



**Academia de Ciencias Matemáticas,
Físico-Químicas y Naturales de Granada**

**EMULAR LA NATURALEZA,
ADEMÁS DE OBSERVARLA**

DISCURSO LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN
COMO ACADÉMICO NUMERARIO POR EL

**ILMO. SR. D.
ALBERTO PRIETO ESPINOSA**

GRANADA, 2008



**Academia de Ciencias Matemáticas,
Físico-Químicas y Naturales de Granada**

**EMULAR LA NATURALEZA,
ADEMÁS DE OBSERVARLA**

DISCURSO LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN
COMO ACADÉMICO NUMERARIO POR EL

**ILMO. SR. D.
ALBERTO PRIETO ESPINOSA**

GRANADA, 2008

**EMULAR LA NATURALEZA,
ADEMÁS DE OBSERVARLA**

EMULAR LA NATURALEZA ADEMÁS DE OBSERVARLA

ALBERTO PRIETO ESPINOSA

*Al Ilmo. Sr. D. Bernardo García
Olmedo, Supernumerario de
esta Academia, con el que
coincidió en el lugar y momento
oportunos*

Excelentísimo Señor Presidente
Ilustrísimos Señores Académicos
Señoras y Señores

Como sin duda les habrá ocurrido a todos los que me han precedido en el ingreso en esta Academia, la primera cuestión que me he planteado en relación a ello ha sido establecer el contenido de este discurso. Posiblemente llevado por la costumbre de haber participado en distintos tribunales o comisiones de oposiciones he tratado de encontrar una normativa que especificase tiempo, materias a tratar, turnos de preguntas, etc. He consultado los estatutos de la academia y no he encontrado ayuda sobre estas cuestiones. Únicamente mi buen amigo Miguel Giménez Yanguas, que es Secretario de la bicentenaria y hermana Real Academia de Bellas Artes, me ha indicado que tradicionalmente los discursos de ingreso en las

academias son de unos 25 minutos y deben ser leídos. Seguiré en lo posible estas tradiciones, aunque no otras, como la que establece que a los actos de la academia deberíamos acudir con chaqué ya que, como los invitados asistentes a este acto pueden ver, optamos mejor por utilizar el traje académico cuyo adjetivo está en plena consonancia con el nombre de la noble institución que hoy me acoge formalmente en su seno.

Uno de los agradables resultados de mis pesquisas sobre las disertaciones de ingreso es que no se establece el tema sobre el que discurrir, dejándolo totalmente libre. Por ello he optado por hacer distintas reflexiones personales acerca de las experiencias que he vivido a lo largo de mi vida profesional, la cual ha transcurrido totalmente en el ámbito de la docencia, la ciencia y la tecnología.

En efecto, trato de aprovechar esta oportunidad para explicar cómo, más o menos de forma zigzagueante, he ido de mis inicios en la Física, pasando por la Electrónica, a mi actividad actual, que puede considerarse centrada en la Arquitectura de Computadores pero con un acusado carácter interdisciplinar. Más concretamente, primero haré unas disquisiciones sobre mi vocación hacia la Física y la gran proyección que a mi juicio tiene ésta en otras disciplinas. Posteriormente, realizaré unas consideraciones sobre la provisionalidad tanto de los conocimientos aportados por la Ciencia como de las taxonomías que se hace de la misma. A continuación, compararé, desde un punto de vista meramente funcional, el procesamiento de información que realizan las máquinas en contraposición con el que

hace los seres vivos. Las ideas que surgen de este contraste influyeron decisivamente en el rumbo de mi actividad investigadora. Para poner de manifiesto las posibilidades de emulación del comportamiento de los seres vivos en la tarea de tratamiento de la información, me referiré sucintamente a algunos de las experiencias del grupo de investigación que tengo el honor de dirigir. Como epílogo trataré de transmitir mi percepción acerca de algunos de los retos más importantes de la Ciencia actual y de las limitaciones que paradójicamente ella misma deduce en su consecución.

I. PROYECCIÓN DE LA FISICA

En primer lugar deseo revelarles cómo se inició mi fuerte vocación hacia la Física. Tuvo lugar en Salamanca, durante mi primer año del curso selectivo de ciencias, atraído por el deseo de tratar de comprender por qué el color del cielo era azul y cómo éste cambiaba a bellísimas tonalidades en los amaneceres y en los ocasos. Mis compañeros de curso estaban extrañados porque decían que nuestro profesor de Física era francamente mejorable y no inducía precisamente a una vocación hacia esta disciplina. He de señalar que en aquel entonces en la Universidad de Salamanca había muy buenos profesores, entre otras razones porque, al ser un lugar muy próximo a Madrid, con frecuencia recluían en ella a catedráticos desafectos al régimen gobernante a la sazón. Recuerdo a profesores como Fernando Galán, Norberto Cuesta Dutari, y en otros campos a Antonio Tobar y Enrique Tierno Galván.

Como en tercero de Físicas, ya en la Complutense de Madrid, logré satisfacer plenamente mi curiosidad acerca del colorido celeste, emocionalmente me sentí libre para elegir una de las nuevas especialidades que nos ofertaban en un nuevo plan de estudios de la decimonovena promoción de Ciencias Físicas, concretamente la de Electrónica y Electromagnetismo, de la que precisamente ahora se cumplen 40 años. En este programa de forma muy novedosa se incluían algunas asignaturas de Informática, con la denominación de Automática, ya que por entonces no se había acuñado aún el término "Informática".

Sinceramente creo que una cualidad del físico es su capacidad de adaptación a distintos campos del conocimiento, lo que le permite desarrollar con éxito proyectos multidisciplinares y colaboraciones con miembros de la comunidad científica de áreas muy diversas. He asistido, en entornos de profesionales, a más de una mesa redonda en las que los directivos de empresas de tecnologías de la información afirman que para puestos de informática en los que se requieren actividades no rutinarias (iniciativa, innovación, trabajo en grupo, etc.) prefieren a titulados en física frente a otros titulados más especializados.

Sin duda los físicos hemos sabido impulsar y promover, con gran generosidad, el advenimiento de nuevas disciplinas y estudios que van surgiendo de acuerdo con el incremento de la especialización que conlleva la evolución de nuestra sociedad. Un ejemplo lo constituye la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada. En gran medida los estudios

de Informática, de Óptica y de Ingeniería Electrónica han surgido de los estudios de Física, habiendo sido, en todos los casos, físicos los promotores e iniciadores de los mismos. Esto, lejos de debilitar a nuestra profesión la enriquece. Un hecho destacado: el 14 de marzo de 1983, la Junta de la Sección de Físicas de la Facultad de Ciencias, a la sazón presidida por el académico Ilmo. Prof. Dr. D. Jesús Sánchez Dehesa, acuerda por unanimidad “apoyar y urgir la creación de una Sección de Informática en esta Facultad”. Fue el primer pronunciamiento documentado de un órgano colegiado de la Universidad apoyando dichos estudios. Dos años más tarde se iniciaron los mismos. De aquella iniciativa hoy tenemos unos estudios de informática que según diversos indicadores se encuentran entre los mejores de España.

