida la certeza positiva o negativa de unos valores de unas propiedades en una entidad E, se transforman estas certezas de propiedades de la entidad en certezas de propiedades de la clase siguiendo las reglas de transformación expuestas en el apartado A. Posteriormente, para cada propiedad con certeza conocida y, para todas aquellas que son accesibles aplicando herencia desde el marco actual, se calcula el *Peso* de la propiedad según las fórmulas descritas en el apartado B. Por último, para cada marco candidato se calcula el VE según las fórmulas y descritas en el apartado C.

6.4 Decisión

Calculados los valores de equiparación de la entidad con los marcos clase seleccionados, es el momento de determinar a qué clase pertenece la entidad. Con este fin, se proponen las siguientes reglas, que irían seleccionando aquellos marcos con valor de equiparación más alto:

Regla 1. *Se Rechazan los Valores de Equiparación Negativos y con valor cero.*

Se rechazan los marcos clases que hayan obtenido un VE negativo. Un VE negativo informa de una inconsistencia en la equiparación de la entidad E con el/los marco(s) clase con los que se intenta la equiparación.

Regla 2. *Si existen uno o varios marcos clase con $VE = 1$, entonces, se rechazan todos los marcos que no sean especializaciones de ellos.*

Dado un conjunto de propiedades conocidas con total certeza en una entidad E, si estas propiedades son específicas (representatividad 1) de uno o varios marcos clase, se sabe que la equiparación de la entidad con la clase es totalmente consistente.

Regla 2.1 *Especificidad frente a Generalidad*

Dados varios marcos clase con $VE = 1$, se seleccionarán los marcos más específicos frente a los marcos más generales siempre que éste último se haya especializado en el primero.

Marco Clase	Propiedad	Valor	Certeza	Representatividad	Peso	Criterio
Vertebrado	Esqueleto:	Sí	1	1	1	(1)
Anfibio	Esqueleto: (H)	Sí	1	1	0,5	(2)
	Respiración:	Pulmonar, Bronquial, Cutánea, Cav. Bucal	0,8	0,1	0,08	(1)
	Ambiente:	Marino, Terrestre	-1	0,5	-0,5	(1)
Reptil	Esqueleto: (H)	Sí	1	1	0,5	(2)
	Respiración:	Pulmonar	0,8	0,3	0,24	(1)
	Ambiente:	Marino, Terrestre	-1	0,2	-0,2	(1)
Ave	Esqueleto: (H)	Sí	1	1	0,5	(2)
	Respiración:	Pulmonar	0,8	0,2	0,16	(1)
	Ambiente:	Terrestre	0,2	0,3	0,06	(1)
	Nº de Patas:	2	-1	0,8	-0,8	(1)
Mamífero	Esqueleto: (H)	Sí	1	1	0,5	(2)
	Mama:	Sí	1	1	1	(1)
	Respiración:	Pulmonar	0,8	0,3	0,24	(1)
	Ambiente:	Terrestre	0,2	0,2	0,04	(1)
Rana	Esqueleto: (H)	Sí	1	1	0,333	(2)
	Respiración: (H)	Pulmonar, Bronquial, Cutánea, Cav. Bucal	0,8	0,1	0,04	(2)
	Ambiente:	Marino, Terrestre	-1	0,5	-0,5	(3)
	Nº de Patas:	4	1	0,3	0,3	(1)
Sapo	Esqueleto: (H)	Sí	1	1	0,333	(2)
	Respiración: (H)	Pulmonar, Bronquial, Cutánea, Cav. Bucal	0,8	0,1	0,04	(2)
	Ambiente:	Marino, Terrestre	-1	0,5	-0,5	(3)
	Nº de Patas:	4	1	0,3	0,3	(1)
Tortuga	Esqueleto: (H)	Sí	1	1	0,333	(2)
	Respiración: (H)	Pulmonar	0,8	0,3	0,12	(2)
	Ambiente: (H)	Marino, Terrestre	-1	0,2	-0,2	(3)
	Nº de Patas:	4	1	0,3	0,3	(1)
Tortuga Terrestre	Esqueleto: (H)	Sí	1	1	0,25*	(2)*
	Respiración: (H)	Pulmonar	0,8	0,3	0,08	(2)
	Nº de Patas: (H)	4	1	0,3	0,15	(2)
	Ambiente:	Terrestre	0,2	0,5	0,1	(1)

