

## **NACIMIENTO Y EVOLUCIÓN DE LA LÓGICA BORROSA, EL SOFT COMPUTING Y LA COMPUTACIÓN CON PALABRAS: UN PUNTO DE VISTA PERSONAL\***

Lotfi A. Zadeh

Universidad de California

Excelentísimo y Magnífico Señor Rector, Dignísimas Autoridades, queridos profesores, investigadores y estudiantes, Señoras y Señores:

Quiero, en primer lugar, agradecer a todas las personas de la Universidad de Oviedo la distinción que hoy voy a recibir. Mi agradecimiento especial al Rector, Profesor D. Santiago Gascón, al Vicerrector de Investigación, Profesor D. Lorenzo Pueyo, a los miembros de la Facultad de Ciencias y su Decano, Profesor D. Santos González, a los miembros del Departamento de Matemáticas y su Director, Profesor D. Benjamín Dugnot, al área de Estadística e Investigación Operativa de la que surgió la propuesta y, desde luego, a mi Padrino, el Profesor D. Pedro Gil.

Es para mí una gran honor estar hoy aquí recibiendo el Doctorado Honoris Causa. Esta distinción de Doctor Honoris Causa tiene un significado especial para mí. En primer lugar, porque España es un país en el que la Teoría de los Conjuntos Borrosos y los temas relacionados han sido bien aceptados por muchos matemáticos, científicos e ingenieros eminentes; y, en segundo lugar, porque España y los es-

pañoles siempre han ocupado un lugar muy entrañable en mi corazón. No se puede más que admirar la riqueza de la cultura española y sus tradiciones intelectuales. España ha dado y continúa dando hombres y mujeres que han contribuido y contribuyen de manera notable a las artes, la música, la literatura y la ciencia. Pero lo que más me conmueve es el calor y la generosidad de la gente española. En este mundo de turbulencia y conflicto de hoy en día, éstas son cualidades que se prodigan poco.

En mi discurso, me gustaría resumir mi visión sobre los acontecimientos que han determinado el nacimiento y evolución de la Lógica Borrosa y sus derivados conceptuales —el soft computing y la computación con palabras. Empezaré aclarando el significado de la lógica borrosa (FL), ya que hay muchas ideas equivocadas sobre lo que representa y cómo se relaciona con otras metodologías que, como la lógica borrosa, se ocupan de los problemas relativos a la imprecisión, la incertidumbre y el razonamiento aproximado.

El término lógica borrosa tiene dos significados diferentes. En el sentido más estricto, abreviadamente FLn, la lógica bo-

---

Correspondencia: Lotfi A. Zadeh  
Universidad de California  
Berkeley (EE.UU.)

---

\* Texto del discurso presentado para la recepción del Doctorado Honoris Causa por la Facultad de Ciencias de la Universidad de Oviedo, España (1-XII-1995)

rrosa constituye un sistema lógico que está dedicado a la formalización de modos de razonamiento que son aproximados y no exactos. En ese sentido la lógica borrosa es una extensión de los sistemas lógicos polivalentes, pero sus objetivos son bastante diferentes, tanto en espíritu como en esencia.

En el sentido más amplio, abreviadamente FLw, la lógica borrosa coexiste con la teoría de conjuntos borrosos, que es una teoría de clases con fronteras no nítidas. FLw es mucho más general que FLn y contiene a ésta como una de sus ramas. Hoy, el término lógica borrosa se emplea mayoritariamente en su sentido más amplio. Este es el sentido en el que la lógica borrosa, abreviadamente FL, va a usarse de aquí en adelante.

Las ideas básicas que subyacen a la lógica borrosa se describieron en mi primer trabajo sobre conjuntos borrosos, que apareció publicado en 1965. Este trabajo, y los subsiguientes sobre conjuntos borrosos, produjeron una reacción dispar. Algunos científicos, y especialmente los matemáticos ya fallecidos Richard Bellman y Grigori Moisil, acogieron mis ideas con entusiasmo. De forma mayoritaria, sin embargo, encontré escepticismo y, en ocasiones, una hostilidad manifiesta. Hoy, treinta años más tarde, la controversia que rodea a la lógica borrosa continúa, aunque no en el mismo grado. Las numerosas aplicaciones de la lógica borrosa son demasiado visibles como para ignorarlas. No obstante, aún hay algunos que siguen sin convencerse de que la lógica borrosa tiene algo importante que ofrecer. La tradición Cartesiana de respeto por lo que es cuantitativo y preciso, y de desdén por lo cualitativo e impreciso, está arraigada demasiado profundamente como para desprenderse de ella sin presentar combate. Lord Kelvin –uno de los intelectos más excepcionales del siglo XIX– estableció sucinta-

