HISTORIA DE LA POLÉMICA SOBRE LA INTRODUCCIÓN DE LA LÓGICA DIFUSA

HISTORY OF THE CONTROVERSY ON THE INTRODUCTION OF FUZZY LOGIC

Ángel Garrido[1]

Facultad de Ciencias

UNED

Resumen: Los problemas de incertidumbre, imprecisión y vaguedad se han debatido durante muchos años. Estos problemas han sido temas importantes en los círculos filosóficos, con muchos debates, en particular, acerca de la naturaleza de la vaguedad y la capacidad de la lógica booleana tradicionales para hacer frente a los conceptos y percepciones que son imprecisas o vagas. La lógica difusa (que se suele traducir al castellano por "Lógica Borrosa", o "Lógica Difusa", pero también por "Lógica Heurística") puede ser considerada una lógica divergente o una "deviant logic" (lógica multivaluada, MVL, en su acrónimo). Se basa en, y está estrechamente relacionada con, la teoría de los conjuntos fuzzy –borrosos o difusos-, y está aplicándose con creciente éxito en el tratamiento de información y el control de distintos sistemas difusos. Se podría pensar que la lógica difusa es muy reciente y que ha funcionado sólo desde hace poco tiempo, pero sus orígenes se remontan al menos a los filósofos griegos. Incluso parece posible rastrear sus orígenes en la China y la India antiguas. Porque parece que fueron ellos los

[1] Profesor de Análisis en el Departamento de Matemáticas Fundamentales, Facultad de Ciencias, UNED. E-mail: agarrido@mat.uned.es

primeros en tener en cuenta que todas las cosas no tienen por qué ser de un determinado tipo o dejar de serlo, sino que puede haber – y de hecho los hay- una amplia gama de estados intermedios. Es decir, que habrían de ser los pioneros en considerar que no deben ser sólo considerados un par de grados absolutos y totalmente contrapuestos, sino que puede haber –y de hecho la hay- toda una escala que abarca desde el mayor al menor grado tanto de verdad como de falsedad. En el caso de los colores, por ejemplo, entre el blanco y el negro hay toda una escala infinita: la de los tonos de grises. Algunos teoremas recientes muestran que, en principio, la lógica difusa se puede utilizar para modelar cualquier sistema continuo que se base en la inteligencia artificial, o la física o la biología, o la economía, …, por tanto, en muchos campos se puede encontrar que los modelos difusos y la lógica de sentido común son los más útiles, y mucho más convenientes o adecuados que aquellos que son estándar, entre los que podríamos considerar la matemática clásica. Analizaremos aquí la historia y el desarrollo de este problema: el de la Vagueness, o de la Fuzziness, "Borrosidad" en castellano, que resulta esencial para trabajar con la incertidumbre.

PALABRAS CLAVE*:* Lógica Matemática, Lógicas No Clásicas, Lógica Difusa, Tratamiento de la Incertidumbre, Aspectos filosóficos de la Lógica Difusa.

ABSTRACT: The problems of uncertainty, imprecision and vagueness have been under discussion for many years. These problems have been important themes in philosophical circles, with many debates, specifically regarding the nature of vagueness and the capability of traditional Boolean logic to deal with concepts and perceptions that are imprecise or vague. Fuzzy logic can be considered a "divergent" or "deviant" logic (a many-valued logic, with the acronym MVL). It is based on and closely related to the theory of fuzzy sets, and is applied with increasing success in the treatment of information and to control various fuzzy systems. Fuzzy logic might seem to be very recent and not to have been functioning for long, but its origins date back at least to the Greek philosophers. The origins of fuzzy logic may even be traceable to ancient China and India, where philosophers seem to have been the first to note that not everything has to belong to a certain type or not, but that there may be - and indeed are- a wide range of intermediate states. That is, they seem to have been the pioneers in feeling that not only should a few absolute and totally opposed degrees be considered, but that there might be and, indeed is, an entire scale from the highest to the lowest degree of both truth and falsehood. For colors, for example, there is an infinite scale of gray tones between black and white. Recent theorems show that, in principle, fuzzy logic can be used to model any continuous system based on artificial intelligence, or physics or biology, or economics... Therefore, in many fields fuzzy logic models and commonsense logics are found to be the most useful, and more convenient or a better fit than standard logics, including classic mathematics. We will discuss the history and development of the problem of vagueness or fuzziness, a concept that is essential to working with uncertainty.

KEYWORDS: Mathematical logic, non-classic logics, fuzzy logic, treatment of uncertainty, philosophical aspects of fuzzy logic.