Por otra parte la contribución y complicidad que ha habido y hay entre la Física y la Electrónica e Informática, en el desarrollo de estas dos últimas disciplinas es evidente. A vuelatecla, y refiriéndome sólo a partir de la década de los 40, algunos ejemplos son los siguientes:

- Durante los años 1944 a 1946, John P. Eckert y John W. Mauchly construyen en la Universidad de Pensilvania el ENIAC, que es el primer computador electrónico de uso general completamente operativo. Mauchly era Físico y Eckert Ingeniero Eléctrico.
- En 1945, John von Neumann publica el concepto de programa almacenado en memoria, que es uno de los fundamentos de los computadores; de hecho los especialistas

denominamos a los computadores convencionales actuales, “computadores von Neumann”. Este científico hizo grandes contribuciones a la Física Cuántica y a la Hidrodinámica. Su preocupación por el desarrollo de los computadores partía de su deseo de encontrar una herramienta para la resolución de ecuaciones de hidrodinámica.

- En 1956, William Bradford Shockley, John Bardeen, Walter Houser Brattain reciben el Premio Nobel de Física por sus investigaciones en semiconductores y el descubrimiento del efecto transistor, que es el fundamento tecnológico de la segunda generación de computadores.
- En 1979, Allan M. Cormack Godfrey y N. Hounsfield reciben el Premio Nobel de Medicina por el desarrollo de la tomografía axial con ayuda de computador. La titulación original de Allan M. Cormack es Astrofísica
- En 1982, John J. Hopfield, concibe el modelo de red neuronal asociativa, conocida comúnmente como Red de Hopfield. Las Redes Neuronales Artificiales constituyen una herramienta del ámbito de la Física Computacional, siendo una metodología muy usada para el diseño de sistemas inteligentes para procesamiento de la información. Hopfield es un físico de gran prestigio, en la actualidad Presidente de la American Physical Society.
- Alrededor de 1990, Timothy Berners-Lee, licenciado en Física en la Universidad de

Oxford, ante la necesidad de distribuir e intercambiar información acerca de sus investigaciones de una manera efectiva, desarrolla las ideas fundamentales del concepto de web, siendo considerado uno de sus padres. Como resaltaré más adelante, la invención de la web supone uno de los hechos más notables de la segunda mitad del siglo pasado.

- En 1991, Pierre-Gilles de Gennes recibe el Premio Nobel de Física por descubrir métodos para analizar formas complejas de la materia, en particular la de los cristales líquidos y los polímeros. El cristal líquido es el fundamento de las pantallas de visualización de los computadores actuales.
- En 2000, Jack S. Kilby recibe el Premio Nobel de Física por su contribución (1959) a la invención del microchip, fundamento tecnológico de la tercera generación de computadores.

Con estos ejemplos queda puesto de manifiesto la gran contribución que se ha realizado desde la Física en el desarrollo de la tecnología de los computadores.

II. DEMARCACIONES EN LA CIENCIA

Permítanme que, antes de continuar, haga unas consideraciones sobre el concepto de Ciencia; no en vano éste es el calificativo con el que se designa nuestra insigne Academia.

La Ciencia obtiene sus conocimientos mediante la observación y el razonamiento. En el caso de las Ciencias Naturales dichas observaciones se hacen de la Naturaleza. Opino que los científicos sólo hacemos procesos o *construcciones mentales* que explican más o menos parcialmente el mundo que percibimos¹; es decir, nunca podremos llegar a comprender la verdad o realidad que subyace bajo la Naturaleza, si es que dicha verdad existiese. Los resultados de las construcciones mentales es lo que conocemos como modelos, teorías, principios o leyes, y en la mayoría de los casos son efímeros; pero no por ello dejan de ser extraordinariamente útiles ya que nos permiten dar una interpretación a lo que ocurre, prever lo que va a suceder y hacer ingeniería; es decir, construir sistemas artificiales. El contemplar cómo a lo largo del tiempo surgen nuevas teorías que superan a las anteriores, es una prueba evidente de lo coyunturales que son los conocimientos de la Ciencia.

Deseo insistir en la conclusión anterior. He indicado que la Ciencia obtiene sus conocimientos, además de mediante la observación, por el razonamiento. Pero el razonamiento lógico, que es al que me estoy refiriendo, se rige por unas reglas estipuladas, que a su vez son construcciones de nuestra mente, y por tanto, en mi modesta opinión, precarias (sin un substrato objetivo fuera de nuestros cerebros). Así, muy probablemente las leyes que hubiésemos ideado para entender los fenómenos de la naturaleza serían muy distintas si nuestra forma de

¹ "Los conceptos y principios fundamentales de la ciencia son invenciones libres del espíritu humano", Albert Einstein.

razonar no hubiese estado fundamentada en la lógica aristotélica, el discurso del Método de Descartes, etc., aunque también esas ignotas y circunstanciales leyes hubiesen servido para explicar dichos fenómenos.

Sobre esta limitación que la Ciencia hace sobre lo que ella misma puede llegar a conocer, volveré en el epílogo de esta disertación.

Dentro de este contexto, un hecho evidente sobre el que con frecuencia reflexionamos es lo contingente o provisional que resulta ser el establecimiento de las distintas disciplinas de las Ciencias Naturales. La Naturaleza, podríamos decir, que es un todo continuo y no distingue entre Física, Química, Biología o Geología. Realmente no existen fronteras entre las ciencias, sino demarcaciones prácticas. Aunque Wilfred Trotter obviamente exageró cuando afirmó que *Toda ciencia es o bien física o filatelia*.

Sólo por cuestiones metodológicas o coyunturales u oportunistas estructuramos el conocimiento sobre la Naturaleza en distintas ramas. La frase de Wilfred Trotter, de principios del pasado siglo, trae a colación las demarcaciones que a lo largo de la historia se ha realizado de las ciencias, y del conocimiento, en general.

En la antigüedad, y principalmente por la escolástica medieval, los conocimientos que se impartían se agrupaban en artes liberales, que eran las que sirven al hombre libre para encontrar la ciencia y el conocimiento “per se”, y en artes mecánicas o serviles, que correspondían a oficios prácticos, con una finalidad puramente económica y

útiles para que ganen su sustento los que los practican.