mente en 1883 el dogma básico de esta tradición. El escribió que «En Física un paso esencial hacia el aprendizaje de cualquier tema es encontrar principios de cálculos numéricos y métodos viables para medir alguna cualidad conectada con él. A menudo digo que cuando puedes medir aquello sobre lo que estás hablando y expresarlo mediante números, sabes algo sobre ello; pero cuando no puedes medirlo, cuando no puedes expresarlo por medio de números, tu conocimiento es pobre e insatisfactorio: puede ser una introducción al conocimiento, pero con tus ideas apenas has contribuido al avance de la ciencia, cualquiera que sea el tema».

Como reflejo de esta tradición, el Profesor Rudolf Kalman –uno de los pioneros en la investigación sobre la teoría y el control de sistemas– dijo sobre mi trabajo en 1972:

*«Me gustaría comentar brevemente, lo expuesto por el profesor Zadeh. Sus propuestas podrían criticarse severamente, ferozmente, e incluso brutalmente, desde un punto de vista técnico. Esto estaría fuera de lugar. Pero, hay una cuestión que plantear sin aspereza: El Profesor Zadeh, ¿presenta ideas importantes o está sufriendo un espejismo?»*

*Sin duda, el entusiasmo del Profesor Zadeh por la borrosidad se ha visto favorecido por el clima político que impera en los Estados Unidos, de una permisividad sin precedentes. La «borrosización» es un tipo de permisividad científica; tiende a dar lugar a slogans socialmente atractivos, que no van acompañados por la disciplina del trabajo científico sólido y la observación paciente.*

*Déjeme decir, de forma bastante categórica que, en mi opinión, no existe algo como un concepto científico borroso».*

En una línea similar, un compañero mío, el Profesor William Kahan, comentó en 1975:

*«La teoría borrosa es errónea, errónea y pernicioso. No puedo pensar en ningún tipo de problema que no pudiera resolverse mejor mediante lógica clásica. Zadeh está diciendo el mismo tipo de cosas “La Tecnología nos llevó a esta confusión, y ahora no es capaz de sacarnos de ella”. Bien, la tecnología no nos llevó a esta confusión. La ambición y la debilidad y la ambivalencia nos llevaron a esta confusión. Lo que necesitamos es más pensamiento lógico, no menos. El peligro de la teoría borrosa es que fomentará ese tipo de pensamiento impreciso que nos ha traído tantos problemas».*

A pesar del escepticismo y la hostilidad, hoy en día está creciendo rápidamente la comunidad internacional de científicos e ingenieros que están dedicados activamente al desarrollo de la lógica borrosa y sus aplicaciones.

Por citar una estadística, diré que el número de trabajos sobre lógica borrosa y sus aplicaciones publicados en todo el mundo fue aproximadamente de 600 en 1988, de 1200 en 1991, y de 2400 en el último año. De estos trabajos, unos 1500 están relacionados con el control borroso. Me referiré al control borroso posteriormente.

El país en el que la lógica borrosa y los productos basados en la lógica borrosa han tenido mayor auge es Japón. En Japón, el interés por la Lógica Borrosa nos remonta a 1968, cuando los Profesores K. Asai, K. Tanaka, T. Terano y sus estudiantes comenzaron a publicar trabajos sobre autómatas borrosos y sistemas de aprendizaje. En 1972, se celebraban con regularidad

reuniones de sistemas de aprendizaje. En 1972, se celebraban con regularidad reuniones de científicos e ingenieros que trabajaban en la lógica borrosa y sus aplicaciones. Un hito lo marcó el Seminario EE.UU.-Japón sobre Conjuntos Borrosos y sus aplicaciones que se celebró en Berkeley en 1974. Después de esto, el ritmo de avance de la lógica borrosa y sus aplicaciones empezó a acelerar, culminando en el Congreso IFSA (de la Asociación Internacional de Sistemas Borrosos) de Tokio en 1987. En ese Congreso, Matsushita anunció el primer producto de consumo basado en lógica borrosa –un cabezal de ducha. Simultáneamente, pero en otro campo, comenzó a operar el Sistema del Metro de Sendai, que empleaba un controlador basado en lógica borrosa diseñado y construido por Hitachi. El Sistema del Metro de Sendai está considerado a nivel mundial como una de las aplicaciones de mayor éxito de la lógica borrosa.

