

SOBRE EL DESARROLLO DE LA LÓGICA BORROSA

Óscar PORTELA¹

ABSTRACT. Over the last decades, a new branch has been added to the corpus of formal theories of reasoning: fuzzy logic. Showing an impressive potential, its development has quickly evolved from the theoretical playground to the practical applications, with a vast number of actual researchers joining their efforts to yield further advancements. However, tracing a faithful history on this development is, as happens every time such attempt is pretended, somehow difficult because of a number of factors associated with the task. One of the consequences is that, being usually based on a personal, subjective point of view, the results given are bound to the chronicler opinions, as well as their relative value. Aiming to offer an alternative to this approach, some steps are here presented by means of several indicators derivate from the study of a comprehensive set of literature on the subject. A perspective established over such elements will, hopefully, enable a view on the history of fuzzy logic oriented to a clearer scope.

1. Introducción

Recorrer la senda demarcada por una rama del conocimiento es trazar una historia. En ella, los distintos avances y retrocesos, las ideas brillantes y las épocas de oscuridad, se entremezclan conformando una región de particular belleza. Esta, más que originarse en las frías nociones elaboradas o en sus flamantes

¹ portela@acm.org

resultados y aplicaciones, brota de la esencia misma de la actividad humana: no es la materia la que decide desvelar sus misterios ante nosotros, sino que una suerte de aventureros, pertrechados tan solo con los retazos heredados de sus precursores, nos han brindado con sus esfuerzos las nuevas que ahora tenemos por hechos sólidos.

El relato sobre cómo una determinada idea se ha ido desarrollando a lo largo del tiempo debe prestar atención, por tanto, no solo al papel protagonista interpretado por ésta, habiendo de tomar en consideración también al gran número de actores secundarios que aparecieron en uno u otro momento a su alrededor. Pese a todo, cabe conceder que no todas las contribuciones realizadas gozan de una misma relevancia. La aportación de conocimientos y el impacto que su encuentro tuvo en la personalidad del campo establece de algún modo una distribución de unos y otros individuos en diferentes categorías según su trabajo. Aún así, la teoría es, por lo general, muda ante estos detalles y, ante la ausencia de un juicio objetivo, que solo podría ser promulgado desde la teoría misma, recae sobre nuestros hombros la responsabilidad de ponderar en su justa medida la respectiva importancia de las distintas pinceladas y trazos.

Por la naturaleza de esta labor, muchas serán las personas que desaparecerán en el olvido injustamente, mientras que otras se beneficiarán de una difusa atribución de los esfuerzos ajenos. Sin embargo, y no estando exentos de esta misma problemática en ciertos aspectos, es posible afianzar las raíces del relato desde un punto de vista diferente al convencional. Si la lógica borrosa es el área de conocimiento sobre la que recae nuestro interés, parece cuanto menos razonable tratar de buscar en los documentos y registros existentes las huellas que encaucen con la mejor fortuna nuestra perspectiva. Es cierto que la arraigada tradición hermenéutica ya suele tomar en cuenta este extremo al conducir sus investigaciones pero, al mismo tiempo, sigue siendo la observación de un individuo la que establece hechos y relaciones, quedando supeditado el resultado final a la postura adoptada por el sujeto.

La elaboración de parámetros formalmente definidos a partir de la literatura no es, en sí, una idea especialmente nueva. De hecho, ya en 1885, Alphonse de Candolle busca indicios relacionados con la historia de la ciencia a través de esta clase de medios y, desde principios del siglo XX, otras investigaciones han buscado afianzar las respuestas dadas de un modo similar. No obstante, la evo-

lución de la lógica borrosa representa, en dicho contexto, un objeto de estudio particularmente apropiado. Ello se deriva de la reciente aparición de esta disciplina como tal y, como consecuencia, de la abundante cantidad de información al respecto que existe desde el mismo momento de la publicación del trabajo pionero de Lofti A. Zadeh, en 1965. Por tanto, si en la labor historiográfica que se pretende acometer, se aspira a juzgar los elementos involucrados con una cierta suerte de imparcialidad, hasta donde esta resulta posible, parece un sostén deseable aquel del que puede dotar la bibliometría. De ella se hará uso pues, siendo conscientes de sus limitaciones y matizando los productos mostrados, a fin de articular de mejor manera la exposición ofrecida.

2. Algunos antecedentes

La historia de la ciencia, vista esta como tal, esto es, como proceso perennemente inacabado, no debe sino ser construida desde de sus orígenes hacia el presente, y no a la inversa, ya que, lejos de hallarnos en una posición final en que contemplar el pasado como parte de un sendero que nos condujo hasta el momento actual, estamos aún inmersos al comienzo de ese camino, recordando vagamente de donde venimos y sumidos en la incertidumbre de los parajes que aún habremos de visitar. El año de 1965, al que ya se ha hecho mención, es frecuentemente declarado como aquel en que tuvo lugar la fundación de la lógica borrosa, pero esta afirmación no puede ser hecha sino con una cierta cautela. Del mismo modo que otras ramas de la ciencia moderna tuvieron precedentes anteriores a su definición matemática y formal, existen reflexiones al respecto previas a esa fecha. Sin embargo, ello no ha de suponer un ensombrecimiento del éxito alcanzado, más bien al contrario, representa también el comienzo de la autentica conquista sobre una idea cuya verdadera aprehensión evitó numerosas veces a la mente humana.

En una mirada retrospectiva, podría decirse que los primeros escauceos de que se tiene noticia con las nociones propias de la lógica borrosa se remontan al siglo VI a.C., en la antigüedad de la India oriental. Es allí donde aparece la personalidad de Siddharta Gautama, más conocido bajo el nombre de Buda, en cuyo ascetismo la inteligencia, el raciocinio, constituyen la clave para el acceso a la liberación y la paz de espíritu. En ese marco, fruto de la meditación, nace el concepto de que todo participa en cierta medida de su opuesto. No existe por tanto el blanco ni el negro, sino una amplia y variada gama de matices de gris: la

realidad del mundo radica en la contradicción entre elementos discordantes, aunque ligados por su misma esencia.

