

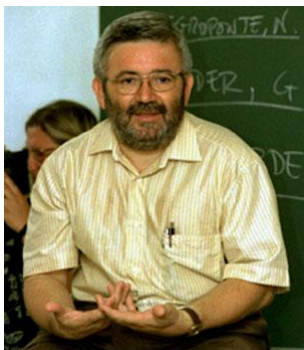
L. A. ZADEH: DEL CONTROL ANALÍTICO AL CONTROL BORROSO

Autor: [Llorenç Valverde](#)

Dept. Matemàtiques i Informàtica

Universitat de les Illes Balears.

Cap dret reservat / No rights reserved



Tuve la oportunidad de conocer personalmente a Lotfi Zadeh – ahora profesor emérito de ciencias de la computación en la University of California at Berkeley – en 1982, en Las Palmas de Gran Canaria, donde se celebraba la Second World Conference on Mathematics at the Service of Man. En realidad actué como fotógrafo mientras le entrevistaban para la revista de divulgación científica catalana "Ciencia". Posiblemente por ello, y pese que el profesor Zadeh me había facilitado diversas estancias – en 1983 y 1986 – como visiting scholar en su departamento de la Universidad de Berkeley, no pareció sorprenderse cuando, diez años después, en marzo de 1992 me mostré interesado en grabar una conversación con él para darle, posteriormente, forma de entrevista divulgativa sobre la lógica borrosa. La verdad es que la grabación se realizó el día 30 de marzo de ese mismo año, en su atiborrado despacho del Evans Hall de Berkeley, y ha permanecido sin transcribir hasta que, hace unos días Enric Trillas supo de ella y me animó a transcribirla para este número especial de Arbor.

En realidad me he limitado prácticamente --dada la claridad y orden de las ideas manifestadas por el profesor Zadeh-- a transcribir, traduciendo al mismo tiempo, la conversación que yo intenté centrar, de entrada, en la evolución experimentada por la teoría de los conjuntos borrosos desde su tímida y problemática --para algunos-- introducción hasta la actual explosión que ha convertido la lógica borrosa en un tema de moda: primera página de los periódicos más importantes del mundo, revistas tanto de información general como especializadas en ciencia y tecnología u otras disciplinas, como economía. Moda que, por otra parte, no ha hecho más que aumentar en el año transcurrido desde la realización de la entrevista.

Aunque mi atrevimiento llegó hasta pedirle que explicara en pocas palabras lo que era la lógica borrosa y para que servía, empecé por hablar del hecho que ahora se podían comprar en todo el mundo --y en especial en Japón-- electrodomésticos que incorporan algún mecanismo de control basado en la lógica borrosa y preguntarle a quien introdujo, en 1965, el concepto de conjunto borroso su visión sobre el corto período de tiempo transcurrido entre la introducción de la teoría y su implantación a nivel industrial, más si se tiene en cuenta que su acogida fue objeto de una recepción tan fría en Estados Unidos y Europa como entusiasta en Japón. La verdad es que no tuve ni opción ni necesidad de intervenir en exceso, poco a poco el profesor Zadeh fue hablando de los temas que a mi más me interesaba oír de su boca: la historia de la evolución de la lógica borrosa, el porqué de su éxito y su evolución futura, así como su actual implantación y aceptación en los círculos académicos. Lo que sigue es el resultado casi literal de más de una hora de amena y fluida conversación.

UNOS VEINTICINCO AÑOS DESPUÉS...

LAZ: Creo que su pregunta es muy interesante y trataré de responderla con toda la extensión que me sea posible. En mi experiencia, no es tan fácil predecir el curso de los acontecimientos: cuando escribí mi primer artículo sobre conjuntos borrosos, pensaba que la mayor parte de sus aplicaciones iban a ser en el caso de sistemas humanísticos o biológicos y en aquellos sistemas para los que las técnicas convencionales basadas en ecuaciones diferenciales, ecuaciones en diferencias y similares, no funcionaban tan bien como era de esperar. Por lo tanto quizás era necesaria una forma de tratar con estos sistemas que no permitía un análisis convencional, estas eran mis expectativas cuando escribí el primer artículo sobre conjuntos borrosos: esperaba que las aplicaciones serían en lingüística, psicología, sociología, filosofía y campos afines.