En Europa, el interés por la lógica borrosa empezó a ser visible a principios de los 70. Hay que destacar el trabajo seminal sobre control borroso del Profesor E. H. Mamdani y sus estudiantes en el Queen Mary College de Londres. Este trabajo llevó a la primera aplicación industrial importante –el control de un horno de cemento–, que desarrolló el Dr. H. Ostergaard en colaboración con la Compañía F. L. Smidth en Copenhague a finales de los 70.

Aunque hubo algunas aplicaciones prácticas importantes realizadas en Europa desde mediados a finales de los 70, las contribuciones más notables se llevaron a cabo en el campo de los fundamentos y la teoría. En este punto, me gustaría rendir homenaje al difunto Profesor Kaufmann cuyos libros pioneros sobre lógica borrosa han tenido un profundo impacto.

Hay otro hombre al que también me gustaría rendir homenaje; es el Profesor Enric Trillas, que actualmente es el Secre-

tario General del Plan Nacional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología de España y es Catedrático de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial en la Universidad Politécnica de Madrid. Cuando le conocí por primera vez, en 1977, era Catedrático de Matemáticas de la Escuela Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Barcelona. El Profesor Trillas fue quien inició la investigación sobre la lógica borrosa y sus aplicaciones en España, y su visión y apoyo han hecho de España uno de los núcleos punteros en Europa en la actividad basada en la lógica borrosa. Hoy, son muchos los matemáticos, científicos, e ingenieros en España que mediante sus contribuciones a la lógica borrosa y sus aplicaciones han alcanzado relevancia nacional e internacional. Me proporciona gran satisfacción poder decir que algunos de ellos han desarrollado períodos de investigación en Berkeley como Visiting Scholars bajo mi dirección. La Profesora María Angeles Gil, que está en esta Universidad de Oviedo, es un miembro de ese grupo, y fue una participante activa en la investigación relacionada con la lógica borrosa en Berkeley. La echamos mucho de menos.

¿Cuáles son las ideas básicas que subyacen a la lógica borrosa, al soft computing y a la computación con palabras? ¿Cuáles son sus potencialidades y sus limitaciones? Estos son algunos de los aspectos que me gustaría abordar en mi discurso.

En primer lugar, un poco de historia. Aunque por formación soy un ingeniero eléctrico, siempre he sido un creyente acérrimo en el poder de las matemáticas. Para mí, era un artículo de fe que casi para cualquier problema existía una solución matemática. Como muchos otros investigadores del análisis de sistemas, del análisis

de la información y del control, me vi impulsado a una búsqueda por la precisión, el rigor y la sofisticación matemática. No había en mi mente duda, de que ése era el camino correcto a seguir.

Sin embargo, cuando escribía un libro con el Profesor Charles Desoer sobre teoría de sistemas lineales, empecé a darme cuenta de que hay muchos conceptos en la teoría de sistemas que no se prestan en sí mismos a una definición precisa. Por ejemplo, puede darse una definición precisa de lo que es un sistema lineal, un sistema estable, o un sistema invariante en el tiempo, etc. Pero ¿cómo puede definirse lo que significa un sistema descentralizado, un sistema de variación lenta, un sistema fiable, etc?

Tratando de formular tales definiciones, comencé a percatarme de que el problema reside en el marco Aristotélico de las matemáticas clásicas –un marco que no tolera la imprecisión y la verdad parcial. En esencia, una suposición básica en las matemáticas clásicas es que un concepto debe admitir una definición precisa, que divida a la clase de todos los objetos en dos subclases: (i) la de los objetos que son ejemplos del concepto; (ii) y la de los objetos que no lo son, sin dar opción a que se presenten casos dudosos. Por ejemplo, una función es o bien continua o discontinua; no puede ser continua en cierto grado. De forma análoga, una matriz es simétrica o no; no puede ser algo simétrica, más o menos simétrica, o simétrica en cierto grado. Del mismo modo, un trabajo publicado en una revista matemática se espera que contenga definiciones, axiomas y teoremas establecidos con precisión. Generalmente, un trabajo no se consideraría aceptable para publicación, si sus conclusiones se establecieran como afirmaciones que no fueran inequívocamente ciertas.