Las *artes liberales* eran siete y se incluían en dos grupos diferentes, establecidos en la escuela carolingia (Siglo V). El primero o *trivium*, comprendía la Gramática, la Retórica y la Dialéctica, son disciplinas que se refieren al discurso y al lenguaje. El segundo grupo o *quadrivium* contenía la Astronomía, Geometría, Aritmética y Música, disciplinas matemático-científicas. Estas materias conformaban el núcleo de enseñanzas de las universidades de la Edad Media.

Las *artes mecánicas* circunscribían materias u oficios tales como arquitectura, agricultura, medicina, farmacia, construcción naval, e ingenierías, en general.

Con la minuciosidad que caracterizaba a los escolásticos, Raimundo Lulio² (a finales del Siglo XIII) hizo una clasificación exhaustiva de los oficios de la época. En total nos muestra dos oficios liberales (abogados y médicos), dos musicales (juglares y trovadores) y treinta y nueve oficios mecánicos. A los oficios liberales no los tiene muy bien conceptuados; así, en su “Libre de contemplació en Déu” (1274-1276) escribe que *los jueces hacen exactamente lo contrario de lo que deberían hacer: condenan los inocentes y absuelven a los culpables, desviándose totalmente de la verdad; los abogados, para tener*

² R. da Costa, *Las definiciones de las siete artes liberales y mecánicas en la obra de Ramón Llull*. Revista Anales del Seminario de Historia de la Filosofía. vol. 23, pp. 131-164 (ISSN 0211-2337). Publicaciones Universidad Complutense de Madrid (UCM), 2006.

honor y dinero, se esfuerzan en mostrar la falsedad a los jueces: ambos son hombres muy malos y ciertamente tendrán una mala muerte. Sobre la otra profesión liberal, la medicina, comenta: muchos más hombres mueren que los que son curados por los médicos, debido a que ellos no tienen conocimiento de su Arte.... Además, ellos trabajan con la segunda intención, pues su mayor objetivo es juntar riquezas y tener fama. Aunque la baja popularidad de los médicos viene de antes, porque como comenta García Olmedo en su Crónica no Autorizada de un Conflicto Permanente -En torno a la Universidad Española-³, ya Petrarca, en su Inectiva Contra un Médico, la calificaba de “perniciosa”.

En cierta medida la distribución inicial de cátedras de la Universidad de Salamanca, que se hizo en los estatutos establecidos por Alfonso X el Sabio el 8 de mayo de 1254 (39 años después de fundada dicha Universidad) fue en contra de la corriente de la época porque estableció una Cátedra de Física³, incluyendo a la Medicina y a las Ciencias Naturales, que estaba entre las mejores retribuidas junto con las de Leyes y Cánones, Lógica, Gramática y Música.

Como todos conocemos, en la última mitad del Siglo XX las Ciencias Naturales y Formales, al menos a nivel universitario, se estructuraron en Biología, Física, Geología, Química y Matemáticas. No obstante, la reorganización de las mismas continúa

³ B. García Olmedo, *En torno a la Universidad española. Crónica no autorizada de un conflicto permanente*. 2008, http://atc.ugr.es/~aprieto/curiosidades/Cronica_historia_univ.pdf

acomodándose a las circunstancias del momento, de forma que nacen nuevas titulaciones poniendo énfasis curiosamente en dos aspectos contrapuestos como son la *interdisciplinaridad* y la *especialización* que requieren la atención a nuevas demandas sociales encaminadas a la mejora de la calidad de vida. Entre estas nuevas disciplinas se pueden citar la Óptica, las Ciencias de la Computación, la Bioquímica, las Ciencias del Medio Ambiente, etc.

Después de la disquisición anterior, que ha tratado de poner de relieve el carácter coyuntural de las ciencias, debemos recordar que la Física trata de estudiar científicamente las propiedades de la naturaleza con ayuda del lenguaje matemático con objeto de describir los fenómenos naturales con exactitud y veracidad.

Por otra parte, la ingeniería pretende resolver, con creatividad e ingenio problemas que afectan a la humanidad y al medio ambiente. Tradicionalmente este objetivo se logra aplicando los conocimientos científicos aportados fundamentalmente por la Física. En general, la ingeniería utiliza los modelos creados por la Física para construir sistemas artificiales que resuelvan los problemas que se plantean.

Los objetos de análisis de la Física se centran en la materia, la energía, el tiempo y el espacio, así como en sus interacciones. Curiosamente un concepto que en principio la Física no consideró como objeto de estudio es el de *información*, que sin embargo fue tratado como magnitud física por Claude Shannon (1938, Ingeniero Eléctrico y Matemático). La noción de cantidad de información conecta con la

noción clásica de entropía originaria de la Mecánica Estadística.

Precisamente el tratamiento y almacenamiento de la información es el principal campo de aplicación de la Electrónica y el objeto fundamental de la Informática, disciplinas donde se ha centrado mi actividad profesional.

III. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN EN EL COMPUTADOR Y EN EL HOMBRE

A continuación voy a tratar de hacer unas reflexiones sobre las ideas que han dado lugar al rumbo de mi principal línea de investigación de los últimos años. Ésta surge de analizar la forma en cómo los seres vivos procesan información en contraposición a cómo la hacen las máquinas.

El formalismo convencional para desarrollar una aplicación con ordenador implica considerar tres niveles⁴.

- El primero (*nivel de conocimiento*), se refiere al dominio de la tarea a realizar: si queremos resolver un problema debemos de disponer de un modelo algoritmizable del mismo. En otras palabras, es necesario poseer un conocimiento detallado de qué debe realizar la máquina para alcanzar los objetivos. No podemos, por ejemplo, hacer un programa para simular la evolución de un objeto estelar si no conocemos en detalle y con precisión los

⁴ Newell, A. *The Knowledge Level*. Artificial Intelligence, 18(1) 87-127, (1982)

procesos físicos y condiciones iniciales que rigen dicha evolución.

- El segundo nivel (*nivel simbólico*) corresponde al de la programación: una vez conocidos los algoritmos (o modelos matemáticos) hay que expresarlos en estructuras simbólicas definidas en algún lenguaje de alto nivel más o menos próximo al lenguaje del dominio de la tarea (lo que implica un alejamiento del lenguaje de la máquina). Después, por medio de programas traductores y utilizando el propio ordenador como herramienta, transformamos el programa en lenguaje de alto nivel en un programa en lenguaje máquina, que es el único que realmente entiende el computador (más concretamente el procesador).
- El tercer nivel (*nivel de implementación - procesamiento*), el más bajo, corresponde a la máquina que ejecuta los programas (el ordenador en sí). El ordenador transforma, según le indica el programa, datos procedentes del espacio simbólico del problema en resultados comprensibles en dicho espacio.