Lema:

"Todo es vago en un grado del que no te das cuenta hasta que tratas de especificarlo."
Bertrand Russell, *Vagueness*[2]

1. Introducción

Como sabemos, la lógica es el estudio de la estructura y los principios del razonamiento correcto, y más específicamente, los intentos de establecer los principios que garantizan la validez de los argumentos deductivos. El concepto central de la lógica es el de validez, porque cuando afirmamos la validez de un argumento se nos está diciendo que es imposible que su conclusión sea falsa si sus premisas son verdaderas.

Las proposiciones son descripciones del mundo, es decir, son afirmaciones o negaciones de eventos en diferentes mundos posibles, de los cuales el "mundo real" es sólo uno de los posibles. Existe una larga tradición filosófica de distinguir entre la verdad como algo necesario (a priori, o "lógico"), y los hechos "contingentes" (a posteriori, o "de hecho", factuales).

Ambos han abarcado realmente los dos conceptos de la verdad lógica, sin que se opongan entre sí, aunque son muy diferentes: la concepción de la verdad como coherencia, y la concepción de la verdad como correspondencia. De acuerdo con el punto de vista de la coherencia, una proposición es verdadera o falsa dependiendo de su relación con respecto a un determinado conjunto de proposiciones, puesto que se han aplicado las normas de dicho sistema. Bajo los términos de dicha correspondencia, una proposición es verdadera o falsa, si está de acuerdo con la realidad, es decir, con el hecho de referencia.

[2] Bertrand Russell 1922.

Otras opiniones han tratado de superar tal dicotomía. Entre las más notables se puede mencionar el punto de vista semántico, planteado por el brillante matemático y filósofo polaco Alfred Tarski (1902-1983).

2. Verdad o falsedad

Para incrementar todavía más la complejidad del problema, hay que tener en cuenta que no sólo se predica la verdad o falsedad de las proposiciones, sino también de las teorías, ideas y modelos. Y así admitiremos una concepción nueva y diferente de lo que es la verdad.

La idea básica que subyace a todos estos enfoques es el de una dicotomía intrínseca entre lo verdadero y lo falso. Esta oposición implica el necesario análisis sobre la validez de dos leyes fundamentales de la lógica clásica:

- Principio del tercero excluido (tertium non datur): Toda proposición es verdadera o falsa, y no hay otra posibilidad.

- Principio de no contradicción: No puede haber una proposición que sea verdadera y falsa al mismo tiempo.

Esta idea básica genera una serie de paradojas y una insatisfacción que se basa en la necesidad de superar la rigidez del concepto de verdad, esto es, la cómoda, pero estrecha bivalencia de la lógica clásica.

Aceptar que una proposición acerca de un evento futuro es verdadera o falsa hace necesario o imposible, respectivamente, el evento expresado por la proposición. La solución propuesta por Jan Lukasiewicz en su artículo clásico de 1920, es la aceptación de una lógica de tres valores de verdad (o de tres grados), también llamada trivalente o trivaluada, que además de verdadero y falso, acepta un valor de verdad indeterminado, al que le atribuye un valor de verdad o grado de pertenencia del 0.5.

Charles Sanders Peirce (1839-1914) lo anticipó en alguno de sus trabajos, pero ha habido muchos otros que también han ido contribuyendo a su construcción, así como al muchas veces agrio y tenso debate generado en torno a su introducción, como el mantenido contra el científico de la computación americano Bart Kosko.

Bertrand Russell (1872-1970) es considerado por algunos como el padre de la Lógica Difusa, pues partió de la idea según la cual la lógica clásica, inevitablemente, conduciría a contradicciones, lo que expuso con su habitual agudeza en una conferencia sobre la "vagueness" del lenguaje[3], llegando a la conclusión de que dicha vaguedad es precisamente cuestión de grados.

3. Los orígenes de la Lógica Difusa

Según esta nueva teoría, tenemos una función de transferencia que procede de la generalización de la llamada función característica. Se suele llamar la "función de pertenencia" (membership function), y se extiende desde el universo de discurso, U, hasta el intervalo unidad cerrado de los reales, que es el I = [0, 1], contenido en **R**. No así en los llamados `crisp´ sets (conjuntos "clásicos", o "conjuntos nítidos"), donde el rango de la función se reduce a un conjunto que consta de tan sólo dos elementos, a saber, el {0, 1}. Por lo tanto, la teoría de conjuntos difusos sería una generalización de la teoría de conjuntos clásica.