En claro contraste con el mundo idealizado de las matemáticas, nuestra percep-

ción del mundo real está invadida por conceptos que no tienen fronteras nítidamente definidas, como por ejemplo, **alto, gordo, muchos, la mayoría, lentamente, viejo, familiar, relevante, mucho mayor que, amable**, etc. Una suposición clave en la lógica borrosa es que tales conceptos denotan conjuntos borrosos, es decir, clases de objetos en los que la transición de la pertenencia a la no pertenencia es gradual y no abrupta. Así, si  $A$  es un conjunto borroso de un universo de discurso  $U$ , entonces todo elemento de  $U$  tiene un grado de pertenencia a  $A$  que generalmente se considera que es un número entre 0 y 1, donde el 1 representa la pertenencia total y el 0 la no pertenencia. La función que asocia a cada elemento su grado de pertenencia a  $A$  se denomina *función de pertenencia de A*. Esta función define a  $A$  como un subconjunto borroso de  $U$ .

Es importante observar que existe una conexión estrecha entre la borrosidad y la complejidad. De este modo, una característica básica del cerebro humano, característica que comparte en distintos grados con todos los sistemas que procesan información, es su capacidad limitada para manejar clases de elevada cardinalidad, es decir, clases que tengan un gran número de elementos. En consecuencia, cuando nos enfrentamos con una clase de elevada cardinalidad, tendemos a agrupar sus elementos en subclases, de forma que se reduzca la complejidad de la labor de proceso de información que conlleva. Cuando se llega a un punto en el que la cardinalidad de la clase de las subclases excede la capacidad de manejo de información del cerebro humano, las fronteras de las subclases deben llegar a hacerse imprecisas y la borrosidad vienen a ser una manifestación de esa imprecisión. Esta es la razón por la que el vocabulario limitado que tenemos para describir los colores, hace que los nombres de colores como rojo, verde, azul, púrpura,

etc., sean en efecto nombres de conjuntos borrosos más que no borrosos. Por eso también los lenguajes naturales, que tienen un nivel superior al de los lenguajes de programación, son borrosos mientras que los lenguajes de programación no lo son.

Yo empleo el término *granulación* para referirme al proceso de formar clases borrosas de objetos, que están agrupados por similitud. La granulación es una de las facetas más elementales del conocimiento humano. Como señalamos anteriormente, la necesidad de la granulación obedece a la capacidad limitada de los humanos para resolver y/o almacenar detalles. Desde este punto de vista, la borrosidad y la granulación son consecuencias de la complejidad, y desempeñan un papel clave en la tolerancia de la imprecisión para lograr manejabilidad, robustez y bajo coste.

Una implicación importante de esta observación es que con el rápido crecimiento en la complejidad de las tareas de proceso de información que se pide que realicen los ordenadores, estamos llegando a un punto en el que los ordenadores tendrán que diseñarse de manera que procesen información borrosa. De hecho, es la capacidad para manipular conceptos borrosos lo que distingue la inteligencia humana de la inteligencia de la máquina en los ordenadores de generación actual. Sin esa capacidad, no podemos construir máquinas que puedan recoger historias no estereotípicas, traducir bien de un lenguaje natural a otro, o realizar muchas otras labores que los humanos pueden hacer con facilidad debido a su capacidad para granular y manipular los conceptos borrosos resultantes.

Para poder decir más sobre la lógica borrosa y sus aplicaciones, tendré que aclarar algunas de las cuestiones que subyacen al concepto de conjunto borroso. Para este propósito, consideremos un concepto, por ejemplo, **persona amable**, que no admite una definición precisa en términos de una

colección de condiciones necesarias y suficientes. Tal concepto puede definirse por extensión asociando con cada individuo que pertenece a un universo de discurso  $U$ , su grado de pertenencia al conjunto borroso de las personas amables.

Por ejemplo, el grado de pertenencia de Arnold podría ser 0.6, mientras que el de Carol podría ser 0.9. Estos números se obtendrían a partir de un observador haciéndole la pregunta «En una escala del 0 al 1, ¿con qué grado es amable Carol?» Lo que importa reseñar es que los números en cuestión son de naturaleza subjetiva. En el caso de Carol, por ejemplo, el número 0.9 no se interpretaría como una medida del consenso, es decir, como la proporción de individuos que responderían afirmativamente a la pregunta de si Carol es amable; ni se interpretaría como la probabilidad o la creencia de que Carol sea amable. En esta conexión, debe indicarse que, en general, es mucho más sencillo para los humanos estimar grados de pertenencia que estimar probabilidades numéricas.