Como gusta hacer servir de ejemplo Bart Kosko ([11]), si tomamos una manzana y le damos un mordisco, ¿es todavía una manzana? Damos otro mordisco, ¿sigue siendo una manzana? ¿Cuándo se traspasa la línea que separa el ser una manzana del no serlo? Cuando se tiene media manzana, se tiene tanto una manzana como no se tiene: la media manzana impide una descripción de todo o nada. La media manzana es una manzana borrosa: participa tanto de su existencia como de su no existencia simultáneamente. Podría argüirse que considerar la relación entre el budismo y lógica borrosa en estos términos es fruto de una lectura sesgada de los textos clásicos, pero, incluso de ser así, la inclinación natural de sus contenidos hacia la discusión lógica hacen que, en cualquier caso, deba citarse el budismo como una primera influencia a destacar en la genealogía que nos atañe.

Otras dos figuras de la antigüedad aparecen asimismo al seguir la pista de esta idea, ambas situadas en la Grecia clásica. En una primera etapa, e influido por las consideraciones afines a los reiterados intentos de refutar las doctrinas de sus coetáneos sofistas, Platón se ve enfrentado a la dicotomía entre lo verdadero y lo falso. A pesar de no existir hasta aquel momento una lógica bivalente con la que contrastar, en sus vagos bosquejos de lógica se propone la existencia de una tercera categoría o región entre ambos, reuniendo en su seno lo indeterminado. Si bien el carácter de este planteamiento queda en relación con las artes dialécticas y retóricas propias de las discusiones que le atañen, podría decirse que esta es la semilla que origina, en occidente, la inspiración para la lógica multivaluada que siglos después nacería bajo una visión similar.

Su discípulo, Aristóteles, ha de ser considerado un hito ineludible en la historia de un gran número de disciplinas. La lógica, en particular, tuvo con él su primer reconocimiento como área independiente de conocimiento, al tiempo que se vio desarrollada a un ritmo sin parangón en su devenir posterior. Por tanto, sea cual sea el epígrafe que acompañe a esta —borrosa, modal, matemática, etc.—, su desarrollo encontrará un nodo trascendente en la vida y obra de Aristóteles. No obstante, el sistema lógico bivalente que definiría, pese a resultar sólido y perfectamente funcional en una realidad discreta, encuentra su límite de uso al ser aplicado indiscriminadamente en un entorno continuo de compleji-

dad mayor. El mismo Aristóteles parece apreciar esta inconveniencia al tratar, entre otros casos, con las dificultades para discurrir sobre sucesos futuros o al conceptualizar los términos medios de las virtudes que examina en la ética nicomaquea. Se habla, por ejemplo, de la valentía definida en relación al temor: el cobarde será el que teme en exceso y el temerario el que no teme en absoluto. El virtuoso valiente habrá de ser quien se encuentre entre ambos términos. Sin embargo, según el modelo peripatético, esto no permitiría identificar con rigor a tal individuo como aquel que teme o aquel que no teme. Esta inconveniencia queda, pese a todo, obviada por el impacto cultural de la teoría y el marco histórico posterior, que facilitaron la supremacía absoluta de este esquema durante más de dos mil años, sin llegar a resolver tales cuestiones sino a través de circunloquios.

Para acercarse a la forma matemática de la lógica, en que la lógica borrosa habría de encontrar continente, pese a los sustanciales cambios que introduciría en el contenido, es necesario llegar hasta el siglo XVII. El autor de esta empresa fue el filósofo y matemático alemán Gottfried W. Leibniz quien, tras tomar contacto en su juventud con las nociones aristotélicas, comenzó a desarrollar sus propias ideas sobre cómo mejorar dicho sistema. Convencido de que todo razonamiento debía ser expresado a través de un lenguaje riguroso, exacto y universal, sus esfuerzos dieron lugar al que habría de ser el primer lenguaje artificial para la lógica. Por desgracia, buena parte de los resultados obtenidos permanecieron sin publicar durante demasiado tiempo y no fueron reconocidos hasta el siglo XIX, cuando el valor de dichas aportaciones ya se encontraba notablemente ensombrecido por otros frutos de la investigación del periodo.

De entre los sueños no realizados de Leibniz, quizá aquellos referidos a la creación de un lenguaje perfecto fueran los que más lejos se hallaran de verse cumplidos en su totalidad. Sin embargo, desde el punto de vista de algunas de las propiedades perseguidas, quizá la reformulación algebraica de la lógica, obra de Boole, habrían satisfecho parcialmente las expectativas postuladas. Esta genial contribución permitió reducir las formas lógicas a ecuaciones con las que operar de la manera habitual. De este modo, se heredó un cuerpo matemático impecable sobre el que sentar las bases de posteriores avances. Sin necesidad de entrar en más detalles a este respecto, por la propia naturaleza de la lógica borrosa, es evidente el valor de este patrimonio para que la susodicha teoría pudiera aparecer.

Y así, si bien numerosas personalidades habrían de sucederse en lo tocante a la renovación de la lógica clásica, la lógica borrosa debe esperar hasta 1920 para encontrar un nuevo referente en el recorrido por sus antecesores más destacados. Siguiendo el razonamiento ya planteado por Platón de que había de existir, *de facto*, una región intermedia entre los dos valores tratados hasta la fecha, Jan Łukasiewicz, presentó una lógica con tres valores de verdad en el citado año. Aunque hubo que esperar hasta 1931 para que tal construcción fuera axiomatizada por Wajsberg, los años siguientes fueron testigos de cómo un gran número de interpretaciones brotaba, dotando de semántica las distintas formulaciones derivadas de diferentes tablas de verdad. Empero, la actividad de Łukasiewicz no se detuvo aquí, sino que planteó asimismo otras posibilidades con cuatro y cinco valores de verdad, llegando finalmente a la hipótesis de que una lógica basada en infinitos valores debía ser posible.

Sin que ello deba restar importancia al trabajo de Łukasiewicz, la consecución de la idea de trivalencia no fue patrimonio exclusivamente suyo, aunque frecuentemente se le reconozca como su artífice legítimo. También en 1920, aunque con independencia entre ambos, Emil Post publicó otro sistema de características similares partiendo de diferentes premisas. Más aún, algunas fuentes apuntan a que, tres años antes, David Hilbert y Paul Bernays habían alcanzado, e incluso superado, estos resultados. El hecho de que estos hallazgos permaneciesen en el anonimato, por no ser divulgados convenientemente, les relevó sin embargo del reconocimiento de sus progresos. En palabras del propio Emil Post, en una carta a Gödel en torno a un tema similar: «[...] *after all it is not ideas but the execution of ideas that constitute a mark of greatness*».