Las nuevas ideas surgieron del estudio de varios pensadores de diversas disciplinas, quienes tenían una visión divergente de los problemas respecto de la presentada por la lógica tradicional. La paradoja del conjunto de todos los conjuntos que no se contienen a sí mismos, que es muy famosa, o la del barbero, que fue propuesta por Bertrand Russell. O el principio de incertidumbre de la física cuántica, de Werner Heisenberg, muy emparentado con lo anterior.

La teoría de conjuntos "fuzzy" (los llamados conjuntos borrosos) parte en los tiempos modernos del físico cuántico y filósofo alemán Max Black (1937), que también analizó la cuestión de modelizar la "vaguedad". Pero Black se diferencia de Russell en que admite que la lógica tradicional puede ser reinterpretada por la vaguedad, que representa un nivel adecuado de detalle, y sugiere que

[3] Bertrand Russell, *"Vagueness".* Texto leído ante la Sociedad de Jowett, Oxford, 25 de noviembre de 1922. Publicado por primera vez en *The Australasian Journal of Psichology and Philosophy,* 1 (junio de 1923, pp. 84-92). Este texto puede también ser encontrado en sus *Collected* Papers (1988, pp. 147-154).

la definición de Russell de la vaguedad confunde la vaguedad con la generalidad. El mencionado autor analizaba la vaguedad de los términos o los símbolos mediante el uso de casos extremos, en donde no está claro si el término puede ser utilizado para describir la situación. Cuando habla de tal medida, señala que "la indeterminación que es consustancial en la vaguedad está presente también en todas las mediciones científicas". Una solución propuesta por Max Black es la idea de un perfil de consistencia o de una curva que nos permita el análisis de la ambigüedad de una palabra o de un símbolo. Para el investigador de la lógica difusa de hoy en día, estas curvas tendrían un gran parecido con las llamadas funciones de pertenencia de los conjuntos difusos de Tipo-1.

También puede considerarse como clave y de lo más esencial la contribución -algo posterior- del lógico y matemático polaco Jan Lukasiewiz (1878-1956). Por lo tanto, se debe en buena medida a tales influencias intelectuales el que Lofti Asker Zadeh (n. 1921) publicara su el conocido artículo [2] en la revista *Información y Control,* y tres años después (en 1968), otro sobre el llamado "algoritmo de aproximación"[4].

Al dar a conocer de nuevo estas ideas en un modo más consistente y formalizado, los artículos publicados por Lotfi A. Zadeh no fueron nada bien recibidas en Occidente, sino que en muchos casos fueron rechazados con una extrema dureza por los elementos más conservadores de la comunidad científica. No obstante, con el tiempo comenzaron a ir ganando más y más adeptos, lo que llevó a que estas teorías se extendieran cada vez más, estableciéndose con firmeza entre los científicos más innovadores y especialmente, entre sus mejores profesionales. Más que en cualquier otro lugar lo fue inicialmente en el Japón, y luego en Corea del Sur, China y la India. Europa y Estados Unidos van siendo incorporadas a esta nueva matemática, pero más lentamente.

Como cuestión pintoresca o anecdótica, si se quiere, pero que es bien cierta, podemos referirnos a que el ahora reconocido por muchos como "el padre de la Lógica Difusa", Lotfi A. Zadeh, en su día se reunió con los ejecutivos de la empresa IBM, quienes le dijeron que "a su descubrimiento no le veían ningún interés, ni utilidad futura ninguna". Por supuesto, esto puede ser considerado como un modelo muy claro, un paradigma, de la inteligencia y de la visión comercial de ciertas grandes empresas de Occidente. Si no hubiera sido así, probablemente se hubieran desarrollado en los Estados Unidos, y en otros países

[4] Zadeh (1965).

occidentales, muchos de los notables avances tecnológicos derivados de la nueva ciencia.

La intención de Lofti Zadeh fue la de crear un formalismo que permitiera manejar de manera más eficiente la imprecisión del razonamiento humano. Sería en 1971 cuando él publicara los elementos formales que condujeron a la metodología de la lógica difusa y sus aplicaciones, tal como se conocen hoy en día.