En el caso de un concepto cuantificable, la función de pertenencia puede representarse como una función de uno o más atributos medibles. Por ejemplo, en el caso de una **persona joven**, el atributo en cuestión sería la *Edad*. En ese caso, el universo de discurso puede considerarse que es el intervalo  $[0,120]$ , y el grado de pertenencia a la clase de personas jóvenes de una persona de 35 años, podría ser de 0.6.

Claramente, los conceptos **persona amable** y **persona joven** dependen del contexto y son subjetivos. Algunos conceptos dependen más del contexto que otros. Por ejemplo, **muchos** depende más del contexto que **varios**, y **pequeño** depende más del contexto que **circular**. Como veremos más tarde, en la teoría de conjuntos borrosos la dependencia del contexto juega un papel preponderante en el concepto de la llamada variable lingüística.

Debe señalarse que el grado de pertenencia puede interpretarse como el valor de verdad de un predicado en lógica polivalente. Por ejemplo, el grado de pertenencia de Carol a la clase de las personas amables puede considerarse equivalente al valor de verdad de la proposición «Carol es amable». Sin embargo, el desarrollo de la teoría de conjuntos borrosos y de la lógica borrosa ha seguido una trayectoria completamente diferente a la de la lógica polivalente. Como una ilustración, en el marco de la teoría de conjuntos borrosos es natural plantearse la cuestión «¿Qué es un conjunto borroso convexo?, o ¿qué se entiende por la envolvente convexa de un conjunto borroso?». Esta no sería una cuestión natural en lógica polivalente. En un contexto más general, la teoría de conjuntos borrosos ha estimulado el desarrollo de una nueva rama de la topología llamada la *topología borrosa*, que es una teoría matemática sofisticada en la línea clásica. El marco conceptual de la topología borrosa se relaciona con el de la teoría de conjuntos borrosos, pero no con el de la lógica polivalente.

La topología borrosa puede contemplarse como un ejemplo de una característica de la lógica borrosa a la que podemos referirnos como «*borrosibilidad*». Más concretamente, cualquier teoría  $X$  puede ser «borrosizada» reemplazando el concepto de conjunto en  $X$  por el concepto más general de conjunto borroso. De esta forma, la topología puede generalizarse a la topología borrosa; el álgebra al álgebra borrosa; la programación matemática a la programación matemática borrosa; la lógica a la lógica borrosa (en su sentido estricto); el control al control borroso, etc. Lo que se gana con la «borrosización» es, principalmente, mayor generalidad y una relación más estrecha con la realidad. No sería una exageración esperar que, posiblemente, la mayoría de las teorías y de

los conceptos acaben siendo «borrosizados» de esta manera.

Mediante el suministro de un cuerpo de conceptos orientados a la computación y de técnicas para tratar la incertidumbre y la imprecisión, la lógica borrosa se presta más que los sistemas lógicos tradicionales para establecer un modelo descriptivo del razonamiento humano. En este sentido, la lógica borrosa abre la puerta a muchas aplicaciones que van más allá del alcance de los métodos basados en lógica convencional o en la teoría clásica de probabilidad. No voy a tratar de ser más específico en este punto, dando una realación de las múltiples aplicaciones importantes de la lógica borrosa hechas en los últimos años en muchos países, incluyendo España. Pero sí me gustaría comentar algo mencionado anteriormente, como es el predominio de trabajos que se ocupan del control borroso.

Cuando escribí mi trabajo de 1965 sobre conjuntos borrosos, mi esperanza era que la mayoría de las aplicaciones de la teoría de conjuntos borrosos se relacionaran con los campos en los que los sistemas fueran complejos y mal definidos, por ejemplo, sistemas económicos, lingüística, psicología, sistemas biomédicos, sistemas sociales, etc. En 1970, pude ver que la lógica borrosa podía aplicarse al control, y expresé mis opiniones en un trabajo de 1972 titulado «A Rationale for Fuzzy Control». No podía predecir, sin embargo, que veinte años más tarde el control sería el área de aplicación más visible de la lógica borrosa.

El control borroso es un área que está creciendo rápidamente, debido a razones que abarcan teoría, desarrollo e implementación. En primer lugar, las aplicaciones de la lógica borrosa al control son fáciles de llevar a cabo, ya que no requieren más que el uso de las reglas if-then borrosas para manipular dependencias y comandos.