La última contribución a contemplar, antes del año señalado, vino dada por el matemático Max Black quien, en 1937, publicó un artículo sobre conjuntos borrosos que, no obstante, paso notablemente desapercibido en aquel momento: «*Vagueness: An exercise in logical analysis*». En él se encuentra el primer intento para formalizar con precisión la teoría de conjuntos en aquellos casos donde la función de pertenencia esta caracterizada como una curva. Tal sustrato teórico habría de cimentar en cierta medida la ya inminente lógica borrosa.

3. Origen de la información

A fin de abordar el periodo que abarca desde 1965 hasta la actualidad, se ha recopilado un amplio número de datos sobre artículos del periodo en relación con la lógica borrosa, y aparecidos en distintas revistas. La fuente de estos no es otra que el *Science Citation Index* (SCI), una monumental base de datos conteniendo de información bibliográfica sobre las más importantes publicaciones científicas creada en 1961 por Eugene Garfield y el *Institute for Scientific Information* (ISI). El hecho de que el susodicho repositorio no cubra la totalidad del espectro de publicaciones periódicas existentes se encuentra compensado por la total exhaustividad en el procesamiento y análisis de las incluidas, cuyo número no es en absoluto despreciable, y que al mismo tiempo resultan las de mayor relevancia en la comunidad de investigadores.

Tras realizar una consulta sobre la base de datos aludida, consistente en la disyunción *FUZZY SETS OR FUZZY LOGIC*, se obtuvo un conjunto de registros con las estadísticas que figuran en la tabla próxima a estas líneas.

Artículos	6.721
Documentos referenciados	69.211
Referencias	131.231

Tabla 1

En la distribución temporal de los productos escritos, fruto de las actividades de I+D, se puede apreciar una clasificación correspondiente al grado de madurez de la investigación ([6]). En general, los artículos de revistas se encuentran en una fase avanzada de este ciclo recibiendo, simultáneamente, el mayor número de citas a medio y largo plazo, por delante incluso de otros textos que presentan conocimientos aún más arraigados, normalmente en forma de libro. Ello dota al material examinado de un valor aún mayor por la bondad de que se revisiten ante los fines establecidos.

Según la ley de Bradford, existe una partición de las revistas en un determinado campo de modo que se establecen tres áreas, cada una conteniendo aproximadamente un tercio de los artículos en total. Se identifica, en consecuencia, un núcleo compuesto por las principales revistas, una

Área	Revistas	Artículos
Núcleo	12	2.270
2.ª Zona	122	2.197
3.ª Zona	1.116	2.254
Total	1.250	6.721

Tabla 2

segunda zona, con el mismo número de artículos pero más diseminados, y una tercera zona con la muchedumbre de revistas restantes, aunque con un limitado aporte individual. Si bien cabe conceder que el SCI cubre un segmento ya menguado respecto de la oferta real, sí es cierto que el volumen manejado permite en cualquier caso aplicar la citada ley proporcionando resultados interesantes.

Observando con mayor detalle el núcleo obtenido, se incluye en la *tabla 3* el desglose de aquellas revistas que, por tanto, juegan un papel más destacado

Art.	Revista
1.146	Fuzzy Sets and Systems
183	IEEE Transactions of Fuzzy Systems
156	Information Sciences
149	IEEE Transactions on Systems, Man and Cibernetics
106	European Journal of Operational Research
98	International Journal of Intelligent Systems
84	International Journal of Approximate Reasoning
77	Engineering Applications of Artificial Intelligence
73	Lecture Notes in Computer Science
69	International Journal of General Systems
66	IEEE Transactions on Industrial Electronics
62	Journal of Intelligent and Fuzzy Systems

Tabla 3

dentro de la temática que nos ocupa. Un detalle notable es el que, si esta reducida lista se compara con las que iniciados en el área ofrecen en sus páginas personales como de lectura recomendada, se aprecia una gran concordancia entre ellas, lo cual valida en cierto modo los resultados con las nociones tácitas de carácter empírico propias del experto.

4. Hitos significativos

Acoger un repertorio de datos como narradores de la saga que propició su existencia supone, en cierto modo, ser espectadores ante un relato que se ha de desvelar. No obstante, al igual que el ocasional del teatro acude a presenciar una obra conocedor de algunos retazos intuidos tras leer las opiniones de los críticos del género, también aquí son conocidas algunas facetas de lo que aconteció. Esto, empero, servirá para dotar de detalles e interpretaciones las trazas que se reúnen a continuación.

Desde una perspectiva global, al examinar la distribución de documentos incluidos en la muestra, se aprecia una inflexión en la producción de literatura al inicio de la década de los noventa, correspondiente a la popularización del

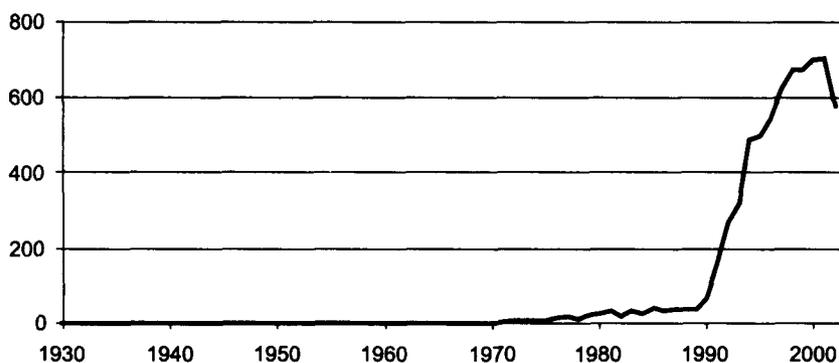


Figura 1. Distribución de documentos.