De lo anterior se deduce que es posible que necesitemos un replanteamiento radical de nuestros conceptos clásicos de la verdad y la falsedad, mediante la introducción del concepto de borrosidad (vaguedad o imprecisión), y como resultado de lo cual la verdad o falsedad de los casos serían sólo sus situaciones extremas. Por "vagueness" (o borrosidad) se puede entender el hecho de que una proposición puede ser parcialmente verdadera y parcialmente falsa al mismo tiempo. Una persona no es sólo alta o baja, sino que parcialmente puede participar de ambas características, mientras que en la zona intermedia de las dos alturas extremas debe existir como una graduación por la que está dejando de ser alta o empezando a ser baja. Parece intuitivamente claro que el concepto de borrosidad tiene sus raíces en gran medida dentro de nuestras formas de pensar y de hablar. Otra cuestión distinta es la valoración que cada individuo concede un carácter difuso (el vaso medio lleno o medio vacío), que dependen de los problemas psicológicos subjetivos y difíciles de evaluar.

El principio difuso clave es el mencionado, según el cual todo es cuestión de grados. Podría ser ese su más famoso "leitmotiv". Todas las proposiciones adquieren un valor de verdad entre uno (totalmente verdadera) y cero (totalmente falsa), admitiendo ambos inclusive. La asignación de estos valores extremos sólo se dará en el caso de las verdades lógicas o falsedades o inducciones fuertes: "Todos los hombres son mortales" puede ser un ejemplo de inducción fuerte, ya que no se han producido hasta el momento contraejemplos, aunque sí muchos candidatos a serlo, pero una vez y otra resultan fallidos.

Los argumentos para introducir el concepto de borrosidad en la lógica ya han sido expuestos, pero será necesario examinar en detalle algunos aspectos clave:

a) Los antecedentes históricos y el concepto metodológico.

b) La posibilidad de construir un lenguaje formal de valor infinito, y si es así, que tratemos de definir sus propiedades y leyes.

c) Las consecuencias filosóficas y prácticas derivadas de dicha introducción.

4. Punto de vista Oriental vs. Punto de vista Occidental

El profesor norteamericano Bart Kosko[5] puso de relieve las diferencias entre las filosofías orientales y occidentales con respecto del concepto de la verdad, que resume en la oposición de Aristóteles contra Buda. De hecho, B. Kosko cree que la filosofía occidental, en cuanto sucesora directa de Aristóteles, ha aceptado acríticamente la bivalencia como el sistema que resulta útil, pero que es demasiado simple para una realidad que es cada vez más compleja. En pocas palabras: lo que ha ganado en simplicidad se ha perdido en precisión. Por el contrario, las filosofías orientales: el Buda, Lao Tse, Confucio, etc., siempre han aceptado la estricta unidad de los opuestos, de lo que llaman (como sabemos), el yin y el yang, adoptando con naturalidad la teoría de los grados de verdad.

No está muy de acuerdo el profesor Julián Velarde ni con la predicación ni con el personaje de Bart Kosko, y menos aún con sus críticas sobre las opiniones del Estagirita, pues como él dice "primero hay que leerlo", y Aristóteles es mucho Aristóteles para trivializarlo así[6].

Por otro lado, si bien es cierto que Aristóteles puede considerarse como el introductor de la bivalencia, no debemos por ello pensar que se le pasara por alto la existencia de las características o propuestas difusas, como cuando comentó que:

"En cualquier caso, lo que se dice de acuerdo con ellos (cualidades) apoya sin duda el más y el menos"

O cuando nos habla de que podemos llegar al conocimiento, pero sin la certeza de ello. Si Aristóteles (una mente tan brillante como aquella) no llegó a estudiar este concepto fue posiblemente porque faltaba aún el conocimiento matemático necesario para su desarrollo. No fue sino hasta la aparición de un Cálculo cada vez más sistemático y operacional, la combinatoria y la teoría de la probabilidad, la teoría de juegos, o la nueva teoría, conocida ahora como "Crisp

[5] Bart Kosko (1993).
[6] Julián Velarde (1996).

Set Theory", o teoría clásica de conjuntos, iniciada por Cantor, así como la estadística moderna y el cálculo matricial, entre otros.

Como se dijo anteriormente, Aristóteles no tenía el aparato matemático que posibilitara el desarrollo de una lógica difusa. La gestación de esa construcción se inicia con Newton y Leibniz, que desarrollaron el cálculo en el siglo XVII. Tal vez por la obsesión con la exactitud de las matemáticas, se ha hecho perfectamente aplicable la famosa cita de Einstein:

"En la medida en que las matemáticas se refieren a la realidad, no son ciertas. Y en la medida en que son ciertas, no se refieren a la realidad".