Como consecuencia de las consideraciones anteriores se pueden hacer las dos siguientes reflexiones:

- Un ordenador (o un sistema electrónico, en general) es totalmente inservible si no se dispone de un modelo preciso de la tarea a realizar. Es decir, debemos excluir la utilidad

del ordenador para la realización de funciones que carezcan de un modelo conceptual concreto. Entre estas funciones se encuentran la mayoría de los procesos mentales realizados por los humanos, ya que no disponemos del conocimiento suficiente de ellos como para expresarlo en términos algorítmicos. Así, no podríamos realizar un programa de computador eficiente para entender el lenguaje si no tuviésemos un modelo formal de cómo poder efectuar dicho reconocimiento. Lo mismo ocurre con la habilidad para percibir y analizar escenas visuales. Paradójicamente, uno de los retos de la Informática se encuentra en desarrollar máquinas que puedan percibir, razonar, aprender, adaptarse y actuar en entornos complejos de igual forma, o incluso superior, a cómo lo hacemos los humanos. Como no siempre existe una formalización adecuada sobre cómo los humanos realizamos los procesos cognitivos, es preciso recurrir a metodologías distintas a la clásica de los tres niveles. La escasez de modelos para formalizar procesos cognitivos, sin duda, se debe en parte a la falta de un lenguaje lógico-formal eficiente para describirlos, lo que provoca que con frecuencia nos empeñemos vanamente en utilizar los mismos lenguajes de la física (análisis matemático) y de la arquitectura de computadores (álgebra de Boole y Teoría de Autómatas Finitos).

- El ordenador, y más concretamente el procesador, es el que ejecuta los programas. El esquema convencional de ordenador se debe a von Neumann (1946), y esencialmente consiste en un sistema muy versátil que realiza unas u otras operaciones según le indique un programa en código máquina almacenado en la memoria del propio ordenador. Como especialistas en arquitectura de computadores no podemos discutir la utilidad de este modelo, probada exhaustivamente, pero, como científicos podemos preguntarnos si no son posibles otros enfoques o alternativas más eficientes para la construcción de sistemas de procesamiento de la información.

He mencionado conceptos sobre procesos mentales; parece obvio observar el comportamiento del cerebro, como un maravilloso sistema de procesamiento de la información que ha sufrido una optimización paulatina gracias a las leyes de la evolución y de la selección natural. Podemos resaltar los tres siguientes hechos:

- El cerebro es capaz de resolver problemas difíciles de habla o de visión, como reconocer la cara de un amigo a la salida de un cine, en aproximadamente medio segundo. Este es un fenómeno sorprendente pensando que, en el tiempo de reconocimiento visual, una neurona de la retina no emite más que unos cuantos pulsos, y que, en general, las neuronas operan, sin considerar los tiempos

de transmisión a través de ellas, en el rango de los milisegundos. Esta circunstancia implica que esas tareas complejas pueden efectuarse en tan sólo 100 "pasos" de procesamiento, mientras que en un ordenador convencional se necesitarían miles de millones de pasos (ciclos de instrucciones máquina). Por otra parte, como he indicado con anterioridad, no conocemos suficientemente cómo el cerebro hace el reconocimiento.

- Los humanos, y animales, en general, constantemente razonamos y tomamos decisiones apropiadas partiendo de información léxica e imprecisa, no numérica, al contrario que los ordenadores convencionales que físicamente sólo pueden trabajar con información precisa, a la postre numérica, y con algoritmos causales.
- El funcionamiento del cerebro es completamente diferente al de los ordenadores (por cierto, antiguamente denominados *cerebros electrónicos*). El ordenador es una estructura física estándar y constante que realiza una u otra tarea en función de los programas que se ejecuten en él. En el cerebro, por el contrario, no hay una arquitectura fija donde se ejecutan programas de instrucciones: la estructura es variable -extraordinariamente plástica-, se modifica con el aprendizaje y se adapta al entorno; es una estructura inconclusa. Pocos discuten que en el cerebro, el conocimiento y

las tareas cognitivas poco a poco van estableciendo la estructura, y, a su vez, el conocimiento y actividad mental emergen de dicha estructura.

Analizando los hechos anteriores, identificamos diversas características y funciones de los seres vivos que los científicos e ingenieros tratamos de obtener con la concepción de nuevos sistemas de información. Así, al igual que otros grupos de investigación a lo largo de todo el mundo, tratamos de emular ciertos procesos naturales de los seres vivos mediante sistemas artificiales. Esta línea está dentro de una corriente interdisciplinar entre la neurociencia, física, matemáticas, informática y electrónica que busca establecer modelos de procesos naturales y construir *Sistemas inteligentes de computación* (o *Sistemas Bioinspirados*) que pretenden imitar (más o menos fidedignamente) la forma en que el hombre, los animales y otros sistemas biológicos procesan la información, evolucionan o aprenden procedimientos para resolver problemas.

Entre las principales metodologías que utilizamos se encuentran:

- La *Neurocomputación*, que ofrece la posibilidad de diseñar redes de neuronas artificiales con las capacidades de aprender, generalizar, autoorganizarse, adaptarse e identificar.
- La *Lógica difusa*, que incluye el cuerpo de conceptos y técnicas para tratar con la imprecisión, la granularidad de la información, el razonamiento aproximado, y, sobre todo, para computar con palabras.

- La *Computación evolutiva*, que da la posibilidad de la búsqueda aleatoria sistematizada con la consecución de un rendimiento óptimo y eficiente mediante algoritmos que emulan ciertos aspectos de la evolución biológica: cruzamiento, mutación, y supervivencia y reproducción de los organismos mejor adaptados.
- La *Computación reconfigurable*, que pretende construir sistemas con plasticidad en los que, por ejemplo, su hardware (circuitos interconectados) pueda adaptarse dinámicamente y en tiempo real al entorno, o reconfigurarse ante un fallo de alguno de sus elementos con objeto de seguir funcionando aunque sea con prestaciones más limitadas.

IV. ALGUNAS APORTACIONES COMO EJEMPLO

Para ilustrar las posibilidades de investigación dentro del campo de los sistemas bioinspirados, a continuación voy a referirme brevemente a algunos de los trabajos desarrollados en el grupo de investigación que dirijo. Como veremos nuestro trabajo se han centrado más en aspectos prácticos, aunque también hemos abordado cuestiones teóricas.