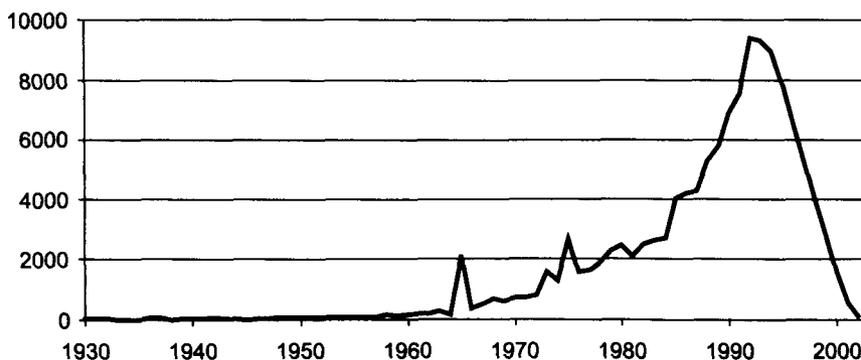


Figura 2. Distribución de citas.

paradigma representado por la lógica borrosa y la subsiguiente avalancha de aplicaciones usuarias del mismo. Simultáneamente, la distribución de citas también refleja en cierto modo este efecto, aunque atenuado por la dispersión de las referencias y por el hecho de que, normalmente, las citas más abundantes son realizadas sobre material que tiene entre diez y veinte años en el momento de su inclusión. Los picos que se elevan sobre la curva representada tienden a corresponderse con la aparición de trabajos de gran impacto, sin que sea necesario explicar la ocurrencia emplazada en 1965 y producto del artículo de Lofti A. Zadeh «*Fuzzy Sets*». Esta es la apreciable huella del grito primal de la lógica borrosa al nacer, a la que seguiría un alboroto bastante superior cuando comenzó a dar los primeros pasos.

La indicación de cuales son las aportaciones de mayor importancia que ha experimentado el cuerpo de la lógica borrosa no ha de resultar, sin embargo, una oscura tarea de dudosa cimentación. Precisamente gracias a la posesión de este importante número de citas cabe realizar un análisis cuantitativo que, dotado de la semántica pertinente, proporcione la mirada cualitativa que se persigue ([2,4]). Los orígenes de este análisis surgen de la esencia misma de las referencias. Cabe considerar que estas se derivan sustancialmente de un reconocimiento a investigaciones anteriores sobre las cuales se apoya la actual, así como otras que le son relevantes. Por tanto, parece apropiado considerar la existencia de una suerte de correlación el número de citas que tienen como objeto un determinado texto.

Si bien el mero recuento de citas podría dar lugar a patrones positivos que examinar, se ha preferido considerar la noción de que no toda cita es igual de valiosa. Ser citado en un trabajo de marcado impacto resultará en una mayor gloria de la propia obra que cuando la referencia aparezca en un documento superfluo. Como la importancia de un artículo se estima en función de las citas que recibe, y estas en función de la importancia de los artículos que las contienen, se establece una definición recursiva del peso específico de cada elemento conocido, que se propagará a través de la red conformada por estos y sus enlaces. Cada artículo emitirá un voto de peso equivalente al suyo propio quedando repartido homogéneamente entre todas las referencias presentes en sí mismo. El cálculo de los valores asociados a cada artículo proporcionará, en consecuencia, una mejor aproximación a la búsqueda de los hitos acaecidos en el progreso de esta lógica.

El método esbozado no es otro, en realidad, que el conocido *Pagerank* ([3]) asiduamente utilizado en el popular motor de búsqueda *Google*, aunque sus aplicaciones van más allá de esta herramienta particular. Para el presente estudio, en concreto, se realizó una implementación del algoritmo tal y como es descrito en [8], utilizándola con un factor de decaimiento de 0.5 y sin reducir en ningún caso el número de objetos a tratar. Dado que no todas las citas que aparecen en el conjunto de datos quedan resueltas en dicha recopilación, sino que se observa una tendencia opuesta, cabe plantearse, por otra parte, hasta que punto los resultados posibles son esencialmente distintos de los producidos por el mero recuento de referencias. En el caso extremo de que todas las citas fueran dirigidas contra artículos externos a la muestra, el resultado sería, en efecto, similar a través de ambos métodos. Sin embargo, la apreciación final a medida que el porcentaje de referencias resueltas aumenta cubre mejor el cuerpo de publicaciones

sobre la materia, según los argumentos presentados. De cualquier manera, es precisamente el hecho de que puedan existir citas a documentos ajenos a los que se dispone lo que hace posible que, aún cuando la muestra sea una representación parcial de la literatura existente en realidad, se logre obtener resultados consistentes.

Tras aplicar el procedimiento descrito, se incluyen a continuación los veinte trabajos que dieron lugar a los valores más elevados. Antes de examinarlos cabe, sin embargo, puntualizar algunas de las objeciones que el análisis de citas ha propiciado como instrumento ([10]), a fin de poner sobre aviso de algunas de las limitaciones presentes. Estas se deben a que en ocasiones, las citas se emplean con fines distintos a los que debieran, por ejemplo, al introducir menciones por motivos sociales o sintiendo la necesidad de forzar relaciones con autoridades más o menos reconocidas. Otras veces son la omisión de citas o las referencias a uno mismo las que introducen el sesgo, etc. Con todo, mientras exista la capacidad de dotar a los resultados ofrecidos de un carácter relativo en su lectura, es cuanto menos interesante examinar la propuesta.

Un detalle llamativo tras la mirada inicial a la lista es la aparición de cuatro trabajos que, si bien reciben un número mínimo de citas, gozan de una posición privilegiada. Se trata precisamente de aquellos objetos mencionados como antecedentes al artículo que encabeza el compendio. Siendo, al menos desde la perspectiva adoptada, los precursores directos a la aparición de la lógica borrosa, queda justificada su aparición si bien esta se ve precipitada por el exacerbado peso de «*Fuzzy Sets*». No es esa, sin embargo, la única mención a Lofti A. Zadeh quien, por el contrario, aparece en varias ocasiones más jugando un papel sin duda significativo en el desarrollo del área que él ayudó a fundar. Asimismo, como cabía esperar, eventos que constituyeron un avance substancial en la historia que nos atañe tienen aquí su reflejo, quedando señalados, no solo como meras anotaciones abstractas, sino con la entidad propia de su manifestación original.