Pero lo que no dijo Einstein es que, sin duda, el aparato deductivo desarrollado por la matemática nos facilita y mucho la comprensión de la realidad. La explicación dada por el movimiento de Aristóteles se sustituye por el más innovador tratamiento de Newton, pero gracias a una fuerte apoyatura en el Cálculo, sin el cual no habría sido esto posible. Sin embargo, el cálculo infinitesimal en profundidad sólo fue utilizado para el estudio de la física en los siglos siguientes, experimentando luego un crecimiento espectacular, con Euler, Laplace, Lagrange, Fourier, y así sucesivamente. Hoy en día impregna todas las ciencias, tanto sociales y humanas como naturales. Pero también con el *Calculus* se introdujo –al menos, subliminalmente- la esencial cuestión del grado.

La Lógica Clásica (de esencia aristotélica) se ha demostrado durante mucho tiempo muy eficaz en las ciencias llamadas "duras", tales como las matemáticas o la física. Sin embargo, resulta insuficiente cuando los predicados contienen imprecisión, incertidumbre o vaguedad. Ahora bien; resulta que así es como el cerebro funciona realmente y se desenvuelven el razonamiento humano y el lenguaje natural; en general, es el modo como se comportan todos los sistemas que nos rodean. La lógica difusa también ha ayudado a que el software sea capaz de interpretar las sentencias de este tipo.

5. Aplicaciones de Lógica Fuzzy

En la lógica difusa, las declaraciones no son absolutamente ciertas o absolutamente falsas[7]. Una cosa puede ser fiel a un 5% (técnicamente, su "grado de verdad" es de 0,05). Y las variables (o categorías) no son números, manifestándose sin nombres ni fronteras lingüísticamente precisas (alto o bajo, rico o pobre, gordo o delgado, sano o enfermo, viejo o joven, caliente o frío, o bien si es "normal" o con qué grado esto ocurre, etc. Los operadores que los modifican son los de "bastante", "mucho", "demasiado", "casi", "apenas", o "no demasiado". Son los llamados "fuzzy modifiers" ("linguistic hedges", o "modificadores difusos"). Con esto se consigue atribuir un valor a cada una de esas características difusas, y ese valor se acentúa o se diluye según, por ejemplo, las diversas potencias o raíces de los valores iniciales o con expresiones polinómicas que dependan de dichas funciones. Por ello son llamados modificadores de la "intensificación" (el operador INT), o de la "expansión" (dilatación, el operador DIL), respectivamente, con efectos graduales y admitiendo todas las variaciones y combinaciones posibles. Las herramientas para trabajar con estas regiones fronterizas no se encuentran totalmente definidas en esta nueva área de las matemáticas[8].

En 1973, con la teoría básica de Zadeh de los controladores borrosos, otros investigadores comenzaron a aplicar la lógica difusa a diversos procesos mecánicos e industriales, contribuyendo cada vez más a las mejoras existentes.

Se establecieron varios grupos de investigación en universidades japonesas sobre procesos difusos. De este modo, los profesores Terano y Shibata en Tokio, junto con los profesores Tanaka y Asai en Osaka, hicieron importantes contribuciones tanto para el desarrollo de la teoría de la lógica difusa como de sus aplicaciones[9].

En 1980 el profesor Ebrahim Mamdani, en el Reino Unido[10], diseñó el primer controlador difuso para un motor de vapor, que se aplicó para controlar una planta de cemento en Dinamarca, y lo hizo -por cierto- con gran éxito.

[7] D. Dubois y H. Prade (1980).
[8] Ángel Garrido (2011).
[9] J. S.R. Jang; C.T. Sun (1995 y 1997).
[10] E. H. Mamdani; S. Assilian (1975 y 1977).

En 1987, Hitachi utilizó un controlador de lógica difusa para el control del tren de Sendai, que utiliza un innovador sistema para ser guiado autónomamente. Desde entonces, el controlador ha estado haciendo su trabajo de manera muy eficiente. Fue también durante este año de 1987 cuando la compañía Omron desarrolló los primeros controladores difusos con fines comerciales. Así que el año 1987 se considera el "fuzzy boom", debido a la gran cantidad de productos basados en lógica difusa creados para ser objeto de comercio. En 1993, la lógica difusa fue aplicada por la casa Fuji al control químico de inyección en las plantas de tratamiento del agua, por primera vez en Japón. Fue allí mismo, en el país nipón y en Corea del Sur, donde la lógica difusa ha estado brillando a mayor altura, sobre todo, en su vertiente tecnológica, debido a una estrecha colaboración entre el gobierno, las universidades y la industria[11].

Paralelamente al estudio de las aplicaciones de la lógica difusa, los profesores Takagi y Sugeno ha desarrollado el primer método para la construcción de *Fuzzy Inference Rules* (Reglas Difusas de Inferencia), a partir de los datos de formación o de Aprendizaje Automático (Fuzzy Learning).