Unos cinco años más tarde, es decir alrededor de 1970, empecé a pensar que podía haber algunas aplicaciones en control. De tal manera que en 1972 escribí un artículo corto titulado "A rationale for Fuzzy Control". Dos o tres años más tarde, Mandani y Assilian publicaron su conocido artículo en el que demuestran como la teoría de los conjuntos borrosos, las variables lingüísticas y las reglas borrosas "Si entonces" pueden ser usadas para controlar efectivamente un sistema real. De todas formas, hasta 1980, la mayoría de las aplicaciones que eran "visibles" pertenecían al campo de los sistemas basados en el conocimiento, sistemas expertos y cosas parecidas. Si uno da una ojeada a la literatura sobre conjuntos borrosos en ese período se da cuenta de que había muy pocos trabajos que tuvieran que ver con problemas de control.



En esta época empezaron algunos desarrollos interesantes: ingenieros de Hitachi, en Japón, empezaron a trabajar en el sistema de trenes subterráneos de Sendai, trabajo que les llevó unos 8 años. Creo que, en muchos aspectos, este fue el punto de cambio: demostró que el control mediante lógica borrosa podía ser y era efectivo al tratar con problemas significativos como el control de un tren, que no se trataba de un juguete. Por otra parte, este fue un tipo de aplicación que recibió mucha publicidad. Anteriormente, alrededor de 1976, había habido otra aplicación con éxito del control borroso: un horno de cemento (que no habían recibido, por sus propias características, tanta publicidad), pero que resultó ser lo suficientemente eficaz como para que unos años después hubiera varias plantas del mismo tipo funcionando.

LIV: ¿Todo esto nos sitúa alrededor de 1980, no?

LAZ: De hecho los primeros artículos fueron publicados en 1976, pero la madurez de estas aplicaciones no fue constatada hasta 4 años después, en 1980, cuando se inicia el proyecto de los trenes de Sendai, que empezaron a funcionar en 1987.

LIV: Este es también el año en que se celebra en Tokio la segunda reunión de la International Fuzzy Systems Association, IFSA (la primera había tenido lugar en Palma de Mallorca, dos años antes, en 1985).

LAZ: Precisamente, como recordará, fue durante este congreso de Tokio en el que se anunció la aparición del primer electrodoméstico que usaba de la lógica borrosa: se trataba de un regulador para duchas de Panasonic, era tan sólo un prototipo, todavía no estaba a la venta. De hecho los primeros productos aparecieron en el mercado en 1988-89. Fueron una lavadora y una aspiradora. Más tarde aparecieron los hornos de microondas, los aparatos para cocer arroz y muchas otras aplicaciones en fotografía: cámaras de fotografía y de video con autofocus, en aparatos de televisión, en aire acondicionado, etc...

Empiezan a aparecer, pues, aplicaciones de la lógica borrosa en control que son muy visibles para el público en general. Y creo que ha sido esta alta visibilidad la que ha cambiado el clima con respecto a los conjuntos borrosos, de tal manera que antes no había demasiada gente que supiera de la lógica borrosa y de sus aplicaciones. A partir de su uso en electrodomésticos han aparecido, como Vd. ha mencionado antes, en la prensa popular --no especializada-- una infinidad de artículos sobre la lógica borrosa. De tal manera que mucha gente, especialmente en el mundo académico, que antes no creía que la lógica borrosa fuera algo digno de atención empezaron a cambiar sus puntos de vista. Hoy, asistimos a una especie de explosión en el interés sobre la lógica borrosa: artículos, proyectos de investigación, desarrollos, nuevas aplicaciones...