Sin desear con ello incurrir en una desatención del resto de entradas, es oportuno reseñar los factores presentes tras algunas de ellas, aclarando al mismo tiempo el origen de su importancia. Así, en la aparición de las primeras aplicaciones industriales de la lógica borrosa encontramos a Ebrahim Mamdani, quien a principios de los años 70 desarrolló un sistema de control para un generador de vapor, al tropezar con la ineficacia de los métodos convencionales, convirtiéndose en

Citas	Publicación
1.641	ZADEH, L. A., «Fuzzy Sets», <i>Information and Control</i> , 1965, pp 338-353
752	LEE, C. C., «Fuzzy-Logic in Control-Systems – Fuzzy Logic Controller», <i>IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics</i> , 1990, pp 404-418
786	ZADEH, L. A., «The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning», <i>Information Science</i> , 1975, pp 199-249
577	ZADEH, L. A., «Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes», <i>IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics</i> , 1973, pp 28-44
454	KOSKO, B., <i>Neural Networks and Fuzzy Systems</i> , Prentice Hall, New Jersey, 1991
440	DUBOIS, D., PRADE, H., <i>Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications</i> , Academic Press, New York, 1980
122	KAUFMANN, A., <i>Introduction to the Theory of Fuzzy Subsets</i> , Academic Press, New York, 1975
268	MAMDANI, E. H., ASSILIAN, S., «Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller», <i>International Journal of Man-Machine Studies</i> , 1975, pp 1-13
238	ZIMMERMANN, H. J., <i>Fuzzy Set Theory and its Applications</i> , Kluwer Academic Publishers, Boston, 1991
279	TAKAGI, T., SUGENO, M., «Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modelling and Control», <i>IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics</i> , 1985, pp 116-132
242	MAMDANI, E. H., BAAKLINI, N., «Prescriptive method for deriving a control policy in a fuzzy logic controller», <i>Electronics Letters</i> Vol. 11, 1975, pp. 625-626
11	KLEENE, S. C., <i>Introduction to Methamematics</i> , Van Nostrand, New York, 1952
298	ZADEH, L. A., «Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility», <i>Fuzzy Sets and Systems</i> , 1978, pp 3-28
4	HALMOS, P. R., <i>Naive Set Theory</i> , Van Nostrand, New York, 1960
3	BIRKHOFF, G., <i>Lattice Theory</i> , Am. Math. Soc. Colloquium Publications, Providence, 1948
2	BELLMAN, R., KABALA, R., ZADEH, L. A., «Abstraction and Pattern Classification», <i>RAND Memorandum RM-4307-PR</i> , 1964
188	BELLMAN, R., ZADEH, L. A., «Decision Making in a Fuzzy Environment», <i>Management Science</i> , 1970, pp 141-164
204	KLIR, G. J., FOLGER, T. A., <i>Fuzzy Sets, Uncertainty and Information</i> , Prentice Hall, New Jersey, 1988
220	WANG, L. X., <i>Adaptive Fuzzy Systems and Control</i> , Prentice-Hall, New Jersey, 1994
189	PAVELKA, J., «Fuzzy Logic: Many-Valued Rules of Inference», <i>Zeitschrift fur Mathematische Logik und Grundlagen Der Mathematik</i> , 1979, pp 45-52

Tabla 4

pionero en tal empresa. Hans Zimmermann, por su parte, introdujo la nueva lógica en los sistemas de ayuda a la decisión, donde arraigó en los años sucesivos. Si bien la industria Europea no reconoció la valía del enfoque de inmediato, si que algunas compañías japonesas hallaron una fuente de inspiración y comenzaron a usar soluciones de control borrosas en proyectos de envergadura, como una planta de tratamiento de aguas obra de Fuji Electric, o el conocido control de Hitachi para una red de tren metropolitano inaugurado en 1987.

En lo tocante al marco conceptual, Bart Kosko, al que ya se ha mencionado, fue el responsable de algunas de las mayores contribuciones al ámbito teórico de la lógica borrosa, demostrando que esta es esencialmente distinta de la probabilidad, a la que de hecho contiene como caso particular. Asimismo, probó el teorema según el cual los sistemas basados en reglas borrosas suponen un sistema universal de computación: la teoría de aproximación borrosa. Otra de sus hazañas, y de hecho es la que aquí aparece de relieve, es la de haber unido la lógica borrosa con las redes neuronales, ampliando así el potencial de la inteligencia artificial conexionista. Kosko no es, por otra parte, el único productor de fundamentos teóricos que aparece realzado por su labor práctica. Michio Sugeno, que ya en 1972 aportó nociones como las de medida e integral borrosa, es el autor de múltiples exhibiciones del potencial inherente al control borroso, como el helicóptero que lleva su nombre. Dicho vehículo es capaz de volar, y realizar maniobras de despegue y aterrizaje, siguiendo las indicaciones generales dadas oralmente por un interlocutor humano, gracias a esta tecnología. Ha sido precisamente en su faceta de controlador donde la lógica borrosa ha tenido hasta ahora su mayor popularidad entre las aplicaciones posibles.

La aparición entre las publicaciones mostradas de un elevado porcentaje de libros, frente a la difusión inicial de resultados sobre estas innovaciones en forma de artículos, se debe fundamentalmente al carácter más detallado de los primeros. Así, en dicha edición posterior de los conceptos involucrados, se elabora su contenido y, por tanto, adquiere las citas que de otro modo habrían ido dirigidas a los escritos anteriores.

5. Personalidades relevantes

La aproximación mostrada respecto del conjunto de registros examinado resulta, sin estar exenta de consideraciones críticas en uno u otro sentido, plau-

sible y apropiada en la búsqueda de nociones válidas sobre el devenir de la lógica borrosa. Sin embargo, cuando de observar los autores de mayor peso se trata, se encuentra una cierta problemática que invalida, o cuanto menos cuestiona, el acierto de aplicar un mismo método. Ello es fruto de que, en el *Science Citation Index*, la lista de referencias de cada artículo solo incluye el nombre del primer autor de cada obra citada, con lo que, de no ser posible resolver la cita y, de ese modo, obtener la información omitida, el retículo de relaciones consiguiente estaría excesivamente sesgado.

El mero recuento de citas queda desaconsejado por idénticas razones. Si bien existen algunas tendencias que asocian una importancia mayor a ciertas posiciones en el orden de presentación de los autores, no hay un consenso que pueda garantizar someramente que el primer autor indicado pueda corresponder a aquel más meritorio en lo tocante a esa contribución. Por tanto, habiendo desestimado esta clase de análisis, se ha adoptado otro enfoque en esta ocasión. Estableciendo la premisa de que la muestra tomada es representativa del conjunto de la producción en la susodicha disciplina, cabe plantear la hipótesis de que el volumen de trabajos en que aparece un autor en la muestra es proporcional a la frecuencia real de tal evento. Así, resulta razonable pensar que, entre los 9290 individuos identificados como autores de los artículos de la muestra, se encuentre buena parte de los que gozan de una actividad más destacada en la comunidad de investigadores y estudiosos de la lógica borrosa. Al mismo tiempo, cabe esperar también que dichas personas participen de un mayor número de sucesos que el resto.