En segundo lugar, el punto de partida en el control borroso es una solución humana. De este modo, en muchas situaciones, el control borroso se emplea de un modo descriptivo para explicar lo que es básicamente una solución humana en el lenguaje de las reglas if-then borrosas-FDCL (Dependencia Borrosa y Lenguaje de Comando).

En tercer lugar, los controladores borrosos son simples y robustos. Pero, quizá más importante, el control borroso permite la ejecución de tareas tales como aparcar un coche, que no se prestan a resolución mediante métodos convencionales. La mayor parte de la teoría de control clásica está orientada a que el sistema alcance una consigna, y tiene poco que aportar sobre problemas relacionados con el control orientado a la tarea. Esos problemas van a cobrar con seguridad mayor importancia en los próximos años.

Echando la vista atrás en mi propia investigación, me gustaría comentar brevemente mi primer trabajo en teoría de la posibilidad titulado «Fuzzy Sets as a basis for a Theory of Possibility», que apareció publicado en 1978. La idea clave que adelantaba en ese trabajo era la de la necesidad de una diferenciación entre la probabilidad y la posibilidad, suponiendo que esta última estaba basada en la lógica borrosa. Así, la posibilidad puede verse como una medida de la facilidad de logro o grado de compatibilidad, mientras que la probabilidad tiene que ver con el azar y el comportamiento aleatorio. Desde la publicación de mi trabajo de 1978, la teoría de la posibilidad se ha desarrollado en varias direcciones y se han encontrado muchas aplicaciones, especialmente en el campo de los sistemas basados en el conocimiento y con soporte de decisión. Entre las muchas contribuciones al desarrollo de la teoría de la posibilidad, merece mención especial el trabajo de D. Dubois y H. Prade

en Francia. Las diversas contribuciones fundamentales para el avance de la lógica borrosa y la teoría de la posibilidad realizadas por Dubois y Prade, han suscitado y siguen suscitando un impacto profundo y amplio.

Conviene hacer notar que había, y aún hay, alguna controversia relativa a la conexión entre la teoría de la probabilidad, por un lado, y la lógica borrosa y la teoría de la posibilidad, por otro. Dentro de la comunidad probabilística, hay todavía algunos que afirman que no hay nada que pueda hacerse con la lógica borrosa y la teoría de la posibilidad, que no hubiera podido hacerse tan bien o incluso mejor usando métodos basados en la probabilidad. Para mí, tales afirmaciones reflejan una falta de familiaridad con la lógica borrosa y un mal entendimiento de lo que ésta puede ofrecer. No tengo duda de que, con el tiempo, los escépticos dentro de la comunidad probabilística se darán cuenta de que la teoría de la probabilidad y la teoría de la posibilidad son complementarias y no adversarias, y que la teoría de la probabilidad necesita infundirse de conceptos borrosos para reforzar su eficacia en el tratamiento de los problemas del mundo real.

Otra de las líneas de mi investigación que, probablemente, cobrará más reconocimiento en los años próximos, es la que se refiere al concepto de *usualidad* como base para lo que yo llamo la *lógica disposicional*. En lógica disposicional, las proposiciones se supone que están calificadas por usualidad, por ejemplo, «usualmente hace frío y niebla en San Francisco durante el verano» y «usualmente lo que es escaso resulta caro». En los lenguajes naturales, la calificación por usualidad generalmente es implícita en lugar de explícita; de este modo, «comer en exceso causa obesidad» debería interpretarse como «usualmente comer en exceso causa obesidad». La importancia de la calificación

por usualidad radica en el hecho de que buena parte del conocimiento de sentido común consiste en disposiciones, es decir, en proposiciones calificadas por usualidad. Desde esta perspectiva, la lógica disposicional puede contemplarse como la lógica del conocimiento y el razonamiento de sentido común.