Se trata pues de una auténtica moda, esta moda -como todas- no durará eternamente. Sin embargo, está surgiendo otra circunstancia que parece ser muy prometedora, como es esta especie de matrimonio entre la lógica borrosa y la teoría de las redes neuronales, que empezó aproximadamente hacia 1988-89. Estamos empezando a ver muchos electrodomésticos -de nuevo en Japón, básicamente - que incorporan sistemas de control basados en lógica borrosa y en los que técnicas de redes neuronales son usadas para dotarlos de capacidades adaptativas o de aprendizaje. De tal forma que en un futuro próximo espero la aparición de toda una nueva generación de productos "neuro-fuzzy" o "fuzzy-neuro", que tendrán un alto MIQ (Machine Intelligence Quocient).

Hasta ahora solo hemos hablado de aplicaciones relacionadas con el control, pero cada vez más estamos viendo -especialmente en Europa- más aplicaciones en el campo de los sistemas basados en conocimiento: los sistemas expertos. Y esto está convirtiéndose en algo cada vez más acentuado, posiblemente como resultado directo del éxito de las aplicaciones de la lógica borrosa en electrodomésticos. En otras palabras, los grupos que llevan tiempo trabajando en este campo se han visto animadas por los éxitos que acabo de mencionar.

En resumidas cuentas, por ahora veo una especie de bifurcación en las aplicaciones de la lógica borrosa, por una parte están las aplicaciones en control y por la otra las aplicaciones en el desarrollo de sistemas expertos. Creo que, con el paso del tiempo esta última irá adquiriendo más y más importancia. También creo que las aplicaciones de la lógica borrosa en control serán cada vez más sofisticadas, todo ello sin excluir la posibilidad que aparezcan productos que combinen los dos tipos de aplicaciones.

UN CÍRCULO QUE SE CIERRA.

LIV: Si no estoy mal informado Vd. inicialmente, antes de los conjuntos borrosos, estaba especializado en la teoría de control de sistemas. De hecho, algunos de los primeros ejemplos con los que se presentaba la teoría estaban directamente relacionados con problemas de dicho campo. Luego durante más de 15 años no se vuelve a hablar de control hasta producirse la actual eclosión. ¿Como lo explicaría?

LAZ: Nuevamente toca Vd. un buen punto. Sus informes son correctos. La explicación a esto es bastante sencilla: Desde mis trabajos en análisis de sistemas fui adquiriendo cada vez más el fuerte convencimiento de que las técnicas disponibles en aquel momento no funcionaban bien para lo que podríamos llamar "sistemas matemáticos humanísticos": es decir para los sistemas en los que la percepción, sentimiento y juicios humanos juegan un papel importante, como tampoco funcionaban del todo bien con los sistemas biológicos, por lo tanto existía una necesidad de encontrar herramientas que permitieran analizar los sistemas de este tipo, es decir sistemas no mecánicos. Esta fue la motivación de la teoría de los conjuntos borrosos. Había también razones que provenían del campo de la clasificación de patrones: una vez más nos encontramos ante un tipo de problema para el que las técnicas convencionales --que asumen que en todo proceso de clasificación, las diferentes clases están perfectamente diferenciadas-- no tenían respuestas convenientes.

Volviendo pues a su pregunta, en mi caso particular, lo que ocurrió es que cuando escribí el artículo "Fuzzy Sets" era director de mi departamento, por lo que no tenía mucho tiempo para hacer investigación, puesto que andaba ocupado con todos los asuntos administrativos correspondientes. Cuando dejé de serlo, al principio de 1968, decidí retirarme por un tiempo para poder reorientar mis actividades más específicamente hacia las ciencias de la computación y empecé por pasar ese año en el MIT y en IBM dedicándome a estudiar cosas como teoría de lenguajes de programación y temas relacionados. Cuando regresé a Berkeley al año siguiente, dejé de dar clases de análisis de sistemas y empecé a dar cursos relacionados con estos lenguajes. Esto me llevó a interesarme con los problemas relacionados con la representación y procesamiento del lenguaje natural, sobre lo que escribí mi primer artículo sobre semántica borrosa en 1969. Y este interés, a su vez, me llevó al estudio de algunos problemas relacionados con los sistemas expertos, así que en 1975 empecé a impartir un curso sobre ellos.