Este hecho puede, no obstante, ser considerado cierto solo en parte puesto que las motivaciones de unos y otros individuos se ven orientadas de diferente manera según su condición. Mientras que en el ámbito académico se observa una actitud favorable hacia la disseminación de descubrimientos, avances y resultados; el personal integrado en la industria goza de una postura esencialmente opuesta. Esto es debido a la naturaleza de la industria vinculada al sistema económico vigente, que promueve la reserva en torno a los productos obtenidos en la investigación a fin de recuperar la inversión inicial y maximizar los beneficios posicionándose mejor que la competencia. Por el contrario, en círculos universitarios y similares, no solo se valora la puesta en común de los últimos avances, sino que además es habitual valorar a sus miembros según el volumen y la calidad de sus publicaciones. En consecuencia, el punto de vista que nos atañe habrá de presentar una relativa incidencia negativa a tales efectos.

Por otra parte, el mero uso de la producción absoluta presente en la muestra y asociada a uno u otro autor es un tanto dudoso por equiparar las diferentes contribuciones sobremanera. Parece juicioso suponer que un autor con un artículo realizado en solitario esta incurriendo en una aportación personal mayor que aquel que colabora con otros para componer un artículo. Como secuela de esta percepción, que no debe ser considerada sino como tal, se aplica como criterio para imponer un orden sobre el gran conjunto antes citado la productividad fraccionada de cada autor. Esta consiste en la suma de la unidad, dividida por el número de autores, para aquellos artículos en que figure como firmante. Mientras que el valor preciso obtenido de este modo no permite suponer una preeminencia de la labor de un individuo sobre la de otro, la distribución resultante si que dará noción de aquel grupo aventajado frente al resto.

En la página siguiente se puede observar el fruto de estas reflexiones, ofreciendo una pista sobre las personas que han jugado un papel más relevante en el periodo examinado. Obviamente, no estarán todos los que son y, probablemente en términos estrictos, no sean todos los que están, pero no por ello queda desvirtuado el fin perseguido. Siempre que se establezcan las acotaciones señaladas como parte de los límites a las conclusiones que se deriven, y reprobando una vez más la adopción de estos parámetros como absolutos ([5]), la reducción del cuadro inicial, excesivamente extenso, permite constituir un marco conceptual mucho más asequible para la discusión y la argumentación posterior.

Un comentario verosímil en ese contexto apunta hacia la correlación entre los factores socioculturales presentes en torno a la lógica borrosa y la composición de la lista propuesta. Tras la publicación inicial de las ideas de Zadeh, la reacción de la comunidad científica se manifestó en las más variadas direcciones. Sus detractores, en particular, argumentaban, por ejemplo, que la borrosidad en si misma era una aproximación inadecuada y perniciosa a los problemas del mundo real, donde obviamente debían buscarse soluciones más definidas en lugar de vaguedades. Otros veían en ella un reflejo de los modelos probabilísticos y, postulando que todo lo que pudiera hacer la primera entraba en las competencias de los segundos, la rechazaban. Por último, viendo la teoría como aparente extensión de otras clásicas sin aplicaciones evidentes, muchos la desestimaron como un mero artificio menospreciable.

T.	S.	C.	P.F.	Autor	T.	S.	C.	P.F.	Autor
77	49	28	61,1	R. R. Yager	8	8	0	8,0	C. V. Negoita
74	22	52	44,5	W. Pedrycz	14	2	12	7,3	W. J. Wang
32	31	1	31,5	L. A. Zadeh	11	4	7	7,3	R. J. Kuo
45	1	44	19,9	D. Dubois	17	2	15	7,3	T. Hiyama
46	1	45	18,8	A. Kandel	14	2	12	7,0	E. Trillas
23	14	9	18,3	V. Novak	9	5	4	7,0	B. Bosko
40	0	40	16,7	H. Prade	7	7	0	7,0	M. Wygralak
30	5	25	15,8	S. K. Pal	14	2	12	6,5	J. Yen
31	7	24	14,9	I. B. Turksen	13	0	13	6,5	D. T. Pham
17	13	4	14,8	K. T. Atanassov	7	6	1	6,5	J. X. Fang
18	13	5	14,4	H. Ying	14	3	11	6,5	J. C. Bezdek
19	11	8	14,3	G. J. Klir	14	2	12	6,5	C. S. Chang
24	3	21	13,2	J. M. Mendel	12	2	10	6,4	D. Teodorovic
12	12	0	12,0	T. Williams	13	1	12	6,3	S. G. Tzafestas
13	11	2	11,8	M. S. Ying	9	4	5	6,3	T. Yamakawa
21	4	17	11,7	N. R. Pal	12	3	9	6,3	H. T. Nguyen
16	7	9	11,3	D. H. Hong	7	6	1	6,3	L. I. Kuncheva
32	0	32	10,9	D. A. Linkens	14	1	13	6,1	V. Kreinovich
23	2	21	10,8	C. T. Lin	13	3	10	6,0	H. J. Zimmermann
17	6	11	10,6	H. X. Li	10	2	8	6,0	M. M. Gupta
17	5	12	10,2	J. Kacprzyk	6	6	0	6,0	R. Belohlavek
18	5	13	10,0	J. F. Baldwin	6	6	0	6,0	E. Turunen
10	9	1	9,5	M. Demirci	10	3	7	5,9	P. Diamond
12	7	5	9,3	G. Gerla	12	0	12	5,8	D. P. Filev
9	9	0	9,0	G. Jumarie	9	4	5	5,8	B. K. Bose
9	9	0	9,0	F. J. Bartos	9	3	6	5,8	J. J. Buckley
19	2	17	8,7	E. S. Lee	8	4	4	5,8	C. W. Desilva
18	0	18	8,5	K. Hirota	7	5	2	5,8	I. Bloch
15	4	11	8,4	P. Hajek	18	0	18	5,8	P. K. Dash
16	1	15	8,3	S. J. Huang	11	3	8	5,8	W. Li
11	6	5	8,3	A. O. Esogbue	15	1	14	5,7	J. M. Keller
10	7	3	8,2	S. Gottwald	11	2	9	5,7	S. M. Chen
16	4	12	8,0	M. Jamshidi	8	4	4	5,7	E. T. Lee

(T - Total de artículos, S - Artículos solo, C - Artículos en colaboración, PF - Productividad Fraccionada)

Tabla 4

En términos generales, la mayor parte de esta crítica puede emplazarse en el mundo occidental, mientras que en oriente florecieron los elogios hacia Zadeh y quienes le sucedieron. Un amplio número de fuentes apuntan, como causa de esta tendencia, al diferente trasfondo cultural presente en ambas regiones ([13]). Europa y América siempre estuvieron tocadas por la influencia aristotélica, valorando por encima de todo la certidumbre y adoptando durante siglos ese paradigma para la comprensión del universo. Sin embargo, en Asia las enseñanzas tradicionales contemplan un modelo de pensamiento más ponderado a favor de valoraciones relativas. En la medida que la estructura conceptual de cada individuo hereda parte de sus criterios del entorno en que se forma, se bosqueja una suerte de explicación a estas reacciones y, al mismo tiempo, sugiere un factor presente tras la partición obtenida.