Anfibio	Esqueleto: (H)	Sí	1	1	0,25	(2)
	Respiración:	Pulmonar	0,8	0,3	0,08	(2)
	N° de Patas: (H)	4	1	0,3	0,15	(2)
	Ambiente:	Marino	-1	0,5	-0,5	(1)
Serpiente	Esqueleto: (H)	Sí	1	1	0,333	(2)
	Respiración: (H)	Pulmonar	0,8	0,3	0,12	(2)
	Ambiente: (H)	Marino, Terrestre	-1	0,2	-0,2	(3)
	N° de Patas:	0	-1	0,9	-0,9	(1)
Cetáceo	Esqueleto: (H)	Sí	1	1	0,333	(2)
	Mama: (H)	Sí	1	1	0,5	(2)
	Respiración: (H)	Pulmonar	0,8	0,3	0,12	(2)
	N° de Patas:	0	-1	0,9	-0,9	(1)
	Ambiente:	Marino	-1	1	-1	(1)
Félido	Esqueleto: (H)	Sí	1	1	0,333	(2)
	Mama: (H)	Sí	1	1	0,5	(2)
	Respiración: (H)	Pulmonar	0,8	0,3	0,12	(2)
	Ambiente: (H)	Terrestre	0,2	0,2	0,04	(2)
	N° de Patas:	4	1	0,3	0,3	(1)
Cánido	Esqueleto: (H)	Sí	1	1	0,333	(2)
	Mama: (H)	Sí	1	1	0,5	(2)
	Respiración: (H)	Pulmonar	0,8	0,3	0,12	(2)
	Ambiente: (H)	Terrestre	0,2	0,2	0,04	(2)
	N° de Patas:	4	1	0,3	0,3	(1)
Gato	Esqueleto: (H)	Sí	1	1	0,25	(2)
	Mama: (H)	Sí	1	1	0,333	(2)
	Respiración: (H)	Pulmonar	0,8	0,3	0,08	(2)
	N° de Patas: (H)	4	1	0,3	0,15	(2)
	Ambiente: (H)	Terrestre	0,2	0,2	0,04	(2)
	Raza:	[Siamés, ...]	0,2	0,9	0,18	(1)
Perro	Esqueleto: (H)	Sí	1	1	0,25	(2)
	Mama: (H)	Sí	1	1	0,333	(2)
	Respiración: (H)	Pulmonar	0,8	0,3	0,08	(2)
	N° de Patas: (H)	4	1	0,3	0,15	(2)
	Ambiente: (H)	Terrestre	0,2	0,2	0,04	(2)
	Raza:	[Pekínés, ...]	-0,5	0,9	-0,45	(1)

Tabla 2. Cálculo de Pesos en cada Marco Clase

		Entidad		
		Propiedad	Valor	Certeza
		Esqueleto:	Sí	1
		Mama:	Sí	1
		Respiración:	Pulmonar	0,8
		Nº de Patas:	4	1
		Ambiente:	Marino	-1
		Raza:	Pekínés	-0,5
Marco Clase	Valor de Equiparación			
Vertebrado	1			
Anfibio	0,08			
Reptil	0,525			
Ave	-0,4934			
Mamífero	1			
Rana	0,1036			
Sapo	0,1036			
Tortuga	0,4863			
Tortuga Terrestre	0,4722			
Tortuga Marina	-0,1475			
Serpiente	-0,8637			
Cetáceo	-1			
Félido	0,8028			
Cánido	0,8028			
Gato	0,6921			
Perro	0,3173			

Tabla 3. Valores de Equiparación en cada clase.