Las aplicaciones de la lógica difusa en la vida cotidiana han crecido desde entonces con suma rapidez. De hecho, ya es parte fundamental de ella. Por ejemplo, algunas marcas de lavadora utilizan la lógica difusa, entre las que podemos citar las de Electrolux, AEG y Miele, empleando esos métodos computacionales para moderar el programa, por ejemplo, si el programa de lavado ha de ser para ropa "no muy sucia", que es un caso paradigmático de concepto vago. La técnica también está extendida para el ABS, esto es, los sistemas de frenado para los automóviles, las cámaras de enfoque automático o el control de los ascensores, los filtros de correo basura, también conocido como "spam", y los videojuegos que ahora están en todas partes. Aunque los fabricantes no quieren dar mucha publicidad a la "fuzziness" implícita en estos hechos por una razón obvia. Decir que el freno de los vehículos está controlado por la lógica difusa no pertenece a la clase de mensajes que permite vender más coches.

Para construir un sistema difuso, un científico o ingeniero podría comenzar con un conjunto de reglas difusas diseñadas por un experto. El científico-ingeniero puede definir los grados de pertenencia en la entrada de varios conjuntos borrosos, y los de salida mediante conjuntos de curvas. El sistema difuso se aproxima a una función matemática, o a una ecuación de causa y efecto.

[11] M. Sugeno (1977 y 1985).

Un resultado muy importante dice que mediante los sistemas difusos se puede aproximar cualquier función matemática continua. Bart Kosko (1993) demostró este teorema de la convergencia uniforme, mostrando que, si tomamos los "parches" borrosos lo suficientemente pequeños, estos permiten recubrir suficientemente la gráfica de cualquier función, o bien la entrada/salida de una relación. El teorema también muestra que podemos elegir de antemano el error máximo de la aproximación y estar seguros de que existe un número finito de reglas difusas para lograrlo.

Y los últimos avances en las llamadas Neural Networks, las redes neuronales o redes neurales (en términos de los programas que aprenden de la experiencia), y en los Algoritmos Genéticos (programas que evolucionan con el tiempo) son sin duda un complemento adecuado a la lógica difusa. Otra de las razones clave para una mayor investigación en este campo sería el interés en dichas redes neuronales por el parecido con los sistemas difusos. Buscando las relaciones entre las dos técnicas, y obteniendo de esta manera Tecnologías y Lógicas Neuro-Fuzzy (Neuro-Difusas), que utilizan métodos de aprendizaje basados en redes neuronales para identificar y optimizar sus parámetros[12]. Entonces, como se dijo, aparecen los algoritmos genéticos, que junto con las redes neuronales y los sistemas difusos "son herramientas muy poderosas y por lo tanto de gran interés para la investigación futura, tanto para las matemáticas actuales como para la mayoría de las nuevas, que ya están aquí, y rápidamente van tomando forma"[13].

Las redes neuronales son un modelo diseñado a partir de conjunto de "neuronas" y "sinapsis" artificiales, que cambian sus valores como respuesta a las entradas de las neuronas circundantes y de las sinapsis. La red neuronal actúa como una computadora, ya que asigna recursos y resultados. Las neuronas y las sinapsis pueden ser tanto componentes de silicio, o chips cuánticos, como ecuaciones en el software, que simulan su comportamiento.

El Aprendizaje Supervisado (o "Supervised Learning") llegó a través de las llamadas redes supervisadas, ajustando las reglas de un sistema difuso, como si fueran las sinapsis. El usuario proporciona el primer conjunto de reglas, que son refinadas por las redes neuronales mediante la ejecución a través de cientos de miles de entradas, que varían ligeramente de modo "fuzzy", estableciendo cada vez cómo de bien está funcionando el sistema. La red tiende a mantener los

[12] J. S. R. Jang (1997).
[13] M. Sugeno (1985).

cambios que vayan en la dirección de la mejora del rendimiento, y hacer caso omiso de los demás.

El modelado difuso es muchas veces utilizado para transformar el conocimiento de un experto en un modelo matemático. El énfasis está en la construcción de un sistema experto difuso que sustituya al experto humano. Asimismo, como una herramienta que puede ayudar a los observadores humanos en la difícil tarea de transformar sus observaciones en un modelo matemático. En muchos campos de la ciencia, algunos observadores humanos han proporcionado descripciones lingüísticas y las explicaciones para los diferentes sistemas. Sin embargo, a la hora de estudiar estos fenómenos, existe una necesidad de construir un modelo matemático adecuado, un proceso que normalmente requiere una comprensión matemática muy sutil. El modelado difuso resulta, pues, un enfoque mucho más directo y natural para la transformación de la descripción lingüística en dicho modelo.