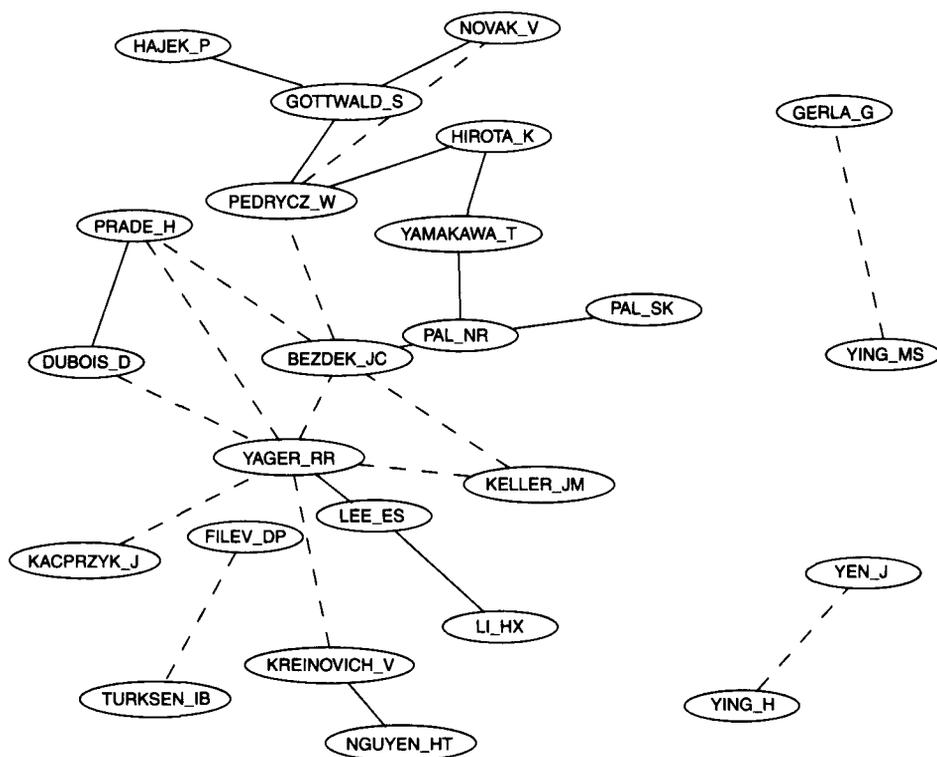


Figura 3.

Como adición, se aprecia la existencia de una estructura intrínseca a la comunidad investigadora en que parecen sobresalir los sujetos aquí presentes, en base a una serie de vínculos entre ellos. Buscando identificar patrones de colaboración entre autores, se obtiene en consecuencia una disposición como la indicada, donde el trazo discontinuo es reflejo de un número de trabajos comunes ocasional, inferior a una décima parte de la producción total de los participantes en la relación, en contraposición con asociaciones más sólidas y duraderas. Aún cuando el número de desarrolladores incluidos en el conjunto de cabeza es moderadamente reducido, es importante denotar la cohesión de buena parte de los implicados en un mismo grupo. En el afán por alcanzar un logro en las empresas perseguidas, más ambiciosas si cabe en el caso de los grandes valores de este capital humano, no es difícil introducir la visión de sociedades de éxito que hayan de permitir a sus miembros crecer en su rol como figuras de peso. Con la ampliación del número de autores considerados, esta imagen no habría sino de extenderse con la anexión de mayores porciones de la comunidad en el entramado que define el tapiz de su actividad.

6. Perspectivas

Incluso cuando el lector de estas líneas pudiera albergar dudas sobre algunos de los aspectos recorridos, una certeza innegable es la existencia de una notable actividad en torno a la lógica borrosa. Lejos de tratarse de un área de conocimiento estática, el oleaje de su superficie no hace sino reflejar la existencia de movimientos en su seno que, de vez en cuando, pero sin que haya de transcurrir mucho tiempo entre una y otra ocasión, dejan brotar mensajes embotellados con que llevar nuevas a las orillas del mundo.

Precisamente con el ánimo de observar este movimiento desde aún otro ángulo más, se presta examinar su índice de colaboración, que no es más que el cálculo de la media del número de autores que ha participado en cada artículo. Obviando los primeros años por albergar un volumen de producción extremadamente exiguo, se aprecia una fuerte tendencia, sobre todo en la última década, hacia la constitución de equipos de trabajo en contraste con los esfuerzos de investigadores aislados. La interpretación de este fenómeno admite distintos juicios, aunque quizá los dos supuestos mencionados más habitualmente sean los que mejor puedan dar una idea acertada al respecto ([9]). De una parte, existen hipótesis a favor de la correlación entre índice de colaboración y apoyo econó-

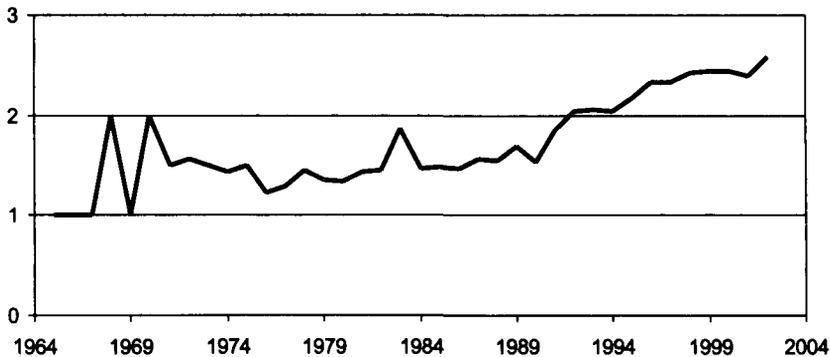


Figura 4. Índice de colaboración.

mico a la tarea, de modo que la abundancia de medios favorecería la formación de grupos de investigación. Por otra, se sugiere que una mayor colaboración es reflejo de un estadio de madurez más avanzado de la disciplina, al quedar en un segundo plano los artículos de corte especulativo y dialéctico, frente a iniciativas más sólidas y tangibles.