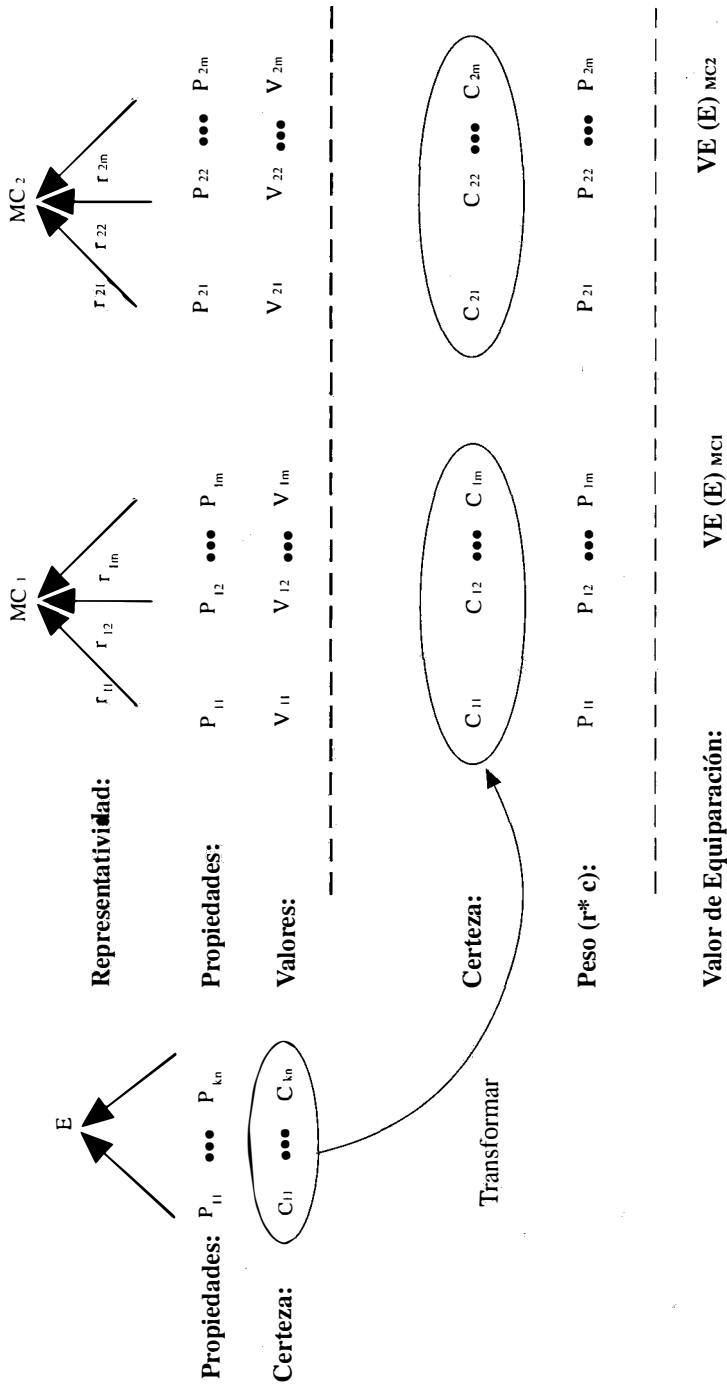


Figura 7. Cálculo del Valor de Equiparación

Regla 3. Marcos Disjuntos

La refacción disjunta definida entre dos marcos clase de la Base de Conocimientos se utiliza para acotar la clase a la cual pertenece la entidad. Dados dos marcos A y B, marcos disjuntos de una jerarquía:

Regla 3.1 $VE(E)_A = VE(E)_B$

Se rechazan ambos marcos clase, pues el error que se cometería al equiparar la entidad con ambos marcos clase sería el mismo.

Regla 3.2 $VE(E)_A - VE(E)_B > 0.2$

En este caso, se seleccionaría el marco clase A frente al B.

Regla 4. Especificidad frente a Generalidad

Dados dos marcos clase A y B tal que A está incluido en B, y sus VE de una entidad E en cada clase, pueden darse tres situaciones:

Regla 4.1 $VE(E)_A \geq VE(E)_B$

Se selecciona la clase A frente a la clase B. La equiparación de la entidad E con la clase A frente a la clase B, aporta más consistencia al ser la primera una clase más específica.

Regla 4.2 $VE(E)_B - VE(E)_A < 0.2$

Si la diferencia entre el VE en B y en A es menor que 0,2, entonces, se selecciona A frente a B. Pero, si supera este valor, entonces se selecciona B frente a A.

7. CONCLUSIONES

No es posible construir Sistemas Expertos sin el manejo de Incertidumbre, fundamentalmente si la originan datos incompletos. Mediante la modelización del razonamiento usando Marcos se puede tratar adecuadamente, no sólo como era tradicional la inconsistencia, sino como se acaba de ver la incompletud.