De acuerdo con este interés, antes en 1973, había pasado algún tiempo en el Centro de Investigación que tiene IBM en San José, donde estuve trabajando en temas relacionados con teorías sobre bases de datos. De hecho por un tiempo participé en el proyecto llamado "Rendez Vous" que tenía como objetivo esencial la construcción de una interfase en lenguaje natural para sistemas de bases de datos. Todo esto explica la orientación y contenido de mi artículo de 1978 en el que se describe un lenguaje de representación de significados relacional llamado PRUF (acrónimo de Possibilistic Relational Universal Fuzzy) basado en la lógica borrosa.

Con todo, al principio de la década de los 80 me volví a interesar por los problemas relacionados con control de sistemas, hasta entonces y debido sobre todo al tipo y contenido de los cursos que había estado impartiendo en Berkeley, estaba más orientado a problemas relacionados con sistemas basados en conocimiento y sistemas expertos y procesamiento del lenguaje natural. Pero en ese momento me doy cuenta que los sistemas de control presentaban problemas fascinantes, con la ventaja adicional de que la implementación necesaria para comprobar una hipótesis era mucho más fácil que en el campo de los sistemas expertos donde la construcción de bases de conocimiento son muy costosas ya que exigen una tremenda cantidad de tiempo, sin embargo, en control uno tiene una idea y es mucho más sencillo implementarla y comprobar que si funciona o no.

QUÉ ES Y PARA QUÉ SIRVE

LLV: La verdad es que lamento hacerle la siguiente pregunta, pero creo que es inevitable si uno se pone en la posición de alguien que oye hablar por primera vez de ello: ¿Qué es esto de la lógica borrosa y el hecho que un determinado aparato esté basado o no en ella va a simplificar mi vida o, por el contrario, va significar una dificultad más?

LAZ: Permítame decirle que, en realidad se trata de dos preguntas. En primer lugar, y por lo que se refiere a la cuestión de qué es la lógica borrosa, creo que la forma más simple de describirla es refiriéndose a que su principal objetivo es tratar con los modos de razonamiento que son más aproximados que exactos y en esto difiere esencialmente de la lógica clásica. Pero todavía hay más, cualquier sistema clásico puede ser extendido mediante borrosificación. Por ejemplo, tome Vd la lógica modal y puede construir un sistema borroso de lógica modal, y lo mismo ocurre con otros tipos de lógica, como la epistémica o la deontológica etc...

Es importante observar que el término lógica borrosa es usada en dos sentidos diferentes. Por una parte, uno es un sentido restringido y que se refiere a ella como un sistema más de lógica que, como acabo de mencionar, trata de representar modos de razonamiento aproximado. El otro sentido, más amplio, identifica esencialmente la lógica borrosa con la teoría de los conjuntos borrosos, entendidos estos como clases en las que sus fronteras no están bien definidas, la teoría de los conjuntos borrosos es más amplia que la lógica borrosa. En la teoría de los conjuntos borrosos existen apartados como aritmética borrosa, grafos borrosos, topología, reconocimiento y clasificación de patrones, control... temas todos ellos que van más allá de la lógica borrosa cuando esta se interpreta en sentido restringido. La verdad es que el uso más extendido del término se refiere al amplio, es decir al que identifica la lógica borrosa y la teoría de los conjuntos borrosos. La razón probablemente estriba en que el término lógica borrosa suena mucho mejor que el de conjunto borroso. Yo lo uso en sentido amplio.