Una *red neuronal artificial (RNA)* es un sistema dinámico formado por unidades de procesamiento no lineales (*neuronas* o *nudos*) en las que la información a procesar se transfiere a través de ellas por medio de interconexiones ponderadas (*sinapsis* o *pesos*).

La solución de problemas de optimización complejos es uno de los campos de aplicación más

relevantes de los sistemas bioinspirados. Entre estos problemas se encuentran aquellos en que para llegar al resultado se requiere un tiempo que crece de forma exponencial con el número de variables de entrada a considerar. Una contribución⁵ de nuestro grupo consistió en modificar el modelo de Red Neuronal de Hopfield para ampliar el conjunto de funciones objetivo con forma no-lineal que se pueden proyectar en ella. La función objetivo es considerada por la red neuronal como una función de energía que, como en cualquier proceso físico, se va desplazando hacia un mínimo en el espacio de energías el cual caracteriza la solución del problema de optimización. Este procedimiento lo aplicamos con éxito al diseño de circuitos para test *en-línea* en circuitos digitales en los que las salidas son comprobadas concurrentemente con el funcionamiento normal del circuito.

Otra de nuestras aportaciones⁶ de sumo interés se encuentra la deducción matemática de una medida para la tolerancia a fallos y la capacidad de generalización de redes neuronales organizadas en capas tales como los *perceptrones multicapa (MLP, Multi-Layer Perceptron)* y las *redes de base radial*.

⁵ Ortega, J; Prieto, A; Lloris, A; Pelayo, FJ. *Generalized hopfield neural-network for concurrent testing*. IEEE Transactions on Computers, 42(8) 898-912, (1993).

⁶ Bernier, JL; Ortega, J; Ros, E; Rojas, I; Prieto, A. *A quantitative study of fault tolerance, noise immunity, and generalization ability of MLPs*. Neural Computation, 12(12) 2941-2964, (2000).

Dicha medida, a la que hemos llamado *sensibilidad cuadrática media*, permite evaluar cuantitativamente la capacidad de generalización de una red, así como su tolerancia a fallos, a partir de los valores de sus parámetros. Esta medida nos ha permitido también mejorar los algoritmos de aprendizaje de forma que con nuestro método se obtiene redes con mayor tolerancia a fallos y superior capacidad de generalización.

Es comúnmente admitido que en los humanos las distintas señales sensoriales de entrada (visuales, táctiles, auditivas, etc.) son proyectadas, de forma topológicamente ordenada, en áreas específicas de la corteza cerebral, formando auténticos mapas computacionales. Según este sencillo modelo las neuronas transforman las señales de entrada en salidas que siguen una distribución de probabilidad codificada espacialmente. Esta distribución representa los valores computados en las posiciones donde se obtiene una actividad máxima ⁷. Según Teuvo Kohonen⁸ el origen de los mapas cerebrales puede encontrarse en la búsqueda de una representación económica de los datos y de sus interrelaciones, lo que también constituye uno de los objetivos centrales de las ciencias de la información. Este investigador estableció como objetivo construir

⁷von der Malsburg, C. *Self-organization of orientation sensitive cells in the striate cortex*, *Kybernetik*, 14, 85-100, (1973).

⁸ Kohonen, T. *The self-organizing maps*. Proceedings of the IEEE, 78, 1464-1480. (1990).

artificialmente *mapas auto-organizativos* (SOM, *Self-Organizing Maps*) que aprendan a través de auto-organización de una forma biológicamente inspirada en los mapas cerebrales. En particular, el principal objetivo de estos mapas es transformar un conjunto de patrones de entrada de dimensión arbitraria en un mapa discreto, usualmente de dos dimensiones, y adaptativamente hacer esta transformación preservando un orden topológico. Así, se pueden construir redes en las que las neuronas que se corresponden con elementos de información más relacionados están topológicamente más cercanas, emergiendo de esta forma características y relaciones subyacentes entre los datos de entrada.

Los mapas auto-organizativos han sido objeto de nuestra atención en diversos proyectos, encaminados tanto a la mejora de los algoritmos que conducen a la formación de los mismos, como a su implementación electrónica y a ampliar el campo de sus aplicaciones. Así, uno de nuestros trabajos⁹ más referenciados trata de la aplicación de los mapas auto-organizativos para la clasificación de proteínas a partir del conocimiento de sus espectros de dicroísmo circular (CD, *Circular Dichroism*). Nuestra red neuronal, después de un proceso de aprendizaje no supervisado, es capaz de extraer características de un vector de muy alta dimensión (resultados obtenidos de la medida del CD) y proyectarlo en una retícula de dos dimensiones. La importancia de este método

⁹Merelo, JJ; Andrade, MA; Prieto, A; Moran, F. *Proteinotopic feature maps*. *Neurocomputing*, 6(4) 443-454, (1994).

radica en que genera rápidamente una estimación de la estructura secundaria de una proteína a partir de un método muy simple (hacer brillar luz polarizada sobre la proteína disuelta). Desde la publicación del artículo, en el año 1994, cualquier investigador puede obtener inmediatamente los resultados a través de una página web donde hemos implementado los algoritmos ideados.

Un problema que se presenta con frecuencia en diversos ámbitos de la ciencia y de la ingeniería es la detección eficiente de señales e imágenes (voz, electroencefalogramas, resonancia magnética, comunicaciones, etc.) que se perciben mezcladas. Desde un punto de vista práctico es de sumo interés, en biomedicina, en procesado de imágenes o en comunicaciones, la separación de estas mezclas para poder extraer la información individual de cada una de ellas, realizando lo que se denomina una *separación ciega de señales*. El calificativo de “ciega” hace referencia a que no se conocen a priori las fuentes originales ni se dispone de un modelo del medio donde se producen las mezclas. Este problema, que no tiene solución analítica, se presenta con frecuencia en la naturaleza; así, en una reunión informal de un grupo de amigos hablando simultáneamente en una cafetería, con mucho ruido de fondo, nuestro cerebro percibe una mezcla de distintas señales de audio, y si nos lo proponemos somos capaces de hacer una focalización en una de las conversaciones pudiendo seguirla; es decir, nuestro sistema nervioso es capaz de hacer separación de señales. Nuestra contribución en este campo está en la propuesta de nuevos métodos

adaptativos para separar mezclas de señales reales en medios lineales y no lineales analizando la geometría del espacio de observación^{10,11}. Nuestros métodos son mucho más simples y comprensibles que otros basados en estadísticas de alto orden, en minimización de la información mutua mediante la negentropía, en la maximización de la entropía conjunta, en el gradiente natural o en la diagonalización conjunta de automatrices.