La aparición de la neurocomputación y los algoritmos genéticos —a mediados de los 80—, como metodologías altamente eficaces para la concepción y el diseño de sistemas de aprendizaje adaptativos y de organización propia, tuvo un impacto significativo en el desarrollo de la lógica borrosa. Ha llegado a ser cada vez más evidente que la complementariedad de la teoría de la probabilidad y la lógica borrosa es aplicable también a las metodologías de neurocomputación y algoritmos genéticos. Esto me llevó a sugerir el concepto de *soft computing* como una especie de consorcio o sociedad entre la lógica borrosa, la neurocomputación y el razonamiento probabilístico, en el que la última incluiría los algoritmos genéticos, el razonamiento evidencial y los sistemas caóticos. En este consorcio, la contribución principal de la lógica borrosa es una metodología para el tratamiento de la imprecisión, el razonamiento aproximado y la computación con palabras; la neurocomputación es una metodología de aprendizaje, adaptación e identificación de sistemas; y el razonamiento probabilístico concierne a metodologías para el razonamiento evidencial y la búsqueda aleatoria sistematizada. En el último, la metodología de los algoritmos genéticos desempeña un papel crucial.

Lo importante del soft computing es que sugiere la posibilidad de emplear la lógica borrosa, la neurocomputación y los algoritmos genéticos de forma combinada en vez de aislada. Una de las combinaciones más visibles en este momento es la de los sistemas neuro-fuzzy. La mayoría de estos sis-



temas están basados fundamentalmente en reglas borrosas, y en ellos las técnicas de redes neuronales se utilizan con propósitos de sintonía y optimización. No obstante, estamos empezando a ver también sistemas neuronales en los que las reglas if-then borrosas se usan para mejorar la ejecución de algoritmos básicos como el algoritmo de retropropagación. Con el tiempo, los sistemas híbridos que emplean una combinación de lógica borrosa, neurocomputación y algoritmos genéticos llegarán probablemente a estar por todas partes.

El empleo creciente del soft computing ha supuesto una contribución importante para la concepción, el diseño y el desarrollo de sistemas inteligentes. Se acerca el tiempo en que necesitaremos una forma de medir la inteligencia de los sistemas hechos por el hombre. Por analogía con el IQ (cociente intelectual), podríamos referirnos a una medida de la inteligencia de tales sistemas como MIQ (cociente intelectual de la máquina). Desde este punto de vista, uno de los objetivos prioritarios del soft computing es suministrar un cuerpo de conceptos y técnicas para la concepción y diseño de sistemas con un MIQ elevado. Con este propósito, se ha puesto en marcha en 1991 el Berkeley Initiative in Soft Computing (BISC).

Buena parte de mi investigación actual está dedicada a lo que yo denomino Computación con Palabras, abreviadamente CW. Sobre la base de la lógica borrosa, el CW proporciona un marco conceptual para calcular y razonar con palabras en lugar de con números. La idea básica que subyace al CW es que, en general, la información se transmite restringiendo los valores que puede tomar una variable. El punto de partida en el CW es la suposición de que la información dada se representa como una colección de proposiciones expresadas en un lenguaje natural. Cada proposición se contempla como una restricción implícita

de una variable implícita. Esto nos lleva al concepto de *forma canónica*, que sirve para hacer explícita la variable restringida y la restricción.

Una vez que, mediante el uso de formas canónicas, se hacen explícitas las restricciones implícitas en las proposiciones de la premisa, las reglas de inferencia de la lógica borrosa pueden utilizarse para propagar las restricciones borrosas desde las premisas a las conclusiones. Por último, las restricciones inducidas se traducen a un lenguaje natural. Esta es la idea fundamental en la computación con palabras.

La computación con palabras atiende a tres objetivos fundamentales. En primer lugar, a ofrecer una metodología para calcular y razonar cuando la información disponible no es suficientemente precisa como para justificar el empleo de números. En segundo lugar, a aprovechar la tolerancia de la imprecisión para alcanzar manejabilidad, robustez, bajo coste y mejor relación con la realidad. Y, en tercer lugar, a proporcionar bases para el desarrollo de lenguajes de programación que pudieran aproximarse a los lenguajes naturales en apariencia y en capacidad de expresión.

Creo que en unos años la computación con palabras llegará a ser una metodología por derecho propio, con un impacto de amplio rango tanto a nivel básico como a nivel aplicado. En el análisis final, el modelo de papel para la computación con palabras es la mente humana.

Me gustaría finalizar mi discurso con una predicción optimista. Estamos entrando en una era de sistemas inteligentes que tendrán un impacto profundo –y esperamos que positivo– en las formas en que nos comunicamos, tomamos decisiones y utilizamos las máquinas. Creo que la lógica borrosa –junto con sus socios en el soft computing– jugarán un papel importante en conseguir que la era de los sistemas inteligentes sea una realidad.



DON PEDRO GIL ALVAREZ

Fotografía realizada por José Luis Cerejido