Por lo que se refiere a la segunda parte de su pregunta, creo que una de las razones por las que algunas compañías japonesas, como Matsushita, Sony, etc. se han interesado en la lógica borrosa está en el hecho en que se han dado cuenta que ello les permitirá fabricar productos de uso más amigable (user-friendly). Y esta es una consideración muy importante, porque saben que, cada vez más, el mercado depende precisamente de esta facilidad de uso por parte del consumidor. Por mi parte, estoy convencido de que esta necesidad es cada día más evidente puesto que el uso de cosas tan elementales como un reloj digital se está convirtiendo en algo extraordinariamente complicado, se tiene que emplear un tiempo increíblemente excesivo para aprender su funcionamiento. Sin ir más lejos, yo tengo uno y todavía no he conseguido aprender la mayor parte de sus funciones.

Creo que hay mucha gente que piensa como yo, que estos aparatos no son de uso razonablemente amigable y la lógica borrosa puede contribuir decisivamente a mejorar esta faceta de nuestra vida corriente. Tal vez el ejemplo más notable en este aspecto lo constituya el video de Panasonic, que ya se comercializa en Japón, y que gracias al uso de la lógica borrosa puede ser programado mediante instrucciones habladas como "Tendrías que grabar el programa que empieza a las seis en el canal tres". Esto ya puede hacerse (en japonés de momento) y a medida que el tiempo vaya pasando las aplicaciones de la lógica borrosa permitirán cada vez más aproximar el uso de estos aparatos a todo el mundo, como ya está ocurriendo a con las cámaras de fotografía y las de video.

LIV: O sea, para decirlo fácilmente, la lógica borrosa va a permitir disponer de, por ejemplo, aparatos de teléfono a los que les podremos decir "por favor marca el número de Ana" y, lo que es más importante, el aparato responderá efectivamente, marcando el número de Ana. ¿Nos lo tenemos que creer, o es tan sólo un deseo?

LAZ: Creo que están sólo una cuestión de tiempo, dos o tres años. Pero la aportación más importante en este aspecto de la lógica borrosa es su economía. El uso de la lógica borrosa en esta clase de aparatos no es la única solución, creo que podrían construirse también sin usarla, pero creo que la opción más económica es la que proporciona la lógica borrosa, esto es algo que también han empezado a notar las compañías involucradas en la fabricación de esta clase de productos.

LIV: ¿Cuales son las diferencias básicas entre las técnicas clásicas de control y las que están basadas en la lógica borrosa?

LAZ: Creo que el control borroso permite el uso de muchos más sensores --y por consiguiente variables-- que las técnicas basadas en control clásico, puesto que los valores recogidos por dichos sensores son usados reglas lingüísticas de la forma "si entonces" para tomar las decisiones referentes a las acciones adecuadas para el sistema. Por ejemplo en el metro de Sendai, se tienen en cuenta factores como el confort del pasajero, la aceleración, fuerza de frenado, el consumo de electricidad, etc. En definitiva, un número excesivo de variables para poder ser tenidas en cuenta de una forma precisa usando técnicas de control óptimo y parecidas. Por el contrario, usando lógica borrosa pueden ser tenidas en cuenta todas ellas para obtener un mejor funcionamiento del tren.



Otro aspecto a tener en cuenta tiene que ver con la economía de consumo que supone el uso de control inteligente y de la lógica borrosa, en muchas situaciones este es un factor muy importante, como por ejemplo en las comunicaciones a través del espacio (space communications) donde el tamaño y peso de los equipos están fuertemente limitados: el disponer de sistemas de control que consuman menos energía pasa a ser un aspecto muy importante. La economía surge del hecho que en lógica borrosa el número de reglas que se necesita para

controlar un determinado sistema es ciertamente reducido, puesto que es posible una cierta interpolación: si el resultado de la lectura de los sensores no se ajusta exactamente a lo establecido en la regla siempre es posible activar dicha regla produciendo una respuesta que está de acuerdo con el grado de adecuación de la lectura del sensor y de la hipótesis de la regla y al tener que usar menos reglas el sistema es más robusto.