Entre las propiedades más significativas de las redes neuronales artificiales se encuentra la de poder ser utilizadas como aproximadores universales de funciones. En efecto, las proyecciones que realizan estas redes, de vectores de entrada en vectores de salida, pueden asociarse a la implementación de una función que se aproxima a otra función desconocida, en general no lineal, pudiendo ser muy compleja. Desde el punto de vista de la ingeniería, el objetivo es establecer los parámetros de la red (determinación de pesos y de parámetros de las funciones que sintetizan los nudos) para aproximar una función determinada. Así las RNA son de aplicación en sistemas en los que

¹⁰ Puntonet, C.G., A.Prieto, A.; Jutten, C.; Rodriguez, M.; Ortega, J. *Separation of Sources: An Algorithm for Reconstruction of N-valued Signals*. Signal Processing, 46(3), 0165-1684, (1995).

¹¹ Prieto, A; Puntonet, CG; Prieto, B. *A neural learning algorithm for blind separation of sources based on geometric properties*. Signal Processing, 64(3) 315-331, (1998).

se requieren transformaciones complejas de un dominio a otro, o comportamientos continuos complejos.

Uno de los modelos de RNA más usados en aproximación funcional son las redes neuronales de *funciones base radiales* (RBFNN, *Radial Basis Function Neural Networks*), sobre todo por su simplicidad y su fácil interpretación, ya que están compuestas por una sola capa oculta cada una de cuyas neuronas responde según una función gaussiana que se puede activar con los vectores de entrada de la red. Los algoritmos de entrenamiento para este tipo de redes incorporan una etapa inicial en la que se fija de alguna manera los parámetros (posición y escala) de las gaussianas de su capa oculta. Tradicionalmente se han venido usando algoritmos de agrupamiento (*clustering*) para esta tarea, con el objetivo de colocar las gaussianas en las zonas del espacio de entrada donde, en media, puedan activarse por el mayor número de vectores de entrada. Cuando se aplican estas RNA para resolver problemas de clasificación, esta heurística tiene bastante sentido, ya que los algoritmos de agrupamiento fueron diseñados para resolver problemas de clasificación y reconocimiento de patrones. Sin embargo, cuando se trata de resolver un problema de aproximación funcional, los algoritmos de agrupamiento no realizan una buena inicialización de las posiciones de las neuronas de la red, ya que en los del primer tipo se pretende aprender la correspondencia existente entre ciertos vectores de entrada y un conjunto de clases definido en el proceso de entrenamiento, mientras que en el

segundo el objetivo es la interpolación de una función desconocida.

Para resolver este problema hemos desarrollado¹² un algoritmo que incorpora la información referente a la salida esperada para cada vector de entrada del conjunto de entrenamiento para realizar una inicialización supervisada de las posiciones de las gaussianas de las neuronas de la capa oculta, de forma que así se incrementa el número de gaussianas que responden en aquellas zonas del espacio de entrada en las que la salida de la función objetivo es más variable, lo que mejora substancialmente la calidad de aproximación funcional.

Otra de las nuevas metodologías bioinspiradas que anteriormente comenté incluye a los *algoritmos genéticos*, que caen dentro del campo de la computación evolutiva, y tratan de utilizar un modelo simplificado de la evolución biológica, valiéndose de conceptos tales como cromosoma, gen, alelo, operador cruce, operador mutación, reproducción, selección, diversidad, etc.

Los elementos de una población de soluciones posibles a un determinado problema se representan mediante cromosomas a los que se les asocia un valor de idoneidad obtenido con una función que mide cuánto se acerca cada individuo a la solución óptima. En cada generación, el algoritmo genético selecciona como reproductores a los cromosomas con mayores

¹² Gonzalez, J; Rojas, I; Pomares, H; Ortega, J; Prieto, A. *A new clustering technique for function approximation*. IEEE Transactions on Neural Networks, 13(1) 132-142, (2002).

valores de idoneidad, generándose a partir de ellos nuevos cromosomas como cruce de los correspondientes padres. A su vez, entre los cromosomas hijos se seleccionan los mejores, para producir una nueva generación. Para evitar que la búsqueda quede estancada en un óptimo local, los cromosomas se modifican con una probabilidad muy baja por medio de un operador de mutación. Tras varias generaciones se obtienen cromosomas que representan las mejores soluciones al problema planteado. Conviene hacer notar que la mayor parte de las decisiones que se toman durante el proceso descrito se suelen hacer de forma aleatoria, tal como la elección de la población inicial de cromosomas (soluciones posibles), la selección de parejas dentro del conjunto de reproductores y la aplicación del operador de mutación.

Los algoritmos genéticos son muy útiles para resolver problemas de optimización complejos. Así, nosotros los hemos aplicado con éxito al diseño de perceptrones multicapa (MLP) para resolver diferentes problemas de clasificación de patrones y aproximación funcional. Nuestra propuesta¹³ se basa en un algoritmo evolutivo que facilita el diseño de MLP buscando sus parámetros de aprendizaje, pesos iniciales y la arquitectura de red con objeto de resolver un problema concreto. Cada cromosoma representa a un MLP (pesos y tasa de aprendizaje) haciéndoles evolucionar por medio de los operadores

¹³ Castillo, PA; Merelo, JJ; Prieto, A; Rivas, V; Romero, G. *G-PROP: global optimization of multilayer perceptrons using GAs*. Neurocomputing, 35 149-163, (2000).

genéticos definidos. El método propuesto aprovecha las ventajas que presentan tanto los algoritmos evolutivos, para encontrar una solución cercana al óptimo global, como las de los algoritmos basados en descenso del gradiente para sintonizar la búsqueda hasta llegar a dicho óptimo.

Como he comentado anteriormente, las técnicas clásicas de procesamiento de la información no proporcionan herramientas efectivas para el tratamiento de léxico impreciso, utilizado a diario por el ser humano. El cerebro tiene la capacidad de procesar información imprecisa o cualitativa, frases como " esta persona no es demasiado mayor ", "esta casa es medianamente grande" son analizadas con eficacia en nuestro cerebro, a pesar de su imprecisión; cosa que directamente no lo puede hacer un computador digital convencional.