En cualquier caso, la lógica borrosa, en su historia reciente, y presumiblemente como anticipo del devenir futuro, esta impregnada por un predominio del desarrollo de aplicaciones. Todavía son muchas las ideas pendientes de ser exploradas, y más aún si se toma en consideración el afán de mejora detrás de aquellas soluciones clásicas que vuelven a ser examinadas bajo la nueva luz esperando recrearlas como innovación. Dado que con cada avance significativo se multiplican las posibilidades combinatorias a recorrer, parece plausible creer que, lejos de invertirse, esta tendencia se acentuará cada vez más con el paso del tiempo. Quizá la respuesta de Enric Trillas a una cuestión similar ([12]), resulte en un interesante apunte que añadir como colofón:

«[How has the distribution of tasks in investigating fuzzy logic developed between those dedicated to the theoretical field and those who have focused more on the applied field?] From my point of view, in the most satisfactory way possible. Because from being a majority, until half a dozen years ago, those of us who worked the theoretical field, we are becoming a minority. There are more people who work on the field of applications: let it be physics, circuit theory, decision theory, control, expert systems... That was what we wanted, and thus, this

historical sentence to the disappearance of theoreticians, like the dinosaurs, does not scare me, and it does not scare me because those who will keep on doing theory will be very good. [...]»

7. Comentarios finales

Lejos de aspirar a instituirse en una visión detallada y de corte humanista sobre la evolución de la lógica borrosa, se ha intentado ofrecer una relación de análisis en torno a su desarrollo en el periodo tratado con la esperanza de alentar las perspectivas que cabe plantear con ayuda de las herramientas que la bibliometría pone a nuestro servicio. A lo largo de estas páginas, ciertamente se ha hecho uso de una porción de esas posibilidades, pero el auténtico alcance que esconden en su seno puede interpretarse como mucho más extenso en direcciones que exceden la ambición del texto.

El poner como punto de partida un conjunto de resultados de origen formalmente establecido sobre el que construir el discurso favorece que la actividad se beneficie en cierta medida de algunas de las cualidades más elogiadas del rigor científico. Merece destacarse, entre ellas, la posibilidad de que otros individuos puedan contrastar la experiencia, repitiéndola con idénticas conclusiones. Así, de la simple expresión de opiniones y el enfrentamiento retórico de las mismas, de hallarse en desacuerdo, queda planteada la viabilidad de disponer hipótesis sobre unos datos. Estas, sin perjuicio de aquellos que las defienden, pueden ser derrocadas por otras mejores de forma razonada a través de la búsqueda de más valores sobre los que asentar la lectura de la historia científica. De este modo, en cualquier caso, el beneficio recae sobre el conocimiento existente y, al igual que la ciencia se concibe como una tarea siempre inacabada plausible de mejora, su historia comparte esta misma naturaleza.

La importancia de un estudio de estas características radica asimismo en otra ganancia potencial que le es intrínseca. Siendo limitado el tiempo de que el ser humano dispone para asimilar conocimientos y lento el proceso para adquirirlos, la producción de una guía que asista en el proceso de aprendizaje cobra un notable valor. A fin de obtener el mejor rendimiento al aproximarse a un área del saber específica, y persiguiendo impregnarse de las nociones más relevantes con el fin de integrarse en la comunidad asociada a ese campo, la pauta establecida por un enfoque como el presentado facilita un interesante camino. En él, se

orienta hacia los textos y autores que es más vital conocer con la mayor prontitud, postergando otras referencias con que completar la iniciación y cuya selección dependerá más de los intereses personales. Sea pues este un puerto desde el que armarse con mapas y cartas de navegación que, sin estar exentos de advertencias sobre lo desconocido, asistan al nuevo explorador en su empresa. Aquí, quizá, comienza la lógica borrosa, más allá, sospechamos, los peligros acechan...

Referencias

1. BOCHENSKI, I. M., *Historia de la Lógica Formal*, Editorial Gredos, 1966.
2. BORGMAN, C. L., FURNER, J., «Scholarly Communication and Bibliometrics», *Annual Review of Information Science and Technology* Vol. 36, Information Today, 2002, pp. 3-60.
3. BRIN, S., PAGE, L., MOTWANI, R., WINOGRAD, T., «The Pagerank Citation Ranking: Bringing Order to the Web», Stanford Digital Library Technologies Project, 1998.
4. GARFIELD, E., «Citation Indexing for Studying Science», *Nature* n.º 227, 1970, pp. 669-671.
5. GARFIELD, E., «Citation Frequency as a Measure of Research Activity and Performance», *Essays of an Information Scientist* Vol. 1, 1973, pp. 406-408.
6. GOODRUM, A. A., MCCAIN, K. W., LAWRENCE, S., LEE GILES, C., «Computer Science Literature and the World Wide Web», Preprint, 2001.
7. GORMAN, G., «A review of Fuzzy Logic and its Applications», *IT Department NUIG Technical Report*, 1998.
8. HAVELIWALA, T. H., «Efficient Computation of Pagerank», Stanford University Technical Report, 1999.
9. LÓPEZ LÓPEZ, P., *Introducción a la Bibliometría*, Editorial Promolibro, 1996.
10. MACROBERTS, M. H., MACROBERTS, B. R., «Problems of Citation Analysis: A Critical Review», *Journal of the American Society for Information Science* 40(5), 1989, pp. 342-349.
11. MORONI, M., «La manzana borrosa de Kosko», *Boletín Infociencia* n.º 3, 2000.
12. TRILLAS, E., «Interview with Enric Trillas», *Advances in Fuzzy Logic*, Universidade de Santiago de Compostela, 1998.
13. ZADEH, L. A., «Coping with the Imprecision of the Real World: An Interview with Lofti A. Zadeh», *Communications of the ACM* Vol. 27 n.º 4, 1984.