En resumen las características principales de un sistema de control borroso son las siguientes: Son más amigables en su uso, consumen menos energía, pueden tratar con información vaga e imprecisa, no usan un número excesivo de reglas, es decir, son más robustos y todo ello los hace mucho más económicos. Basicamente la lógica borrosa explota el poder propio de la imprecisión humana.

EL ESTATUS ACADÉMICO

LIV: Como Vd ha mencionado antes, había un rechazo hacia la lógica borrosa por una parte del mundo académico, que no creía que la teoría de los conjuntos borrosos sea algo consistente desde el punto de vista científico-matemático. ¿Cree Vd que los éxitos de las aplicaciones de la lógica borrosa pueden contribuir a cambiar las ideas de estos grupos en forma significativa?

LAZ: Definitivamente así lo creo. De todas maneras observe Vd. que si nos remontamos a la década de los 70-80 la mayor parte del trabajo en conjuntos borrosos lo realizaban matemáticos como Vd. y sus artículos eran teóricos y esencialmente matemáticos, no había muchos artículos sobre aplicaciones. Ahora la situación ha cambiado, hay muchos más trabajos relacionados con aplicaciones de la lógica borrosa, la gente que hacia estudios teóricos como Vd. que ha hecho un trabajo excelente con el estudio de las relaciones de indistinguibilidad, por ejemplo, sigue en ello, y son cosas que presumiblemente se verán aplicadas en un futuro no muy lejano. Creo que el escepticismo y hostilidad iniciales hacia los conjuntos borrosos van perdiendo fuerza y cada vez son más débiles. Aunque todavía los hay que no creen que las cosas que funcionan bien lo hagan debido a la lógica borrosa y afirman que cualquier cosa que se pueda hacer usando lógica borrosa se puede hacer también usando métodos bayesianos. Creo que es una simple cuestión de tiempo que se den cuenta de su gran error, a medida que vayan apareciendo más y más cosas que no puedan hacerse razonablemente sin usar la lógica borrosa.

Por lo tanto y aunque todavía no son muchas las universidades en las que existen cursos de lógica borrosa --los hay en diversas universidades aquí en los EEUU, en Japón, por supuesto, y en Europa: en Barcelona y en Madrid, Vd. mismo en su universidad, etc.-- creo que es cuestión de un año o dos el que aparezcan buenos textos de lógica borrosa y ello facilitará aún más su implantación. Desde este punto de vista creo que el futuro se presenta como muy prometedor. A medida que vayan aumentando las aplicaciones de la lógica borrosa y que vayan aumentando asimismo los campos de aplicación se irá implantando en los curricula académicos. Por ejemplo, en medicina parece que van adquiriendo importancia las posibles aplicaciones en cuestiones como anestesia y su control, sistemas de diagnóstico, control de administración de medicamentos: todas ellas son áreas importantes de aplicación futura de la lógica borrosa en combinación, en algunos casos, con redes neuronales.

Hasta aquí, más o menos, llega la grabación de la conversación, casi monólogo, con el profesor Zadeh. Durante la misma, tuve ocasión de leer los títulos de algunas de las numerosas publicaciones sobre conjuntos borrosos que tenía en la librería que quedaba a su espalda. Reconocí entre ellas libros y tesis doctorales de autores de los que no conocía ni su nombre en el año 1982 y que ahora, gracias al tema común de investigación, nos hemos convertido en buenos amigos, como el propio profesor Zadeh, cuya gentileza, amabilidad y franqueza son proverbiales y harto conocidas de todos los integrantes de la comunidad relacionada con los conjuntos borrosos.

Como en la entrevista del año 1982 en esta ocasión también actúo de fotógrafo y, por supuesto, como entonces, el profesor Zadeh me aconseja, dada su conocida gran afición por la fotografía que, en su caso ha aumentado desde entonces y, en el mío, se ha ido diluyendo. Insisto en que para que me quede alguna fotografía de calidad razonable para su posible reproducción debo realizar muchas: mi primitiva cámara no dispone aún de control borroso.