Lofti Zadeh¹⁴ definió la lógica difusa como una potente herramienta para operar con este tipo de información. Esta lógica recibe su nombre del concepto de conjunto difuso, que es una generalización de la idea convencional de conjunto, donde se asocia un grado de pertenencia a cada uno de sus elementos. El grado de pertenencia se establece con un número real comprendido entre 0 y 1. En los casos extremos (que corresponderían a un conjunto clásico) si el grado es 0 el elemento no pertenece al conjunto, y si es 1 el elemento pertenece al 100% al conjunto. De la definición anterior se pueden derivar y precisar varias propiedades y

¹⁴ Lofti Zadeh es Doctor Honoris Causa por la Universidad de Granada.

operaciones, la mayoría de las cuales tiene su contrapartida en los conjuntos clásicos. También Zadeh introdujo los conceptos de implicaciones difusas y reglas de inferencia. Con ayuda de las herramientas formales anteriores se pueden diseñar con sencillez sistemas de control cuya implementación suele ser más simple que la obtenida con controladores convencionales. Uno de los mayores éxitos de aplicación de la lógica difusa se encuentra en el campo de control, emulando así la capacidad del ser humano de controlar numerosos procesos, obviamente sin necesidad de analizar y resolver las ecuaciones diferenciales con que tradicionalmente se modelan los mismos.

Dentro del campo de la lógica difusa hemos trabajado fundamentalmente en el diseño automático de controladores difusos^{15,16}. Durante la última década, hemos ideado procedimientos para que un controlador difuso sea capaz, de forma autónoma y en tiempo real, de adaptar tanto su estructura como sus parámetros para optimizar su estrategia de control sobre un proceso industrial dado. Aunque siempre he creído muy pretencioso calificar de inteligente a algo artificial creado por el hombre, considero que el trabajo que hemos realizado en esta

¹⁵ Rojas, I; Pomares, H; Ortega, J; Prieto, A. *Self-organized fuzzy system generation from training examples*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 8(1) 23-36, (2000).

¹⁶ Pomares, H; Rojas, I; Gonzalez, J; Prieto, A. *Structure identification in complete rule-based fuzzy systems*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 10(3) 349-359, (2002).

área es una contribución fundamental dentro de lo que hoy ampliamente se conoce como “control inteligente”.

Según he indicado anteriormente, aunque la visión es una actividad que aparentemente no supone ningún esfuerzo para los humanos, para las máquinas es un problema muy complejo. Las mayores dificultades surgen cuando las máquinas tienen que operar en condiciones de movimiento, de iluminación variable y no controlada, con sombras, o tienen que tratar con objetos complejos y difíciles de describir, como ocurre en escenas de interiores y con elementos no rígidos. Con frecuencia hemos abordado el problema de visión con ayuda de computador. Como ejemplos a continuación describiré con brevedad dos de estos trabajos.

El primero se refiere al diseño de una retina artificial¹⁷ utilizando una red neuronal celular (CNN, *Cellular Neural Network*). En efecto, diseñamos un prototipo de circuito integrado en tecnología CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) cuyas principales características consistían en bajo consumo, programabilidad y la inclusión de fotosensores embebidos para procesar directamente las imágenes proyectadas en la superficie del chip. El prototipo contiene 8 x 8 celdas con una densidad de 10,7 celdas/mm² y su construcción fue financiada por la Unión Europea (Programa EuroChip).

¹⁷ Anguita, M; Pelayo, FJ; Prieto, A; Ortega, J. *Analog CMOS implementation of a discrete-time CNN with programmable cloning templates*. IEEE Transactions on Circuits and Systems II, 40(3) 215-219, (1993).

El segundo ejemplo¹⁸ consiste en el diseño e implementación hardware de un sistema para estimar la profundidad en imágenes reales con un procedimiento basado en la medida de fases. El prototipo construido utiliza procesamiento paralelo obteniéndose velocidades que permiten procesar 52 imágenes por segundo con una resolución de 1280 x 960 puntos de imagen (65 megapíxeles por segundo). La implementación se ha realizado utilizando un dispositivo de lógica programable por el diseñador (FPGA, *Field Programmable Gate Array*).

Antes de continuar con la breve reseña que estoy haciendo sobre algunas de las aportaciones científico-tecnológicas del grupo de investigación que dirijo, deseo hacer unas reflexiones sobre la invención y desarrollo de la web, de la que uno de sus padres, tal y como comente al inicio de mi discurso, fue el físico Tim Berners-Lee, junto con el ingeniero industrial Robert Cailliau.

Creo que el hombre siempre ha conseguido aquello que tecnológicamente se ha propuesto, por ambicioso que haya parecido; verificándose, en cierta medida, que *la formulación de un problema, es más importante que su solución*¹⁹. Aparte de las ensoñaciones de Julio Verne, pienso en el cumplimiento de una de las mayores ilusiones humanas como es la de disponer en un mismo tiempo y lugar de todo el conocimiento acumulado por el

¹⁸ Díaz, J; Ros, E; Carrillo, R; Prieto, A. Real-time system for high-image resolution disparity estimation. IEEE Transactions on Image Processing, 16(1) 280-285, (2007).

¹⁹ Albert Einstein.

hombre desde sus inicios, tal como ambicionaron la Biblioteca de Alejandría, las Etimologías de San Isidoro, o la Enciclopedia de Rousseau y Diderot. La web ha hecho posible este sueño. En efecto, la web está permitiendo un flujo de intercambio de información y comunicación global como jamás se había previsto en la historia de la humanidad, y muy por delante de la imprenta. Todo tipo de ideas, conocimiento e información, soportada en diversos medios (voz, música, fotografía e imágenes), puede ser intercambiado y compartido con muy poco esfuerzo, a lo largo de todo el planeta, incluso entre culturas muy diversas²⁰.

Relacionados con la web voy a citar dos recientes aportaciones de nuestro grupo, que considero de interés.

La primera de ellas²¹ consiste en el desarrollo de un procedimiento que automáticamente selecciona las noticias o artículos a presentar a un usuario cuando accede a la web. El perfil de preferencias es determinado dinámicamente por medio de un modelo vectorial que tiene en cuenta los hábitos del usuario deducidos de anteriores accesos a la red. Así, la selección de noticias se realiza en función de las preferencias del usuario y sin tener que realizar ningún tipo de acción adicional a las

²⁰ Aunque también puede ser verdad que, como dijo Einstein, *cada día sabemos más y entendemos menos*.

²¹ Samper, J.J.; Castillo, P.; Araujo, L.; Merelo, J.J.; Cordon, O.; Tricas, F. *NectaRSS, an intelligent Really Simple Syndication feed reader*. Journal of Network and Computer Applications, (2008).

usuales de navegación en la web. El sistema propuesto presenta ventajas notorias sobre otros sistemas que utilizan una representación de la información diferente, y, más, sobre los que necesitan una realimentación por parte del usuario, innecesaria en nuestra propuesta.