Un modelo difuso representa el sistema real en una forma que se corresponde estrechamente con la manera en que los seres humanos lo percibimos. Así, el modelo es claramente comprensible, y cada parámetro tiene un significado fácilmente perceptible. El modelo puede ser hábilmente modificado para incorporar nuevos fenómenos, y si su comportamiento es diferente de lo esperado, por lo general es más fácil encontrar la regla que se debe modificar y saber cómo hacerlo. Además, los procedimientos matemáticos utilizados en el modelado difuso se han probado muchas veces, y sus técnicas están relativamente bien documentadas.

La posible "mala reputación", aparte de la agria polémica sobre la lógica difusa, además de los consabidos prejuicios, está posiblemente –al menos, en parte- basada en un nombre que debió ser posiblemente mal elegido, como se ha señalado muchas veces. Porque la lógica llamada difusa no es difusa en sí misma, ya que tiene una definición matemática precisa, aunque sí lo es, en cambio, el mundo sobre el cual se aplica, incluida nuestra percepción de sus límites y de las categorías[14].

[14] J. Velarde (1996); R. Yager (1980).

6. Conclusiones

La investigación sigue adelante con el apoyo de la lógica difusa, lo que sirve para seguir avanzando la Ciencia en los principales países[15], si hablamos en términos de progreso económico y tecnológico, incluso en países con menor cultura científica, o más tradicional y de tipo más estático, como bien puede ser la del territorio español, o países similares. Pero los grupos que se han formado al menos intentan hacer avanzar la ciencia siempre bastante precaria en diferentes "grados", pero siguiendo esa misma y prometedora dirección. También cuando se analizan en profundidad tienen grandes derivaciones y consecuencias (sobre todo, en los fundamentos matemáticos y filosóficos), lo que influye –querámoslo o no- en los más apasionantes desafíos del futuro[16].

Hay dos obstáculos principales que vienen impidiendo su divulgación completa, así como la absorción de esta nueva forma de pensar frente a la ciencia, por lo menos en algunos de sus campos. Se trata de la visión tradicional de los temas matemáticos, repetidos del mismo modo, hasta la saciedad, incluso cuando hace mucho que ya han perdido interés y eficacia. Por lo tanto, hay quienes ignoran esta nueva ciencia, en parte por ignorancia, por arraigados prejuicios, y en parte también por un visceral desprecio.

Otra dificultad importante es que por algunos se vea la "fuzzy logic" como una herramienta útil para todo, pero no muy consistente desde el punto de vista teórico, considerada por ello con desdén, ya que son a menudo cuestiones técnicas ajenas a la torre de marfil en que se han atrincherado no pocos matemáticos. Y es que puede ser muy perniciosa y absurda esta situación, si por mucho tiempo subsiste, para determinados países no precisamente muy avanzados.

La ciencia (con la filosofía) y la tecnología se perderán o se salvarán juntas. Todas ellas tienen un origen común y son poco más que una diferente visión, desde distintos enfoques, pero a menudo convergentes, de una misma realidad, que presenta muchas facetas. Lógicamente, si una cosa resulta además útil, será esta la mejor situación posible. Pues cuenta no sólo la belleza, sino también la utilidad. El mundo real no es preciso y las nociones de vaguedad, la incertidumbre,

[15] Lofti A. Zadeh (1975 y 1989).
[16] Ángel Garrido (2011); T. Williamson (1994).

la imprecisión…, estos son conceptos y percepciones que resultan fundamentales en la manera en que los seres humanos abordan y resuelven los problemas.

Es preciso señalar que algunos avances, como por ejemplo los operadores de agregación (las T-normas, las T-conormas, etc.), así como en el modelado difuso, son cruciales. Y junto a todo este desarrollo, nuevas generalizaciones de las teorías matemáticas que nos permitan avanzar en el tratamiento de la incertidumbre, a la espera de crear una nueva matemática, más "pegada" y próxima a la realidad.

Es también importante observar que en ciertos otros campos, aparentemente alejados del tratamiento de la borrosidad, tales como son los de la simetría y la entropía, se ha entrado en nuevas vías de investigación, como la simetría aproximada, la entropía aproximada, los gráficos borrosos, y así sucesivamente.