BIBLIOGRAFIA

- [Barr et al., 82] Barr, A., Feigenbaum, E.A. **The Handbook of Artificial Intelligence**. Vol. 1. Addison Wesley. Reading, MA, EE.UU. 1982.
- [Borrajo et al., 93] Borrajo, D.; Juristo, N.; Martínez, V.; Pazos, J. **Inteligencia Artificial. Métodos y Técnicas**. CEURA. Madrid. España. 1993.
- [Buchanan et al., 84] Buchanan. B.G.; Shortliffe, E.H. **Rule-Based Expert Systems: The MYCIN Experiments**. Addison-Wesley. Reading, MA, EE.UU. 1984.
- [Davis et al., 93] Davis, R; Shrobe, H.; Szolovits, P. *What is a Knowledge Representation?*. **AI Magazine**. Spring, 1993. pp:17-33.
- [Dubois et al., 85] Dubois, D.; Prade, H. *Towards Fuzzy Differential Calculus*. **Fuzzy Sets and Systems** N° 8. 1982. pp:1-17,105-16, 225-33.
- [Fikes et al., 85] Fikes, R.; Kehler, T. *The role of Frame-Based Representation in Reasoning*. **Communications of the ACM**. Vol. 28. N.º 9. Septiembre. 1985. pp: 904-20.
- [Frost, 86] Frost, R. **Introduction to Knowledge Base Systems**. McMillan. Nueva York. EE.UU. 1986.
- [Gödel, 87] Gödel, K. **Obras completas**. Alianza Editorial. Madrid. España. 1987.
- [Gómez-Pérez, 93 (a)] Gómez-Pérez, A. **Estudio de Técnicas de Representación del Conocimiento**. Tesis de Máster en Ingeniería del Conocimiento. Facultad de Informática. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. España. Mayo. 1993.
- [Gómez-Pérez, 93 (b)] Gómez-Pérez, A. **Modelo de Diseño Orientado a Marcos para Sistemas Basados en el Conocimiento**. Tesis Doctoral. Departamento de Inteligencia Artificial. Facultad de Informática. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. España. Diciembre 1993.
- [González et al., 93] González, A.J.; Dankel, D.D. **The Engineering of Knowledge-Based Systems. Theory and Practice**. Prentice Hall, Englewood Cliffs. NJ. EE.UU. 1993.

- [Hartley, 28] Hartley, R.V.L. **Transmission of Information**. The Bell Systems Technical Journal. 7. 1928. pp: 535-63.
- [Higashi et al., 83] Higashi, M.; Klir, G.J. *Measures of Uncertainty and Information based on possibility distributions*. **International Journal of General Systems**. 9. 1983. pp: 43-58.
- [Höhle, 81] Höhle, U. *Fuzzy Plausibility Measures*. En Klement, E.P. **Proc. Third International Seminar on Fuzzy Set Theory**. Johannes Kepler University, Linz, Austria. 1981. pp: 7-30.
- [Höhle, 82] Höhle, U. *Entropy with Respect to Plausibility Measures*. **Proc. Twelfth IEEE International Symp. on Multiple-Valued Logic**. Paris. 1982. pp: 167-69.
- [Klir et al., 88] Klir, G.J.; Folger, T.A. **Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information**. Prentice Hall. NJ. EE.UU. 1988.
- [Knopfmacher, 75] Knopfmacher, J. *On Measures of Fuzziness*. **J. Math. Analysis and Applications**. N.º 49. 1975. pp: 529-34
- [Loo, 77] Loo, S.G. *Measures of Fuzziness*. **Cybernetica**. N.º 20. 1977. pp: 201-10.
- [Minsky, 75] Minsky M.; *A Framework for Representating Knowledge*. En P. Winston. **The Psychology of Computer Vision**. McGraw-Hill. Nueva York, EE.UU. 1975.
- [Quillian, 68] Quillian, R. *Semantic Memory*, En M. Minsky. **Semantic Information Processing**. MIT Press, Cambridge, MA, EE.UU. 1968.
- [Reichgelt, 91] Reichgelt H.; **Knowledge Representation: An AI Perspective**; Ablex Publishing Corporation, Norwood. NJ, EE.UU. 1991.
- [Rich et al., 91] Rich E., Knight K.; **Artificial Intelligence**; McGraw-Hill: Nueva York, EE.UU. Segunda Edición. 1991.
- [Shannon, 48] Shannon, C.E. **The Mathematical Theory of Communication**. The Bell Systems Technical Journal. 24. 1948. pp: 379-423, 623-56.

- [Schank, 72] Schank R.; *Conceptual Dependency: a theory of Natural Language Understanding*. **Cognitive Psychology**, 3, 552-631. 1972.
- [Schank et al., 77] Schank R., Abelson R.; **Scripts, Plans, Goals and Understanding: An inquiry into human knowledge structures**. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates. 1977.
- [Touretzky, 84] Touretzky, D. S. **The Mathematics of Inheritance Systems**. CMU-CS-84-136. Department of Computer Science. Carnegie Mellon University. Pittsburgh, PA, EE.UU. 1984.
- [Winston, 92] Winston P.H. **Artificial Intelligence**. Addison Wesley. Reading, MA, EE.UU. 1992.
- [Woods, 91] Woods, W. A. *Important Issues in Knowledge Representation*. **Proceedings of the IEEE**. Vol. 74. N.º 10. Octubre 1991. pp: 146-58
- [Yager, 83] Yager, R.R. *Entropy and specificity in a mathematical theory of evidence*. **International Journal of General Systems**. 9. 1983. pp: 249-60.
- [Zimmermann, 92] Zimmermann H.J. *Preface*. En Zadeh, L.A.; Kacprzyk, J. **Fuzzy Logic for the Management of Uncertainty**. John Wiley & Sons, Inc. Nueva York. 1992.