La segunda aportación²² en relación con la web consiste en la aplicación de mapas autoorganizativos para la identificación de comunidades sociales que se establecen dinámicamente en la web. El procedimiento, a través de información disponible de los enlaces de web-blogs a los que acceden los usuarios, descubre estructuras sociales emergentes y su evolución a lo largo del tiempo. En cierta medida los enlaces reflejan relaciones personales entre los grupos de usuarios que utilizan los blogs, y el tema específico de estos identifica las preferencias de los mismos. Este procedimiento es aplicable a cualquier sistema complejo, no sólo a redes sociales en internet, y permite tanto abstraer relaciones subyacentes entre sus componentes como visualizar la evolución de dichas relaciones a través del tiempo.

²² Prieto, B.; Tricas, F.; Merelo, J.J.; Mora, A.; Prieto, A. *Visualizing the evolution of a web-based social network*. Journal of Network and Computer Applications, Volume 31, Issue 4, , Pages 677-698, November 2008.

V. EPÍLOGO

Después de describir sucintamente algunos de los trabajos desarrollados en el seno del grupo de investigación que dirijo, a modo de epílogo, deseo hacer hincapié en algunos de los conceptos que he tratado de transmitir.

La distinción que hacemos entre ramas de las ciencias es coyuntural, necesitándose cada vez más la intercomunicación entre ellas. Un ejemplo de esta necesidad lo constituye el desarrollo futuro de la tecnología de computadores y de sistemas de comunicación.

En efecto, la conocida ley de Moore estableció de forma clarividente que aproximadamente cada año y medio la tecnología pudiese construir circuitos integrados con doble número de transistores. Esta miniaturización de los circuitos integrados conlleva, además de la reducción del tamaño de los sistemas construidos con ellos, mayor velocidad de funcionamiento, menor consumo de energía y también menor precio. En cierta medida esta ley es la que ha hecho posible (o tiene la culpa) de que cada uno o dos años, para estar al día, tengamos que cambiar nuestros ordenadores personales, afortunadamente con un incremento de prestaciones mucho mayor que el incremento de su precio.

Pero la ley de Moore tiene un límite ya que la microelectrónica está produciendo circuitos integrados en los que sus componentes, en una decena de años y al ritmo actual, llegarían a ser tan diminutos que los átomos y electrones individuales

jugarían un papel preponderante, no sirviendo en estos casos los modelos clásicos de la física utilizados para la construcción de dichos chips.

Claramente, para hacer sostenible el avance de las tecnologías de la información y de las comunicaciones es necesario el estudio de nuevos materiales y procesos que permitiesen el desarrollo de circuitos con dimensiones moleculares; es decir, del orden de una millonésima de milímetro, y que harían posible utilizar una nueva tecnología en los ordenadores del futuro. Para ello debe darse una conjunción de la ciencia de los materiales, de la nanotecnología y de la biología con las tecnologías de la información.

Otra cuestión que en este epílogo deseo volver a resaltar es que, así como tradicionalmente la Física ha considerado como objeto de estudio la materia, la energía, el tiempo y el espacio, el sujeto de la Informática es la información, concepto que poco a poco se está haciendo fundamental en distintas ciencias, como en la propia Física (según puso magistralmente de manifiesto el Prof. Sánchez Dehesa en su discurso de ingreso en esta Academia); o en la Biología, donde se están aplicando nociones originales de la Informática para descifrar y obtener la información del código genético que, como es conocido, constituye el fundamento para la comprensión de los procesos de transmisión de los caracteres hereditarios.

En otro orden de cosas, el desarrollo de los sistemas inteligentes de computación supone, en cierta medida, la emulación estructural o funcional del sistema nervioso y ello está dando una nueva

perspectiva al esclarecimiento de los mecanismos biológicos donde se asienta el comportamiento del cerebro. Tradicionalmente se ha tratado de imitar *el qué* hace el cerebro y *el para qué*, pero no *el cómo*, siendo precisamente esto último un gran desafío. Sin duda, uno de los descubrimientos más trascendentales de la humanidad sería resolver la dualidad cerebro-mente, es decir, dar una explicación a cómo emergen las propiedades mentales (cognitivas) de la estructura del cerebro. Podemos afirmar que éste es un reto equiparable al de la Cosmología en su intento de llegar a conocer las leyes generales del origen y evolución del universo. Pero nunca debemos olvidar que el teorema de incomplitud de Gödel, en términos muy generales y en pocas palabras, asevera que *el conocimiento racional nunca podrá penetrar hasta el final y alcanzar la verdad última y definitiva del universo*. Jamás podremos establecer un conjunto de leyes o axiomas básicos a partir de los cuales deducir y comprender todos los fenómenos de la naturaleza, debido a que todo sistema racional de conocimientos es esencialmente incompleto. Ello se deriva de que nosotros mismos, los pensadores, así como la Física, o cualquier otro sistema simbólico que utilicemos para describir o modelar el Universo, formamos parte de éste último²³.

²³ “¿Qué sabe el pez del agua en la que nada toda su vida?”, Albert Einstein.

VI. AGRADECIMIENTOS Y CONCLUSIÓN

Con esto concluyo, no sin antes testimoniar mi agradecimiento a todos los que me alentaron a solicitar esta plaza de académico, y a todos los ilustrísimos miembros de la Academia por haber aprobado mi elección, que lo fue por unanimidad. También permítanme que tenga un especial reconocimiento al Excmo. Sr. Presidente, D. Gerardo Pardo Sánchez, que además de haberme acogido en su día en la Universidad de Granada, siempre me ha animado y apoyado en mi actividad profesional. También puedo afirmar que siempre he congeniado muy bien con las distintas ramas de la Física, como lo prueba el hecho de mi profunda amistad con los profesores Fernando González Caballero, valedor de la Mecánica, Enrique Hita, que lo es de la Óptica, Eduardo Battaner, de la Astrofísica, y Jesús Sánchez Dehesa, de la Física Atómica, y de los que a partir de ahora seré compañero de Academia. Hoy adquiero un nuevo compromiso que consiste en suplir adecuadamente mi insuficiencia de merecimientos con mi ilusión y trabajo para no defraudar a los sabios y admirados miembros de esta docta institución y que han hecho posible el honor que hoy se me otorga.

He dicho.

"Si el Altísimo me hubiese consultado antes de embarcarse en la creación, yo le habría recomendado algo más sencillo."

(Frase atribuida a Alfonso X, El Sabio)

"La mayoría de las ideas fundamentales de la ciencia son esencialmente sencillas y, por regla general, pueden ser expresadas en un lenguaje comprensible para todos."

(Albert Einstein).