Acerca de mi país, por poner algunos ejemplos, debemos mencionar el grupo de trabajo que funciona en el Departamento de Inteligencia Artificial de la Universidad de Granada, o el Centro de Investigación en Inteligencia Artificial y Soft Computing, establecido en la localidad de Mieres, y que ha sido creado por el Gobierno del Principado de Asturias. También hay un esforzado grupo de investigadores trabajando en Barcelona, en Granada, Navarra o en Madrid, sobre diversos temas de Lógica Difusa.

Agradecimientos.

Este trabajo se ha realizado bajo los auspicios del Proyecto de Investigación FFI 2011-29623, que lleva por nombre *"El papel de las polémicas en la producción de las prácticas teóricas y en el fortalecimiento de la sociedad civil"*, cuyo investigador principal fue hasta su fallecimiento el añorado Profesor Quintín Racionero Carmona, y actualmente lo dirige la Profesora Cristina de Peretti. La institución convocante es el MYCINN español. Agradecemos públicamente su ayuda y sabio consejo.

Referencias

DUBOIS, D. Y PRADE, H. (1980), *Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications,* New York: Academic Press.

GARRIDO, A. (2011), "Searching the Arcane Origins of Fuzzy Logic", *BRAIN (Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience),* vol. 2/2, pp. 51-57, Bacau.

— (2015). Las lógicas de nuestro tiempo. Madrid: Dykinson.

JANG, J. S. R. (1991), "Modelado Difuso: su uso generalizado en Redes Neuronales y el algoritmo de Kalman Filter", *Proceedings de la Conf. Nacional en Inteligencia Artificial (AAAI-91),* pp. 762-767.

JANG, J. S. R. AND SUN, C. T. (1995), "Neuro-fuzzy modeling and control". *Proceedings of the IEEE,* March.

— (1997), *Neuro-Fuzzy Computing and Soft Computing.* Prentice Hall.

KOSKO, B. (1993), *Fuzzy Thinking: The New Science of Fuzzy Logic,* Hyperion.

MAMDANI, E. H, AND ASSILIAN, S. (1975), "Un experimento en la síntesis lingüística con un controlador de lógica difusa". *International Journal on Man-Machine Studies,* vol. 7/1, pp. 1-13.

— (1976), "Avances en la síntesis lingüística de los controladores difusos". *International Journal on Man-Machine Studies,* vol. 8, pp. 669-678.

— (1977), "Aplicaciones de la lógica difusa para el razonamiento aproximado utilizando la síntesis lingüística", *IEEE Transactions on Computers,* vol. 26/12, pp. 1182-1191.

RUSSELL, B. (1988), *"Vagueness".* Texto leído ante la Sociedad de Jowett, Oxford, 25 de noviembre de 1922. Publicado por primera vez en *The Australasian Journal of Psichology and Philosophy,* 1 (junio de 1923, pp. 84-92). Este texto puede también ser encontrado en sus *Collected Papers,* vol. 9: *Essays on Language, Mind and Matter 1919-26*, London: Routledge.

SUGENO, M., "Fuzzy Measures and Fuzzy Integrals" (MM Gupta, Saridis GN, y Gaines BR, editores), F*uzzy Automata and Decision Processes,* pp. 89-102, North-Holland, NY, 1977.

— (1985), *Industrial applications of Fuzzy Control,* Elsevier Science Pub. Co.

VELARDE, J. (1996), "Pensamiento difuso, pero no confuso: de Aristóteles a Zadeh y vuelta". *Psicothema,* vol. 8/ 2, pp. 435-446.

WILLIAMSON, T. (1994), *Vagueness.* London: Routledge.

Yager, R. (1980), "Sobre una clase general de conectivas difusas", *Fuzzy Sets and Systems,* 4, pp. 235-242.

Zadeh, L.A. (1965), "Fuzzy Sets", *Information and Control,* vol. 8, pp. 338-353.

— (1973), "Esbozo de un nuevo enfoque para el análisis de sistemas complejos y los procesos de toma de decisiones", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics,* vol. 3/1, pp. 28-44.

— (1975), "El concepto de una variable lingüística y su aplicación al razonamiento aproximado, partes 1, 2 y 3", *Ciencias de la Información,* vols. 8, pp. 199-249 y pp. 301-357; 9: pp. 43 -80.

— (1988), "Fuzzy Logic", *Informática,* vol. 1, N ° 4, pp. 83-93, 1988.

— (1989), "La representación del conocimiento en lógica difusa". *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering,* vol. 1, pp. 89-100.

Recibido: 10/02/2016

Aceptado: 16/11/2016